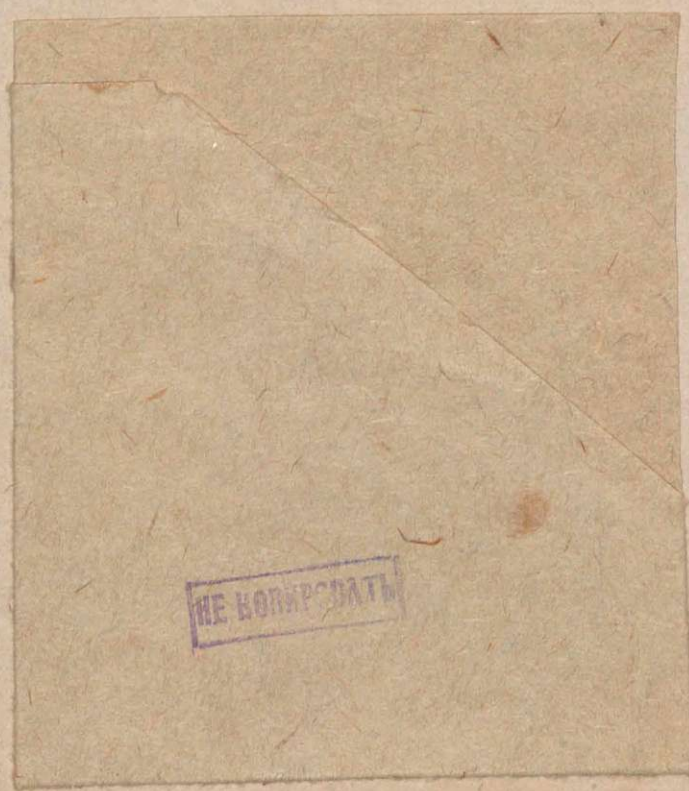
М 121/4
1932г.

Грум-Гржимайло

Пламенные печи

ГОСМАШМЕТИЗДАТ
КУБУЧ

M 121/4



НЕ КОПИРОВАТЬ

Проф. В. Е. ГРУМ-ГРЖИМАЙЛО

М 121/4

ПЛАМЕННЫЕ ПЕЧИ

С приложением статьи профессора И. Г. Есьмана
„К теории движения газов в металлургических печах"

ИЗДАНИЕ 2-е СТЕРЕОТИПНОЕ

УЧЕБНО - ТЕХНИЧЕСКОЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО КУБУЧ
ЛЕНИНГРАД 1932

ОНТИ НКТП СССР
ГОСМАШМЕТИЗДАТ
ЛЕНИНГРАД МОСКВА 1932

33-9555

2007089981

Ответственный редактор М. А. Павлов. Технический редактор Сафронович Л. М.

Ленгорлит 42627. Количество листов $59^{1}/_{2}$. Подписано к печати с матриц 27/XI – 1932 г. Формат бумаги 62 × 94. Количество бумажных листов $29^{3}/_{4}$. Общее количество знаков на бумажном листе 95040. Машметиздат № 190. Заказ № 3878. Тир. 10.200

1-я типография изд-ва Ленинградского Облисполкома и Совета, 2-я Советская, 7.

ПОСВЯЩАЕТСЯ ПАМЯТИ

МИХАЙЛО ВАСИЛЬЕВИЧА

ЛОМОНОСОВА

первого русского поэта,

ученого,

химика,

металлурга

и основателя гидравлической теории

пламенных печей.

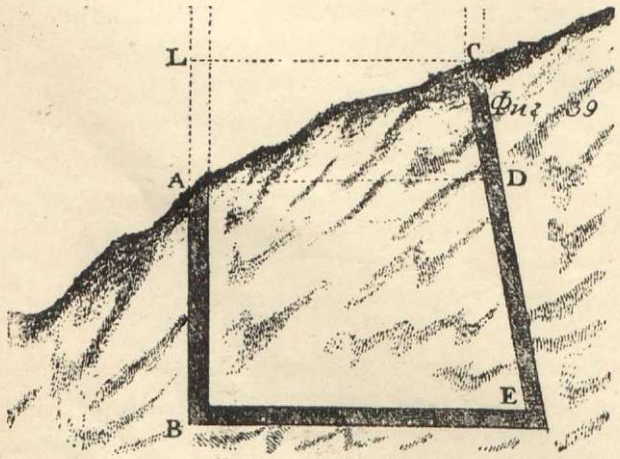
О вольномъ движенїи воздуха въ рудникахъ примѣченномъ, изъ перваго тома новыхъ Коммен-тарїевъ.

Положенїе 3.

§ 20. *Зимнею порою воздухъ долженъ вливатися въ нижней шахтъ* AB, *выходить верхнимъ* CE.

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО.

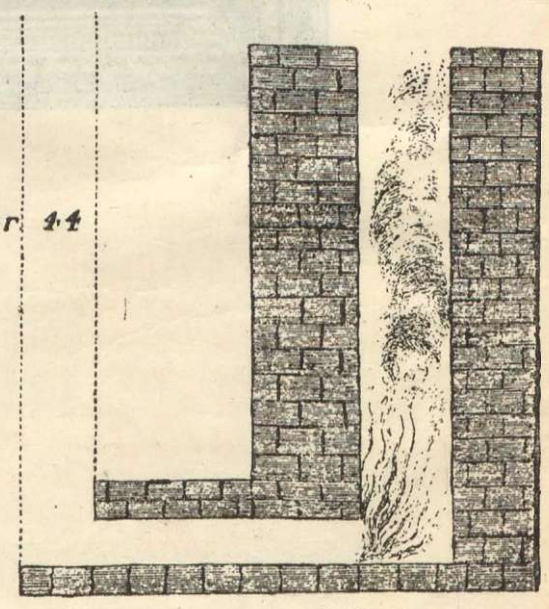
Шахтъ CE выше шахта AB, и воздухъ въ рудникахъ зимою легче внѣшняго (§ 14). По сему часть AL столпа воздушнаго, стоящаго на отверстїи A, должна быть тяжелѣе части CD другова столпа воздушнаго стоящаго на отверстїи A (§ тотъ же). Того ради столпъ LAB перевѣситъ столпъ CDE: слѣдовательно внѣшней воздухъ вольется въ отверстїе A шахта AB, и внутренней воздухъ погонитъ вонъ отверстїемъ C. И понеже воздухъ вшедшей въ рудникѣ зимою становится легче внѣшняго (§ 14.), для того нарушая всегда равновѣсїе зимою долженъ вливаться въ нижней шахтъ, выливаться изъ верхняго.



Фиг 39

Примѣчанїе 2.

§ 26. *На семъ же основанїи утверждается дѣйствїе огня въ самодуяхъ, и происходитъ по силѣ положенїя третьяго* (§ 20) *Ибо печь или труба* CD *представляетъ шахтъ, въ которомъ воздухъ теплѣе а слѣдовательно и легче внѣшняго;* AB *соотвѣтствующїй ему воздушной столпъ, много холоднѣе и гуще того, что въ* CD: *для того движенїе изъ* B *къ* D *тѣмъ быстрѣе, чѣмъ жаръ въ* CD *больше, и чѣмъ* CD *выше. Сїе разсужденїе служить можетъ на заводахъ, гдѣ къ движенїю мѣховъ водою скудно. Обстоятельное описанїе сего и производъ въ дѣло, требуетъ особливаго сочиненїя и дѣйствительныхъ опытовъ.*


Фиг 44

ВСТУПЛЕНИЕ.

В основу гидравлической теории конструкции и расчета пламенных печей положена аксиома: «движение пламени должно рассматриваться, как движение легкой жидкости в тяжелой». Такой жидкостью в данном случае является воздух окружающей нас атмосферы.

Раз читатель даст свое согласие на эту аксиому, то он уже не может усомниться и отвергнуть все последующие выводы. Как бы ни казались ему странными конструкции новых печей, он, против своего желания, должен будет с ними согласиться, ибо они являются логическими последствиями основного положения.

Подобное же чувство испытывал и я. Впервые, создавая эти новые типы пламенных печей, бывшие для меня полной неожиданностью и казавшиеся мне безобразными, я спрашивал себя: неужели эти печи могут работать? Логика говорила: так должно быть; печи должны иметь указанную конструкцию; должны работать и должны дать прекрасные результаты. Печи строились, пускались, и практика подтверждала правильность логических предпосылок.

Я не знаю ни одного случая, чтобы печь, логично построенная, отказалась работать. Напротив того, малейшее отступление от начал гидравлической теории никогда не проходило мне безнаказанно. Особенное удовольствие я испытываю при рассматривании новых патентов печей, из которых очень многие давно уже мною разработаны, как простое следствие гидравлической теории. Следствий этих так много, что если патентовать их, то придется считать патенты десятками, пока, наконец, патентное Бюро не догадается, что закон природы не может быть об'ектом патента.

Искусство строить и управлять печами умерло, как искусство, — оно обратилось в науку. Привычные формы старых, теоретически неправильно построенных печей, должны смениться новыми непривычными формами, новыми пропорциями, пока режущими непривычный, воспитанный на ложных конструкциях, глаз. Но это явление временное. В новых печах есть своя пропорциональность, своя красота, свое изящество.

Совершенно естественно, что эта книга будет встречена недоверием со стороны практиков, особенно за границей. Поворот слишком резок, и должен вызвать протест или недоумение. Вот причина, почему я так долго воздерживался от издания атласа своих новых печей и опубликования этой книги.

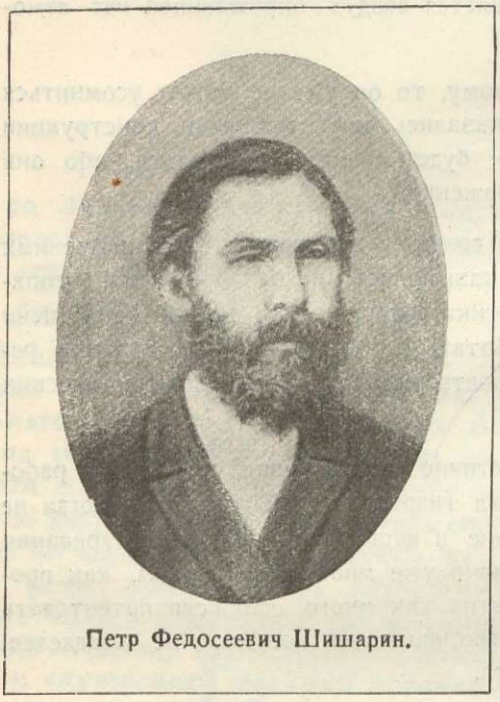
Для того, чтобы строить печи, проверять гидравлическую теорию, будучи профессором высшего учебного заведения, нужен был длительный период убеждения людей, работавших в заводах, дать средства попробовать перестроить печи. Я очень обязан своим друзьям, которые помогли мне в этом. С особенно теплым чувством вспоминаю я покойных А. Г. Броневского, Н. И. Беляева, В. И. Иванова и здравствующих Н. И. Качалова, Р. Ф. Цейдлера, Ф. Ф. Фосса, А. С. Левитского, инж. Подгородника и многих других, которые рискнули мне довериться. Я очень рад засвидетельствовать, что я никого из моих друзей не подвел и удовлетворительно справился с задачей создания новых печей. Мировая война и постройка массы новых снарядных заводов оказали решительное влияние на мои работы. Благодаря любезному разрешению правления Путилов-

ского завода Н. И. Беляев, В. И. Иванов и я создали в 1915 году «Металлургическое Бюро В. Грум-Гржимайло», которое брало на себя проектирование и постановку снарядного дела в заводах, впервые начинавших тогда работать.

Это Бюро просуществовало до осени 1918 года и разработало 137 типов печей. Создалась обширная практика, архив чертежей, который послужил материалом для создания этой книги и сохранился благодаря заботливости моих друзей И. М. Вольфа и Г. И. Гросса.

Между первой моей журнальной работой о печах и этой книгой прошло семнадцать лет. Идея расчета печей выкристаллизовалась, методы выработались, конструкции новых печей продуманы и проверены практикой. Остается широко использовать эту новую идею на благо отечества.

Результатом усвоения гидравлической теории будет большая быстрота в изучении печного дела. Я обучался ему так же, как все мои современники. Моим учителем был уставщик каменных работ Н. Салдинского завода Петр Федосеевич Шишарин, который, несмотря на все свое желание, не мог мне рассказать, как он проектирует и управляет своими печами. Его работа была целой серией попыток заставить печь работать. Его опыты проходили перед моими глазами, но мое инженерное образование не давало мне никаких выгод в познании того, что делалось в печах.



Петр Федосеевич Шишарин.

Только через пятнадцать лет я додумался до причины движения пламени и до законов, управляющих этим движением. Я создал гидравлическую теорию движения пламени. Мой товарищ, профессор Ленинградск. Политехн. Институт. Иосиф Гаврилович Есьман дал математическое выражение этой теории и с тех пор дело встало на рельсы [1]). Теперь, для того, чтобы сделаться специалистом печного дела нужно всего несколько недель. Вот пример экономии труда мысли, которую дает наука.

В основу всех расчетов настоящей книги положены константы проф. М. А. Павлова. Некоторые детали расчета печей, оговоренные в примечаниях, есть результат разработки данного вопроса, совместно с моим помощником по преподаванию теории печей в Ленинградском Политехническом Институте инженером-металлургом, ныне профессором Б. В. Старк. При разработке новых конструкций я широко пользовался трудами своих учеников, студентов Ленинградск. Политехн. Институт., своих сотрудников по Металлургическому Бюро. Примеры расчетов печей для настоящего издания выполнены Н. А. Соболевским, К. Ф. Оленевым и моим сыном Сергеем. Таким образом, эта книга является коллективным трудом многих лиц. Новые идеи расчета печей перерабатывались многими головами. Было много сомнений, возражений и обсуждений. Некоторые идеи и конструкции были переработаны много раз, многими лицами, чем избегнуты туманности, достигнута необходимая ясность и красота конструкции новых печей.

Подписывая эту книгу своим именем, я хорошо знаю, что фактически она является результатом работы всей мной основанной и мной руководимой школы, изучавшей вопрос о расчете пламенных печей.

Книга издается на деньги, собранные подпиской среди промышленных трестов Теплотехническим Институтом. Я шлю свою благодарность всем лицам, содейство

[1]) Работа проф. И. Г. Есьмана была напечатана первоначально в журнале Русского Металлургического Общества в 1910 г. (стр. 319). В виду редкости этого издания, работа проф. И. Г. Есьмана, с его любезного разрешения, помещена во II части настоящей книги.

вавшим этому изданию и особенно В. И. Очкину. Д. Н. Вырубову и моему сыну С. В. Грум-Гржимайло, взявшим на себя редактирование и чтение корректур всей книги. Без них я, конечно, никогда бы не напечатал этой работы.

В заключение—два слова о моем предшественнике.

Перед моими глазами вставал вопрос: каким образом гидравлическая теория, базирующаяся на аксиоме: — движение пламени есть движение легкой жидкости в тяжелой — могла явиться новостью в XX веке. Миллионы людей имели дело с печами. Тысячи образованных людей старались проникнуть в тайну печей. О ней же ведь и я раздумывал целых пятнадцать лет. Причина этому простая: человечество не любит додумываться до конца. Мы усвоили себе привычку брать сообщаемые нам сведения на память, не стараясь проникнуть в самую природу явления. Мы говорим и думаем готовыми формулами, которые мы запомнили, но не усвоили до конца. Неверное, неполное изложение закона Паскаля и гидростатического давления в учебниках физики, пренебрежение в них давлением атмосферы; полное отсутствие изложения главы о гидростатическом давлении газов, законов движения газов в воздухе,—вот причина, что идеи восемнадцатого века явились новостью в двадцатом.

Основателем гидравлической теории движения пламени в печах является Михаил Васильевич Ломоносов. В своей диссертации „о вольном движении воздуха, в рудниках примеченном“ (1742 г.) он дал кристально ясную мысль о движении воздуха в рудниках и дымовых трубах. Его теория выдавливания тяжелым, холодным, наружным воздухом теплого дыма была прекрасно усвоена всем миром. Но на этом дело и остановилось. В дальнейших попытках дать объяснение движению газа в печах запуталось слово „тяга“, слово грамматически абсурдное, ибо глагол тянуть предполагает непосредственную связь между силой и предметом, который тянется. Тяги в печах и дымовых трубах нет; есть выдавливание теплого воздуха и дыма тяжелым воздухом, как верно указал М. В. Ломоносов, ни разу не употребивший слово „тяга“.

Памяти Михаила Васильевича Ломоносова, которого мы слишком мало ценим, как ученого, я и посвящаю всю работу.

В. ГРУМ-ГРЖИМАЙЛО.

ЗАМЕЧАНИЕ АВТОРА.

К стр. 19, ч. III. Совершенно очевидно, что раскрытие наружных швов кладки шахты доменных печей дает импульс только первых трещин в доменном кирпиче. Дальнейшее обращение кирпича в дресву есть следствие реакции выделения внутри кирпича сажистого углерода по реакции Бэля—разложения при низких температурах окиси углерода на сажистый углерод и угольную кислоту.

К стр. 35, ч. III. Фиг. 40 должна быть исправлена: в конце свода сделан припор, высота коего не соответствует высоте свода под шуровочным отверстием. При столь небольшой разнице между нижним уровнем припора и шуровочного отверстия из этоуо последнего будет выметывать газы, чего надо избегать. Надо или срезать припор или поднять свод. Заднюю стенку зольника лучше вдвинуть в топку, чтобы зола не оплавляла бы ее огнеупорной кладки и не давала бы костылей при легкоплавкой каменноугольной золе.

К стр. 16, ч. IV. Фиг. 11. Мне сообщили из Пермских пушечных заводов, что мое заявление, что ежектирующее действие форсунки высокого давления равно нулю, слишком пессимистично. Вдвигая и выдвигая форсунку в этом заводе, удалось найти такое положение, когда форсунка высокого давления работала и при положительном давлении под сводом печи, всасывая нужный для горения воздух.

В Мартеновских печах, где форсунки высокого давления устанавливаются в своде рабочего пространства и работают тоже при положительном давлении в рабочем пространстве, но они не инжектируют нужный для горения воздух, а получают его из воздушных пролетов.

К стр. 105, ч. IV. Фиг. 101. По этому типу была построена маленькая печь полулабораторного типа для обжига каустического магнезита. Диаметр шахты 1 *м*, высота всей печи с выгребом—2950 *мм*, производительность 120 п. обоженного магнезита в сутки. Печь идет прекрасно и дает идеально ровно обожженный каустический магнезит. Печам с внешней сожигательной камерой предстоит большая будущность.

К стр. 275, ч. IV. Фиг. 23. Работа на карусельной печи указала на некоторое неудобство тангенциального направления пламени форсунки. В круглой печи получается вихревое кольцо, энергично всасывающее холодные газы с пода печи в свою середину. Это недостаток, который легко исправить, придав печи на уровне форсунки очертание по спирали. Тогда пламя форсунки будет само направляться в середину и питать центр вихревого кольца; всасывающее влияние его прекратится.

К стр. 45, ч. V. Фиг. 16. У свода топки сделан слишком большой припор, могущий вызвать выметывание пламени в шуровочное окно. Недостаток одинаковый с фиг. 40, стр. 35, ч. III. Надо или срезать припор или повысить свод топки настолько, чтобы над припором было бы пространство для газослива, вычисляемого по формуле И. Г. Есьмана.

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ.

Второе издание книги проф. В. Е. Грум-Гржимайло „Пламенные печи“ выходит в виде стереотипа спустя 6 лет после первого издания. Выпуск стереотипного издания объясняется большой нуждой в этой книге и отсутствием пособий, широко трактующих принципиальные вопросы расчета и конструкции пламенных печей.

Книга „Пламенные печи“ была написана проф. В. Е. Грум-Гржимайло в период 1909—1924 гг.

По отдельным частям книги рукописи проф. В. Е. Грум-Гржимайло относятся к следующим годам:

I часть 1909 г., 1915—1917 гг., 1919 г.
II „ 1910—1911 гг., 1919 г.
III „ 1915—1917 гг.
IV „ 1920—1922 гг.
V „ 1909—1922—1925 гг.

В книге „Пламенные печи“ изложена созданная проф. В. Е. Грум-Гржимайло „Гидравлическая теория движения газов“ и описаны конструкции печей и сушил, исполненных на основах этой теории.

Со временем выхода 1-го издания книги (1924—1925 гг.) совпала организация при Н. Т. О. ВСНХ в Москве Государственного Бюро Металлургических и Теплотехнических конструкций — БМТК, — которое занялось разработкой проектов печей и сушил.

Создателем этой проектной организации был проф. В. Е. Грум-Гржимайло, под руководством которого БМТК находилось до его смерти, последовавшей 30 октября 1928 года.

Большая поддержка организации БМТК была оказана руководством ВСНХ, а особенно Председателем Президиума ВСНХ Феликсом Эдмундовичем Дзержинским и Коллегией Научно-Технического Отдела ВСНХ, которые всемерно содействовали организации БМТК, правильно оценивая народно-хозяйственную важность задач БМТК в деле реконструкции и развития социалистической промышленности по линии печей и сушил.

БМТК, действовавшее на началах хозрасчета, в основном было занято конструктивной проработкой печей и сушил и не имело материальной возможности организовать экспериментальную работу по расширению научной базы, т.-е. дальнейшей проработки гидравлической теории, которая требовала организации специальной лаборатории.

В вопросе экспериментальной проработки также огромную помощь оказал Председатель ВСНХ СССР Феликс Эдмундович Дзержинский, который очень сочувственно отнесся к идее организации специальной лаборатории для изучения движения газов в промышленных печах.

В 1926 году, по инициативе проф. В. Е. Грум-Гржимайло, была организована при Ленинградском Физико-Техническом Институте „Лаборатория газа и пламени“, руководство которой взял на себя проф. М. В. Кирпичев. „Лаборатория газа и пламени“ впоследствии преобразовалась в Ленинградскую Физико-Техническую Лабораторию (ЛФТЛ) и далее в Физико-Технический Отдел Ленинградского Теплотехнического Института (ЛОТИ).

За время с 1926 г. до 1928 г. ЛФТЛ был выработан метод изучения характера движения газов на водяных моделях, рассчитанных по методу подобия. Эти работы оказали большую помощь при конструировании, почему дальнейшая работа в области печей и сушил пошла по пути кооперирования работы БМТК и ЛФТЛ.

За период работы Бюро Металлургических и Теплотехнических конструкций (1924—1930 гг.) (реорганизованного в „Стальпроект“ в 1930 г. и в настоящее время в „Московский Гипромез“) в части печей и сушил была проделана огромная работа.

Максимальный размах работы был вызван вступлением нашей промышленности в период интенсивного социалистического строительства и осуществлением пятилетнего плана развития народного хозяйства СССР. Этот период характеризуется не только количественным размахом, но и изменением характера объектов разработки, так как работа „Стальпроекта“ в целом была переведена на проектирование заводов-гигантов советской металлургии, отвечающих современному состоянию американской техники. Естественно, что и объекты разработки получили новую и более мощную форму, чем в период реконструкции. Здесь необходимо отметить также неоценимое преимущество, которое, в советских условиях, дает объединение технического и административного управления промышленностью проведению в жизнь научной инициативы, в данном случае — осуществлению работ БМТК — „Стальпроекта“.

За это время исполнено по заданиям промышленности более 1.200 проектов печей и сушил, из которых 600—800 построены и успешно эксплоатируются промышленностью Союза. Около 2% от всего количества печей и сушил были сломаны, как не оправдавшие себя конструкции, некоторые потребовали переделок при пуске и остальные или не строились, или находятся в постройке.

Многие конструкции дублируются, при чем некоторые из них приняты как типовые и строятся в массовом масштабе.

На этой работе воспитался и окреп коллектив конструкторов-печников, которые в настоящее время сконцентрированы, главным образом, в Тепловом и Мартеновском отделах Мосгипромеза.

Естественно, что за прошедший период работы с 1925 г. накопленный опыт значительно повысил уровень знаний по отношению к содержанию книги „Пламенные печи", служившей фундаментом в первые годы работы БМТК.

По инициативе самого проф. В. Е. Грум-Гржимайло еще в 1927 г. был поставлен вопрос о составлении дополнений к книге „Пламенные печи". С дальнейшим расширением опыта этот вопрос ставился неоднократно уже в плане пересмотра всей книги. Однако, большое количество разнообразных неотложных вопросов, которые приходилось и приходится решать ежедневно, в связи со спешным проектированием для нужд нового строительства, не дало возможности освободить основных работников для подготовки к печати того огромного материала, который был накоплен в процессе работы и должен быть обобществлен. Значительную роль в этой задержке сыграла и последовавшая в 1928 г. смерть автора.

Накопленный материал состоит как из большого количества новых конструкций, так и из теоретических положений, являющихся дальнейшим развитием гидравлической теории и других дисциплин, связанных с печной теплотехникой.

Весной 1931 г. инициативной группой работников „Стальпроекта", во главе с проф. М. А. Павловым, Б. Л. Колесниковым и инж. Г. О. Муравским, была организована редакционная коллегия по переизданию „Пламенных печей".

Работу, которую должна была выполнить редакционная коллегия, предполагалось свести к двум этапам.

Первый этап работы заключал в себе подготовку второго издания книги „Пламенные печи" с минимальными добавлениями и изменениями—с тем, чтобы скорым выпуском этого издания можно было сократить нужду в этой книге.

Далее предполагалось произвести полную переработку „Пламенных печей" для 3-го издания, с включением в нее всех работ с 1924 по 1931 г.

Однако, непосредственная редакционная работа показала, что даже небольшие изменения для 2-го издания значительно отдалят выход книги, поэтому под влиянием настойчивых требований Ленинградского Металлургического Института и издательства КУБУЧ о немедленном выпуске 2-го издания было решено не задерживать выпуск книги в свет, напечатать ее в виде стереотипного 2-го издания и тем самым выиграть время для проведения серьезной работы по капитальному пересмотру книги и выпуску ее в виде переработанного 3-го издания.

Основные поправки и дополнения для 3-го издания книги „Пламенные печи", подготовляемой к печати Росмашметиздатом выяснены и, в общих чертах, сводятся к следующему:

1) Приложение законов теплопередачи к изучению внутренних и внешних тепловых потоков в условиях работы печей и сушил.

2) Методика составления тепловых расчетов, т.-е. определение расхода топлива в печах и сушилах путем составления, при проектировании, тепловых балансов. На основании полученного этим путем расхода топлива — определение основных размеров печей.

3) Применение при проектировании для изучения характера движения газов моделей печей и сушил, рассчитанных по методу подобия, как следующий этап в моделях вода-керосин.

4) Опубликование расчетов и чертежей новых конструкций печей и сушил, разработанных после напечатания 1-го издания.

По оглавлению первого издания эти коррективы и добавления располагаются следующим образом:

I часть.

Глава 1. Остается без сколько-нибудь значительных изменений.

Глава 2. Значительно расширяется в части изложения характера движения струй, влияния перемешивания струй на время завершения реакции горения и свойства факела пламени. Разобран вопрос о влиянии диффузии на процесс горения.

Глава 3. Значительно дополняется в части изложения влияния на скорость протекания реакций горения отдельных факторов. Приводится цифровой материал по времени завершения реакций горения из практики работы печей.

Глава 4. Перерабатывается в сторону уточнения понятия падения теоретической температуры горения в секунду в виде анализа работы пламени в печи на основе приложения законов теплопередачи.

Глава 5. Методика расчетов горения полностью сохраняется, но самые расчеты уточняются в сторону учета неизбежных потерь (в золе и т. п.).

В расчетах на горение с заданной температурой (примеры стр. 27, 39 и 41 первого издания) отчетливее проводится разница между теоретической и практически достижимой температурами горения.

Результаты расчетов, которыми будет охвачено большинство типичных топлив Союза, будут оформлены в виде графиков и таблиц.

Глава 6. Расчеты генераторного газа уточняются учетом обычных потерь с золой, смолой, сажей и т. п. При составлении теплового баланса нижней зоны генератора принимается температура 1.100° С — более близкая к действительности. На основе имеющихся к настоящему времени данных о составе генераторного газа вносятся изменения в некоторые числовые коэффициенты, учитывающие долю участия углерода топлива в отдельных составных частях газа.

Глава 7. Расширяется введением ряда новых видов топлива, нашедших в настоящее время применение для отопления мартеновских печей.

II часть.

Глава 1. Основные положения „Гидравлической теории" остаются незыблемыми. Качественный метод иллюстрации движения газов на моделях вода-керосин, имеющий в настоящее время только историческое значение, дополняется моделями, рассчитанными по „Методу подобия", разработанному сотрудниками Ленинградской Физико-Технической Лаборатории проф. М. В. Кирпичевым и инж. Гухманом. Метод подобия вносит некоторый корректив в выводы 1-го издания (например, в вопросе о движении газов в прокатных печах).

Глава 2. „Основы правильной конструкции печей" будут значительно дополнены. Оценка правильности конструкции печи будет дана как с точки зрения движения газов, технологии нагрева и горения, так и в отношении свойств огнеупорных материалов и законов теплопередачи, объясняющих сущность работы пламени в печах. Значительные дополнения относятся к расположению факела горения по отношению к потребляющему тепло предмету, к обеспечению условий правильного протекания реакций горения и службы огнеупорного материала в диафрагмированных и выносных сожигательных камерах.

В части оценки правильной формы рабочего пространства печей и расположения в нем пламени будут разобраны: 1) печи керамические и химические (камерные, многокамерные и туннельные), 2) печи металлургические для термической обработки: подовые, методические и т. д., 3) нагревательные кузнечные, прокатные, методические, колодцевые, печи Сименса и т. д., 4) циркуляционные пламенные печи, колодцы, вертикальные, с выдвижным подом и камерные печи, 5) печи низкой температуры муфельные, подовые с решетчатым сводом, циркуляционные, литейные сушила и т. п., 6) печи ванные с внешним обогревом ее для термической обработки, цементации на высокие и низкие температуры, 7) плавильные ванные пламенные печи: печи мартеновские, чугуноплавильные печи и печи для варки стекла.

В этой главе будут выяснены основы правильной конструкции рабочей камеры и особенности работы пламени и его расположения.

Глава 3. Остается без изменений.

Глава 4. Дополняется иллюстрациями.

Глава 5. Значительно перерабатывается; дополняется статьей В. Е. Грум-Гржимайло „Принципы работы гидравлически правильно построенных сушил", материалами патентных заявок, докладов и т. п. Две дополнительные статьи будут излагать — первая — итоги применения гидравлической теории в конструировании сушил и анализ работы современных сушил „уродов",— вторая—динамику сушильного процесса, разработанную на основе j - d диаграммы и связь ее с движением воздуха в сушилах, в частности,—уточняется вопрос о степени насыщения удаляемого из сушила воздуха, которое зависит от влажности материала, колеблется в пределах 40%—90% и не может быть принято во всех случаях равным 75%, как это принято в 1-м издании.

Глава 6. Дополнительная „Основы правильной конструкции печей бытового назначения".

Глава 7. Дополнительная „Принципы правильного устройства вентиляции" составляется на основании оставшегося после смерти В. Е. Грум-Гржимайло разрозненного материала, который в большей части будет опубликован впервые.

В виде приложения ко II части, помимо статьи И. Г. Есьмана „К теории движения газов в металлургических печах", помещаются:

1) Метод подобия и исследование движения газов на моделях.
2) Законы передачи тепла и расчет прогрева стен периодически работающих печей.
3) Теория и расчет инжекции и свободной струи.

III часть.

Глава 1. Остается без изменения, но дополняется данными строительной прочности огнеупорных материалов при высоких температурах, а также свойствами изоляционных материалов.

Глава 2. Добавляются практические примеры устройства фундаментов печей и регенераторов, а также и дренажа регенераторов и устройство железо-бетонных ящиков как основания печей.

Глава 3. Не изменяется, но дополняется в части размеров кирпичей, принятых ОСТ'ом, и качественной характеристики огнеупорных материалов.

Глава 4. Дополняется в части изучения вопроса о способах укладки кирпичей о нормальных конструкциях стен печей, о распределении материалов по толще стен в зависимости от огнеупорности и распределения температуры в стене, о применении изоляционных материалов.

Глава 5. Таблица размеров пода мартеновских печей, объема рабочего пространства, в зависимости от тоннажа печи, будет прокорректирована на основании позднейших данных о работе мартеновских печей. В качестве примера для расчета будет взята печь большого тоннажа. Соответствующие изменения будут внесены и в самый способ расчета. Дополняются примеры устройства подовой арматуры. Пример кладки пода и стен будет заменен чертежом для печи с наклонной задней стенкой.

Глава 6. Добавляется описанием рационального устройства жолобов мартеновской печи и о применении кислорода для разделки отверстий.

Глава 7. Изменяется в связи с тем, что эта глава была написана на основании изучения движения газов на моделях вода-керосин, в некоторых случаях искажающих выводы в отношении характера движения газов.

Глава 8. Значительно расширяется практическими данными о конструкциях, уходе и влиянии канализации и подовых водяных труб на производительность печей и равномерность нагрева изделий.

Выясняется необходимость обязательного охлаждения пода при работе со шлаком и устройстве под подом регенераторов.

Глава 9. Остается без изменения за исключением примеров кладки свода загрузочных окон, пересечений сводов. Дополняется данными о конструкциях подвесных сводов.

Глава 10. Добавляется—в части уточнения расчетов каркасов, данных о службе каркасов: теплоизоляции регенераторов; расширяются рассуждения о необходимости железных кожухов в печах и регенераторах.

Глава 11. Значительно добавляется примерами из опыта. Арматура заслонок будет помещена новая. Добавляются чертежи охлаждения рам и заслонок, а также системы подъема заслонок: ручной, пневматический и электрический.

Глава 12. Расширяется: вводится описание серии головок и данные для их расчета.

Глава 13. Исправляются и дополняются схемы расположения регенераторов и вертикальных каналов.

Глава 14. Добавляются детали устройства разных насадок регенераторов и лабораторные исследования регенераторов методом подобия.

Глава 15. Добавляется: расчеты рекуператора, практика эксплоатации рекуператоров и их износ; потеря воздуха в дымовую трубу, благодаря неплотностям рекуператора и влияние этого фактора на работу рекуператора и дымовой трубы; температурные пределы установки рекуператоров; влияние материала рекуператора на размеры рекуперативной кладки; рациональные системы рекуператоров; рекуперативные воздухонагреватели и экономайзеры, их работа и область применения.

Глава 16. Часть главы о дымовых шиберах переписывается заново с включением шиберов сист. Блау-Нокс и т. д. Вводится поправка на необязательность применения формулы Есьмана к расчету боровов, и в связи с этим изменяются некоторые выводы, сделанные автором. Рациональные конструкции боровов и выбор материала. Вводится специальная глава о перекидных устройствах.

Глава 17. Глава об устройстве топок значительно дополняется в части изучения сопротивления слоя топлива (уголь, дрова, торф и пр.), нормальных размеров топок, взаимозависимости, толщины слоя топлива, напряжения колосниковой решетки и коэффициента избытка воздуха данными о проектировании полугазовых и генераторных топок и рассуждениями о выборе конструкции топок применительно к конкретным случаям проектирования.

Изменяется профилировка полугазовых угольных топок фиг. 138, как не оправдавшая себя.

Глава 18. Добавляются типы форсунок, свойства струи, получаемой при форсунках, и, в зависимости от этого, конфигурация топочных камер и камер горения, а также целый ряд специальных конструкций форсунок.

IV и V части.

Эти две части представляют собой описание примеров конструкций и расчетов печей и сушил, основанных на объеме знаний, изложенных в предыдущих частях.

Ввиду того, что предыдущие части значительно дополняются и что в настоящее время накоплен огромный конструктивный и фактический материал в этой области, большинство чертежей будет заменено новыми. Без изменения останутся те материалы, которые, во-первых, имеют исторический интерес, а, во-вторых, не являются в данный момент устаревшими. Многие новые чертежи будут являться развитием конструкций, помещенных в первом издании.

Расчетный материал будет написан заново, при чем будут помещены расчеты непрерывно и периодически действующих печей, употребляемых в разных отраслях промышленности.

Основной корректив в расчетах сводится к методике определения расхода топлива по дифференцированным тепловым потерям путем составления теплового баланса печи.

На основе полученного этим методом расхода топлива производится расчет основных размеров печи.

Эта методика определения расхода топлива заменяет расчет по падению температуры в секунду, который сыграл свою положительную роль в деле выработки методики расчета печей, но в настоящее время может быть оставлен только для характеристики интенсивности работы пламени.

В пятой части предполагается дать около двадцати полных расчетов периодически и непрерывно действующих печей и сушил, иллюстрированных полученными практическими данными работы этих печей и оценкой точности предлагаемых методов расчета.

Вышенаписанным предварительно оценивается объем работы, намеченный по переработке третьего издания.

Инициаторами, выдвинувшими этот объем работы, являются следующие сотрудники Мосгипромеза:

Грум-Гржимайло, А. В., Грум-Гржимайло, Ю. В., Иванцов, Г. П., Коновалов, Н. С., Лукоянов, Б. И., Парщиков, А. А., Пильник, М. Е., Подгородник, И. С.

Кроме указанных, изъявили согласие на участие в работе следующие сотрудники ЛОТИ: Гухман, А. А., Зимин, В. П., и Михеев, М. А., а также сотрудники Мосгипромеза: Бабушкин, О. П., Белявский, А. А., Баум, В. А., Голосман, К. М., Градис, Э. Л., Грудев, П. И., Дагаев, Т. П., Дмитриев, В. Ф., Дютель, А. А., Ильин, И. А., Кожин, А. П., Колобаев, Н. И., Красовский, С. А., Литвак, З. Л., Лодейщиков, В. В., Лычагин, А. С., Нащекин, А. В., Поляк, Г. Л., Рязанов, П. И. Скворцов, П. С., Трубецков, М. М., Фейгин, В. М., Фролов, В. Н., Целиков, А. И., Чижев, А. А., Шилков, М. А., и другие.

Общая редакция — проф. М. А. Павлов.

В редакционную коллегию включены Грум-Гржимайло, А. В., Грум-Гржимайло, Ю. В., Иванцов, Г. П., Колесников, Б. Л., Коновалов, Н. С., Лукоянов, Б. И., Муравский, Г. О., Парщиков, А. А., Пильник, М. Е., Подгородник, И. С.

Редакционная коллегия.

СОДЕРЖАНИЕ.

Предисловие.

Вступление.

Часть I.—Теория горения.

Глава I. Явления горения в простой топке.

Глава II. Физическая природа пламени.

Глава III. Химическая природа пламени.

Глава IV. Классификация печей.

Глава V. Решение задач на вычисление проектных данных для печей с простой топкой.

Глава VI. Расчеты генераторного газа.

Глава VII. Зависимость работы мартеновской печи от рода топлива

Часть II.—Гидравлическая теория движения пламени в печах.

Глава I. Законы движения печных газов.

Глава II. Основы правильной конструкции печей.

Глава III. Основной принцип правильного устройства газопроводов.

Глава IV. Основной принцип правильного устройства пылеуловителей.

Глава V. Основы правильной конструкции сушил.

Заключение. Основные положения гидравлической теории.

Приложение. Проф. И. Г. Есьман.—„К теории движения газов в металлургических печах".

Часть III.—Постройка печей.

Глава I. Огнеупорные материалы.

Глава II. Фундаменты пламенных печей.

Глава III. Основные положения архитектуры печей.

Глава IV. Кладка печей.

Глава V. Устройство пода плавильных печей.

Глава VI. Устройство отверстия (летки).

Глава VII. Общая форма рабочего пространства нагревательных печей.

Глава VIII. Под нагревательных печей.

Глава IX. Перекрытия.

Глава X. Обмуровка пламенных печей.

Глава XI. Устройство окон.

Глава XII. Устройство головок мартеновских печей.

Глава XIII. Устройство вертикальных каналов, шлаковиков и камер регенераторов мартеновских печей.

Глава XIV. Кладка регенеративной решетки.

Глава XV. Рекуператоры.

Глава XVI. Дымовые камеры и борова.

Глава XVII. Устройство топок.

Глава XVIII. Нефтяные пламенные печи.

Часть IV.—Примеры проектов печей.

Глава I. Регенераторы.

Глава II. Печи для термической обработки стали для температур 600—1000° С.

Глава III. Печи для нагрева слитков и заготовок.

Глава IV. Плавильные печи.

Глава V. Печи для обжига кирпича, фарфора, варки стекла и пр.

Глава VI. Печи различного назначения.

Глава VII. Проекты сушил.

Часть V.—Примеры расчетов печей.

Глава I. Расчет кирпичеобжигательной печи.

Глава II. Расчет печи с рекуператором для производства кровельного железа.

Глава III. Расчет методической печи Сименса с разделением пламени для нагрева слитков.

Глава IV. Расчет мартеновской печи.

Глава V. Расчет конденсатора для осушки дровяного генераторного газа.

Глава VI. Расчет сушила многократного насыщения для сушки картофеля.

Приложения.

ЧАСТЬ I.

ТЕОРИЯ ГОРЕНИЯ.

ГЛАВА I.

Явления горения в простой топке.

При установившемся горении твердого горючего, например, каменного угля, дров или торфа в простой топке, на колосниках мы наблюдаем три зоны:

1) зону горения раскаленного обугленного горючего;

2) зону выделения продуктов сухой перегонки;

3) зону горения летучих продуктов сухой перегонки за счет примешанного к ним кислорода воздуха с образованием пламени.

Горючее, дающее мало летучих продуктов сухой перегонки, дает короткое пламя. Таковы, например, древесный уголь, кокс, антрацит. Напротив того, дрова, торф, жирные каменные угли дают длинное пламя.

Некоторые сорта горючего, например, эстляндские горючие сланцы, настолько богаты летучими продуктами, что легко зажигаются от спички, как сургуч. Но ими трудно поддерживать горение в топке парового котла. После выделения летучих продуктов они не образуют раскаленного кокса, и так же легко затухают, как тряпка, смоченная бензином или спиртом. В такой топке нет очага высокой температуры, и горючее с теплотворной способностью около 3 тысяч калорий тухнет при первой неловкости кочегара. Интересно, что те же сланцы, будучи превращены в пыль и высушены, дают прекрасные результаты в пылевой топке вращающихся печей для обжига портландского цемента, где смесь пыли и воздуха непрерывно поджигается раскаленными до 1400°С стенками сожигательной камеры вращающейся печи.

Прямую противоположность эстляндским горючим сланцам представляет донецкий антрацит. Благодаря своей компактности он развивает на колосниках такой жар, что чугун колосников под кусками антрацита плавится; то же делается и с его золой; колосник затягивает образующимся шлаком, и топка перестает работать. Единственная возможность работать на таком антраците это понижать температуру очага горения введением в воздух паров воды.

Кокс и древесный уголь горят на колосниках спокойно. Их большой об'ем увеличивает лучеиспускание очага горения и понижает его температуру.

Большие трудности представляет употребление порошкообразного топлива в топках с обыкновенными колосниками. Особенно трудно сжигание коксовых высевок и антрацитового штыба, например, Егоршинских копей на Урале.

Трудность сжигания порошкообразного топлива заключается в том, что горящая пылинка дает такой маленький кусочек раскаленного кокса, что он успевает сгореть раньше, чем подожжет соседнюю пылинку и горение прерывается. Таким образом, в топке опять не оказывается постоянного очага горения.

Горение порошкообразного топлива хорошо удается при соблюдении двух условий: 1) надо принять все меры для уменьшения лучеиспускания колосниковой решетки; 2) уход за топкой должен быть организован так, чтобы питание топки свежим горючим и удаление золы не нарушало установившегося очага горения.

Первое условие удовлетворяется при работе на шлаковой подушке; второе условие при подбрасывании свежего горючего, понемногу, тонким слоем, но часто, и при удалении золы с большой осмотрительностью. Спускать золу надо снизу, из-под колосников, железным крючком, наблюдая, чтобы просыпалась только совершенно холодная зола. Таким образом, можно сжигать под котлами с обыкновенной решеткой даже Егоршинский штыб.

Те топки, в которых освобождение от золы нарушает режим очага горения, в принципе ложны.

Итак, основное условие правильно устроенной топки с простыми колосниками заключается в правильной работе очага горения.

Наличность очага горения делает возможным реакцию

$$C + O_2 = CO_2 + 97.650 \text{ кал} \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

которая читается так: 12 грамм углерода соединяются с 32 граммами кислорода и дают 44 грамма

углекислоты с выделением 97.650 малых калорий [1]) или 97,65 больших калорий. В об'емных отношениях эта реакция читается так: одна молекула углерода [2]) соединяется с молекулярным об'емом кислорода [3]) и дает один молекулярный об'ем углекислоты. Таким образом, об'ем углекислоты равен об'ему реагирующего кислорода, а об'ем твердого углерода может быть принят равным нулю.

В толстом слое раскаленного древесного угля или кокса реакция горения может итти по пути, так называемого, неполного горения,

$$C+\frac{O_2}{2}=CO+29.430 \text{ кал} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Она читается так: молекулярный об'ем углерода (12) соединяется с половиной молекулярного об'ема кислорода $\left(\frac{32}{2}\right)$ и дает молекулярный об'ем окиси углерода (28). Заметим, что об'ем полученной окиси углерода в два раза больше об'ема реагировавшего кислорода.

Полученная окись углерода реагирует с кислородом по реакции

$$CO+\frac{O_2}{2}=CO_2+68.220 \text{ кал} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

при чем 1 мо окиси углерода, соединяясь с $^1/_2$ мо кислорода, дает 1 мо углекислоты, т.-е. происходит уменьшение об'ема смеси на $^1/_2$ мо.

Сложим эти две реакции:

$$C+\frac{O_2}{2}=CO+29.430 \text{ кал}$$

$$CO+\frac{O_2}{2}=CO_2+68.220 \text{ кал}$$

$$C+O_2=CO_2+97.650 \text{ кал.}$$

т.-е. получим уравнение (1).

Итак, каким бы путем ни шло горение в угольную кислоту, ее об'ем и тепло, выделяемое реакцией окисления углерода, будет всегда одно и то же

Для понижения температуры очага горения антрацита, как мы видели выше, в зольник льют воду или применяют паровоздушное дутье (напр., подувало Кертинга).

Вода разлагается по реакции:

$$C+H_2O_{пар}=CO+H_2-28.380 \text{ кал} \quad . \quad . \quad (4),$$

или, 1 мо паров воды даст: 1 мо окиси углерода, и 1 мо водорода, т.-е. два мо, поглотив 28,38 больших калорий.

Водород горит по реакции

$$H_2+\frac{O_2}{2}=H_2O_{пар}+57.810 \text{ кал} \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

или 1 мо водорода соединяется с $^1/_2$ мо кислорода и дает 1 мо водяных паров, весом 18 грамм, выделяя 57,81 б. кал.

При расчете на жидкую воду получим

$$H_2+\frac{O_2}{2}=H_2O_{жид}+68.360 \text{ кал} \quad . \quad . \quad . \quad (6),$$

при чем скрытая теплота испарения 1 мо воды при 18°C принята 10.550 кал или $\frac{10.550\times 100}{18}=$ $=586$ б. кал/кг.

Получающийся при сухой перегонке метан (CH_4) горит по реакции

$CH_4+2O_2=CO_2+2H_2O_{пар}+192.400$ кал . . (7), без изменения об'ема.

Сера находится в каменном угле обыкновенно в виде FeS_2 — серного колчедана. Термичность реакции горения может быть вычислена на основании таких данных:

$Fe+S$	$=FeS$	$+18.800$	кал.
$FeS+S$	$=Fe_2S$	$+16.700$	„
$S+O_2$	$=SO_2$	$+69.800$	„
$Fe+O$	$=FeO$	$+66.713$	„
$FeO+SiO_2$	$=FeSiO_3$	$+10.080$	„

Откуда:

$FeS_2+2{,}5O_2+SiO_2=FeSiO_3+2SO_2+180.893$ кал. (8) или на одну молекулу (1 атом) серы 90.446 кал.

При рассмотрении генераторного процесса мы увидим, что до колосников доходит не FeS_2, а FeS которое окисляется по реакции,

$FeS+1{,}5O_2+SiO_2=FeSiO_3+SO_2+127.793$ кал. . (9)

Кроме этих реакций горения нам в будущем понадобятся еще реакции:

$CO+H_2O_{пар}$	$=CO_2+H_2$	$+10.410$ кал.	. . (10)
$CO+H_2O_{жид}$	$=CO_2+H_2$	-140 „	. (11)
CO_2+C	$=2CO$	-38.790 „	. . (12)
$C+2H_2$	$=CH_4$	$+20.870$ „	. . (13)

---

[1]) Эту реакцию мы можем прочесть и таким образом: 12 кг углерода соединяются с 32 кг кислорода и дают 44 кг углекислоты с выделением 97.650 больших калорий. Ниже все расчеты сделаны на 100 гр топлива и под «кал» подразумеваются малые калории. Впрочем можно предположить, что расчет ведется на 100 кг и считать все на большие калории или же, поставив в числах калорий вместо точки, отделяющей тысячи, запятую, считать все на граммы и большие калории.

[2]) Условно принимаем в молекуле твердого углерода 1 атом.

[3]) Мо равен 22,4 литра, или 0,0224 м³ или $\frac{1}{44{,}64}$ м³ при 0°C и 760 мм.

ГЛАВА II.

Физическая природа пламени.

Если мы осветим волшебным фонарем струю теплого воздуха, пронизывающую неподвижный холодный воздух, то, вследствие разности коэффициентов преломления того и другого, мы на экране получим увеличенное изображение струи теплого воздуха. На нем не трудно проследить, как скорость поступательного движения струи постепенно уменьшается, как струя угасает, преобразуясь в очень большое число вихревых колец. Механизм такого превращения может быть об'яснен так: движущиеся на поверхности струи частицы теплого воздуха увлекают неподвижные частицы холодного воздуха и на периферии струи получается разреженное пространство, в которое уклоняется эта смесь теплого и холодного воздуха. Таким образом, дается импульс вращательной скорости.

Чем больше скорость поступательного движения, тем больше увлекается холодного воздуха, больше разрежение, глубже вихревые кольца.

Те же вихревые кольца мы видим и при движении пламени в воздухе. Результатом вихревого движения является, с одной стороны, идеальное смешение горючих газов и воздуха в вихревых кольцах; с другой же стороны, эта смесь получает особую вихревую устойчивость, благодаря которой в каждом вихревом кольце получается устойчивый, не расслаивающийся очаг горения. При таких условиях реакция горения идет с большой быстротой, с небольшой потерей на лучеиспускание и при высокой температуре. На поверхности струи топочных газов, таким образом, получается блестящая оболочка, придающая пламени вид какой-то особой стихии.

При увеличении скорости струи возрастает и вихревая скорость; ускоряется реакция горения и поднимается температура горения. На этом основывается выгода применения дутья. Поток топочных газов представляет из себя смесь раскаленных продуктов горения углерода на колосниках, горючих газов, как продуктов сухой перегонки, сажистого углерода, как продукта разложения смол и избытка воздуха, прошедшего через колосники. Смесь этих разнородных струй поднимается из топочного пространства. В ней есть все, чтобы дать пламя высокой температуры. Не хватает только интимности смешения и устойчивости здесь и там вспыхивающей реакции горения. Цель эта достигается возбуждением в этом слоистом разнородном потоке топочных газов вихревых колец, о которых сказано выше. Для этого смесь топочных газов пропускают через узкое пламенное окно, над порогом рабочего пространства, где газам дается повышенная скорость и затем выпускают их в обширное рабочее пространство. Повышенная поступательная скорость газов в пролете превращается в скорость вихревого движения. Вихревые кольца захватывают струи раскаленной угольной кислоты, сажистого углерода, продуктов сухой перегонки, избытка воздуха, и из этой разнородной смеси создают устойчивые очаги реакции горения интимной смеси горючих газов и кислорода. По выходе из пламенного окна пламя вспыхивает блестящим ореолом.

Происходит совершенно то же явление, как в коптящей керосиновой лампе. Смоченный керосиновый фитиль горит коптящим пламенем, в котором есть все для реакции: раскаленные газы сгоревшего керосина, его пары, сажистый углерод, как продукт распада тяжелых углеводородов, и, наконец, воздух. Но все эти составные части тянутся струями кверху, не смешиваясь друг с другом. Если пропустить этот слоистый поток через узкий прорез горелки с большой скоростью и впустить в широкую полость лампового стекла— пламя вспыхивает блестящим ореолом. В различных системах ламп способы возбуждения вихревых колец различны, но результат их всегда тот же.

Вышеописанный способ сужения потока топочных газов в пламенном окне применяется очень часто. Иногда для возбуждения вихревых колец в толщу потока топочных газов вводится через широкое и тонкое сопло верхнее дутье. Теория не дает нам никакого руководства для проектирования вихревых потоков, и на практике такие устройства являются результатом повторных опытов, для которых мы не можем дать никаких руководящих указаний.

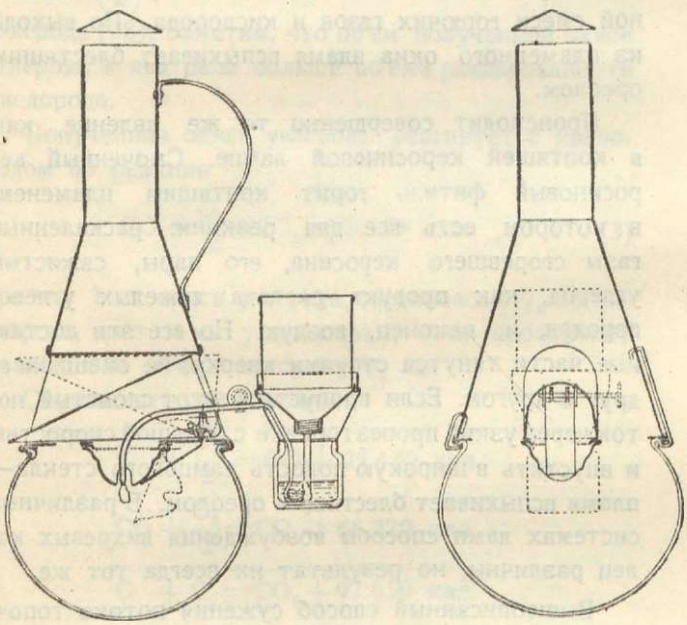
Поэтому я на практике воздерживаюсь в проектируемых мною печах от таких средств ускорения реакции горения и повышения температуры пламени, пока теоретическая механика не даст нам обоснованного руководства в этом вопросе.

Теория вихрей дает нам очень хорошее об'яснение, так называемой, н а с т и л ь н о с т и пламени в печах.

На одном из докладов инж. В. А. С л е с а р е в демонстрировал маленький электрический вентилятор.

Струя воздуха, им даваемая, затухала в воздухе в расстоянии 4-х метров. Поднеся тот же вентилятор к стене аудитории, он загасил струей, пущенной вдоль стены, спичку на расстоянии свыше десяти метров. Это явление об'ясняется так: поступательная скорость струи создает в неподвижном воздухе ряд вихревых колец, медленно движущихся в направлении струи, при все увеличивающемся их диаметре, и этим путем быстро погашается.

Если пустить струю вентилятора вдоль стены, то она даст вихри только со стороны воздуха; трение со стороны гладкой стены ничтожно. Струя плотно прижимается к стене и дальность ее полета увеличивается. Мало того, струя следует изгибам стены, не отрываясь от нее.



Фиг. 1.

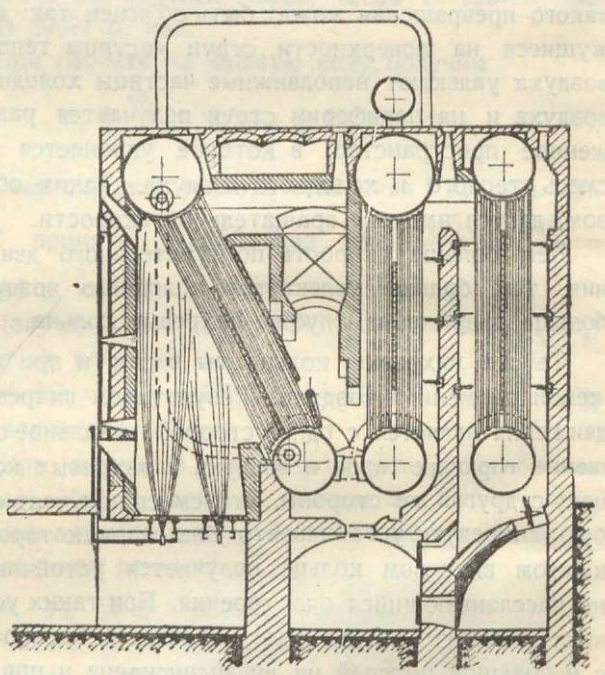
Если пустить струю под углом к стене, то угол падения не равен углу отражения. Струя не отражается от стены, а прилипает к ней, двигаясь в данном ей направлении. Струя—лижет стену.

Если пустить струю вертикально, то она, коснувшись пола, расплывается в круг весьма большого диаметра. На этом явлении основана новейшая система отопления фабричных помещений теплым воздухом, когда вертикальная струя теплого воздуха ударяет в пол и расплывается по его поверхности.

В плавильных печах ванна расплавленного металла всегда располагается в углублении пода. Чтобы согреть ее, фонтан пламени направляется на уровень ванны под углом 10—20—30°, пламя стелется по поверхности ванны и согревает металл. При описании печей мартеновского производства, мы увидим, что пролеты печи приходится делать выше уровня ванны на 600—800 мм. Не будь на стильности пламени, согреть металл было бы невозможно: пламя оторвалось бы от его поверхности, и ванна оказалась бы в мешке холодных газов.

Мы видели выше, что для ускорения реакции горения и повышения температуры пламени весьма выгодно возбудить в пламени вихревые движения. В отсутствии этих последних пламя может расслоиться, и реакция горения пойдет столь медленно, что в печи не будет получена надлежащая температура.

Рассмотрим обстоятельства, способствующие расслоению пламени. Допустим, что имеем горение



Фиг. 2.

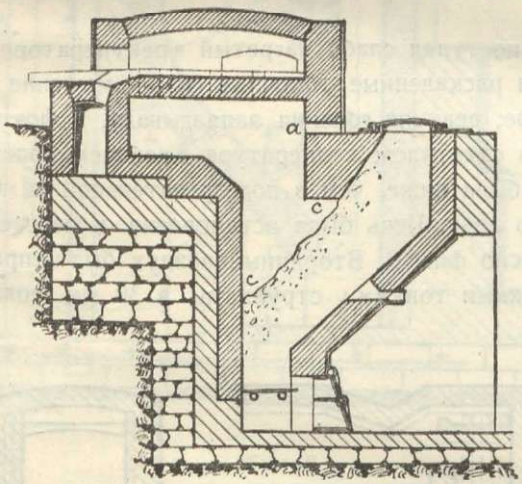
доменного газа и воздуха в кауперовском воздухонагревательном аппарате. Оба газа имеют почти один и тот же удельный вес и температуру. Сожигание происходит в громадной сожигательной камере круглого или эллиптического сечения. Несмотря на это, горение не идет спокойно, а сопровождается ритмическими толчками, результатом коих бывает даже выкидывание пламени через воздушный клапан. Такой характер указывает, что в процессе горения есть недочеты. Действительно, по исследованию А. Е. Маccoun'a [1]) оказывается, что анализируя продукты горения в сожигательной камере, мы получаем у горелки полноту горения 62,8—72%, на половине высоты 79,6 — 89,5%, и полное горение оказалось толь-

---

1) Ж. Р. М. О. 1915. II, стр. 631. «The Iron Trade Rev.» 1915, June 3, 10, 17, 24, July 1.

ко в первых рядах насадки, где содержание O_2 было равно—0,9%, CO_2—21,5—20,1%, азота—77,6—79,0%, при отсутствии CO и H_2. Так как проба дыма, взятая для прибора Орса, есть суммарная проба за известный промежуток времени, то ясно, что перед устьем трубки, собиравшей продукты горения, проходили раздельные струи воздуха и газа. Взаимодействие их в форме взрывов происходило только под куполом аппарата Каупера, раскаленные стенки которого поджигали затухшие струи газа и воздуха

Итак, в обширной сожигательной камере происходит расслаивание пламени. Причина его—неправильное направление вверх, которое дано пламени. При таком направлении пламенного потока струйка, в которой произошла реакция и которая, вследствие реакции, сильно нагрелась и сделалась легкой, тотчас покидает сопутствующие ей тяжелые струи. Поднимаясь кверху, она смешивается



Фиг. 3.

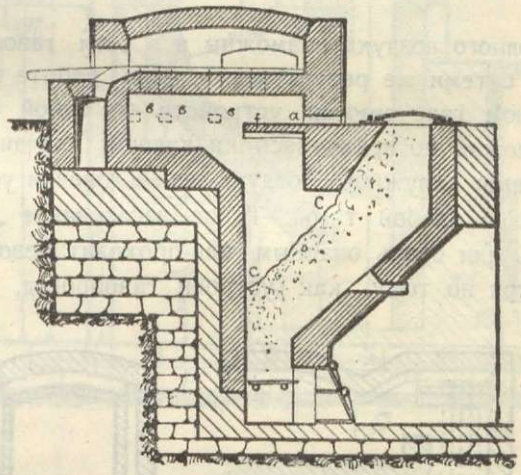
с холодными струями и очаг пламени теряется для горения. Происходит то же, что с керосиновым ночником, дающим коптящее пламя. Стоит только изменить направление пламени и пустить его сверху вниз, как коптящее пламя керосинового ночника сделается блестящим, весьма высокой температуры, пламенем лампы инж. Мышкина (фиг. 1). Об'яснение весьма просто: допустим, пламенный поток направлен вниз, раскаленная струйка, сделавшись легкой, очевидно, замедлится в своем движении книзу или даже устремится кверху, навстречу не вступившим в реакцию струям паров керосина и воздуха.

Она явится их поджигателем, тем очагом, который необходим для возможности всякого горения.

На фиг. 2 изображен котел Гарбе с форсунками на нефти, направленными вертикально кверху. Такое расположение нельзя считать правильным. Проектируя паровой котел Гарбе на пылевом топливе (см. ч. IV фиг. 104), я направил форсунки вниз, Проект этот пока не осуществлен.

В полугазовых печах раскаленные топочные газы должны быть смешаны с вторичным дополнительным воздухом, который обыкновенно в четыре раза тяжелее раскаленных топочных газов. При неправильном смешении случаи плохой работы таких печей, вследствие расслаивания пламени, весьма часты. В первый раз мне пришлось наблюдать это явление в одном из созданных мною вариантов печей кровельного производства на сучьях (фиг. 3).

Полугенераторная топка для сучьев соединялась при посредстве вертикального канала с сожигательной камерой, расположенной под подом листокатальной печи. Для сжигания газа, я проделал отверстия *a*; вначале печь нагревалась как следует; затем количество пламени стало делаться



Фиг. 4.

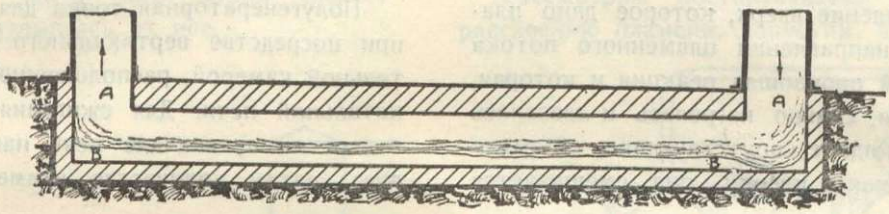
все меньше и меньше, и печь начала стынуть. По осмотре оказалось, что вся топка была заполнена мелким углем сучьев, перемешанным с золой. Об'яснение оказалось очень просто: холодный, тяжелый воздух из отверстия *a* падал вниз на поверхность сучьев *cc*, сжигал их и оставлял мелкий уголь и золу, чем в конце-концов закупорил приток воздуха из поддувала.

Печь пришлось перестроить: я сделал под отверстиями *a* сводик *f*, с которого воздух падал бы на дно сожигательной камеры (фиг. 4). Печь пошла удовлетворительно.

В следующем варианте отверстия были сделаны в боковых стенах (фиг. 4, *bb*, пунктиром). Печь тоже работала, но оказалось, что анализы газов сожигательной камеры резко менялись в зависимости от высоты взятия пробы: на поду был почти чистый воздух.

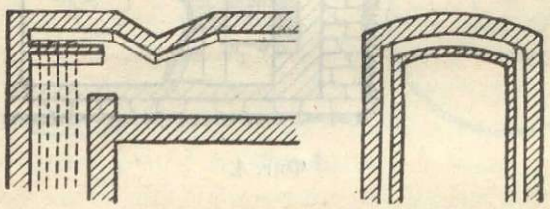
То же явление можно наблюдать при взятии газовых анализов из боровков генераторов и из газопроводов при неправильном их устройстве.

Допустим (фиг. 5), генераторный газ спущен в подземный боров *AA*. Боров большого сечения и река теплого, легкого газа не доходит до дна. На дне получается мешок холодного воздуха *BB* присутствие которого может быть причиной весьма неприятных взрывов. Для того, чтобы избавиться от взрывов, необходимо, чтобы патрубок для продувки смеси воздуха и газа при пуске генератора доходил бы почти до дна борова. Такие же мешки



Фиг. 5.

холодного воздуха возможны и в сети газопроводов, с теми же результатами. При работе на доменном газе многих устройств от одной домны возможны во время засыпки калоши случаи засасывания наружного воздуха через горелки устройства со слабой тягой. Такое засасывание может быть или очень опасным или проходит безопасно, смотря по тому, как устроен газопровод, о чем



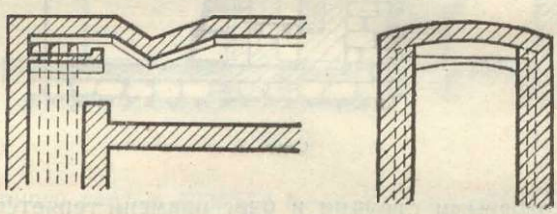
Фиг. 6.

указано ниже[1]). Для ориентировки подобных вопросов надо держать в памяти одно соображение: если газы имеют различный удельный вес, то они трудно смешиваются и располагаются по удельному весу.

Возвращаюсь к печам. В топках Боэциуса (фиг. 6) под отверстиями каналов, проводящих в топку вторичный воздух, делается сыздавна сводик, не позволяющий тяжелому слабонагретому воздуху упасть в топку; по сводику воздух проводится ближе к порогу печи, где он при падении будет подхвачен струей раскаленных топочных газов и хорошо с ними смешается. Эта конструкция испытанная и очень популярная, тем не менее в ней следует делать следующее улучшение: распределение воздуха этим сводиком неравномерно, у стен оно больше, чем в ключе; чтобы сделать его равномерным, надо выпрямить перевал, как показано на фиг. 7[1]).

Расслаивание струи топочных газов и вторичного воздуха влечет за собой: плохое их смешение, запаздывание реакции горения и низкую температуру в рабочем пространстве.

В моей практике был такой случай[2]) я дал чертеж печи для штамповки снарядов с полугазовой топкой в один из заводов Урала (фиг. 8). При ее пуске обнаружилось ясное расслоение пламени. В печь поступал слабо нагретый в рекуператоре воздух и раскаленные топочные газы; смешение было плохое; реакция горения запаздывала, и фокус горения сместился; температура в рабочем пространстве была ниже, чем в подогревательной камере в конце печи. Печь была остановлена и переделана, согласно фиг. 9. Вторичный воздух был направлен широкими тонкими струйками в 30 мм толщины



Фиг. 7.

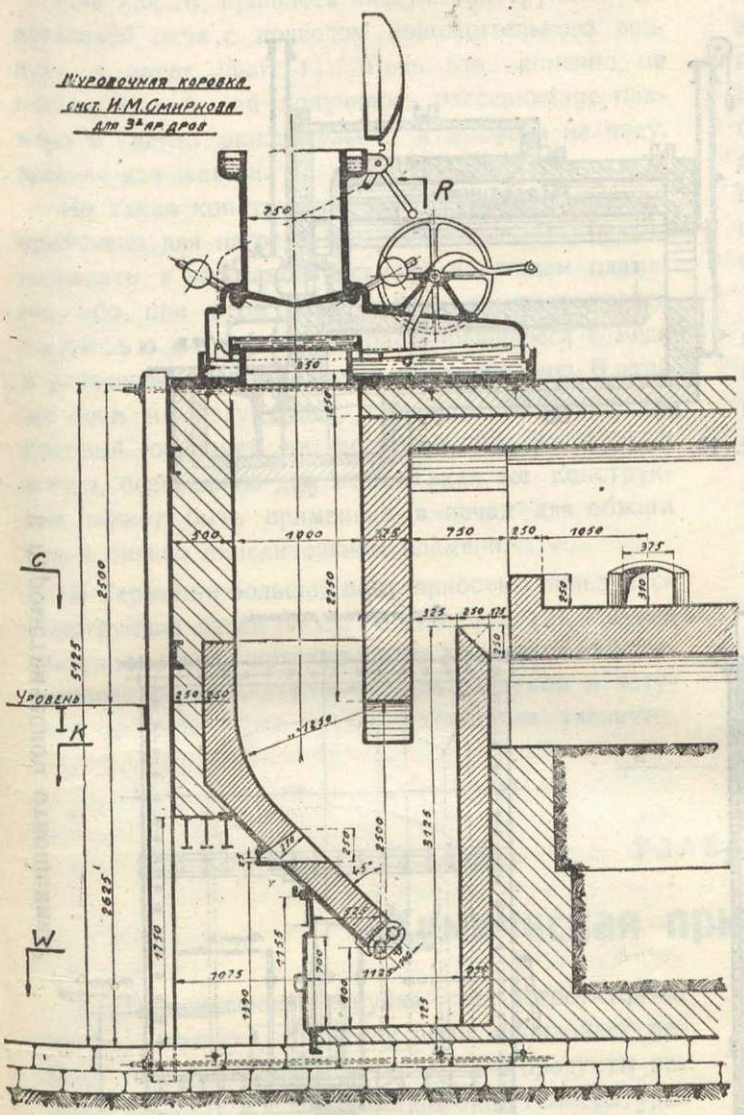
под углом в 45° к траектории топочных газов со скоростью 5 м/сек. Смешение получилось прекрасное. Фокус горения переместился в рабочее пространство и печь начала великолепно работать.

Неудача с этой печью не была для меня неожиданной. Я был совершенно подготовлен к тому, что печь может не пойти, что может произойти расслаивание пламени. В этой печи я сознательно нарушил правило подводить вторичный воздух позади топочных газов, как это обыкновенно делается, например, в топке Бишеру (фиг. 10), но расположение фиг 9, т.-е воздух впереди газа. очень упрощало конструкцию печи, и я решил по-

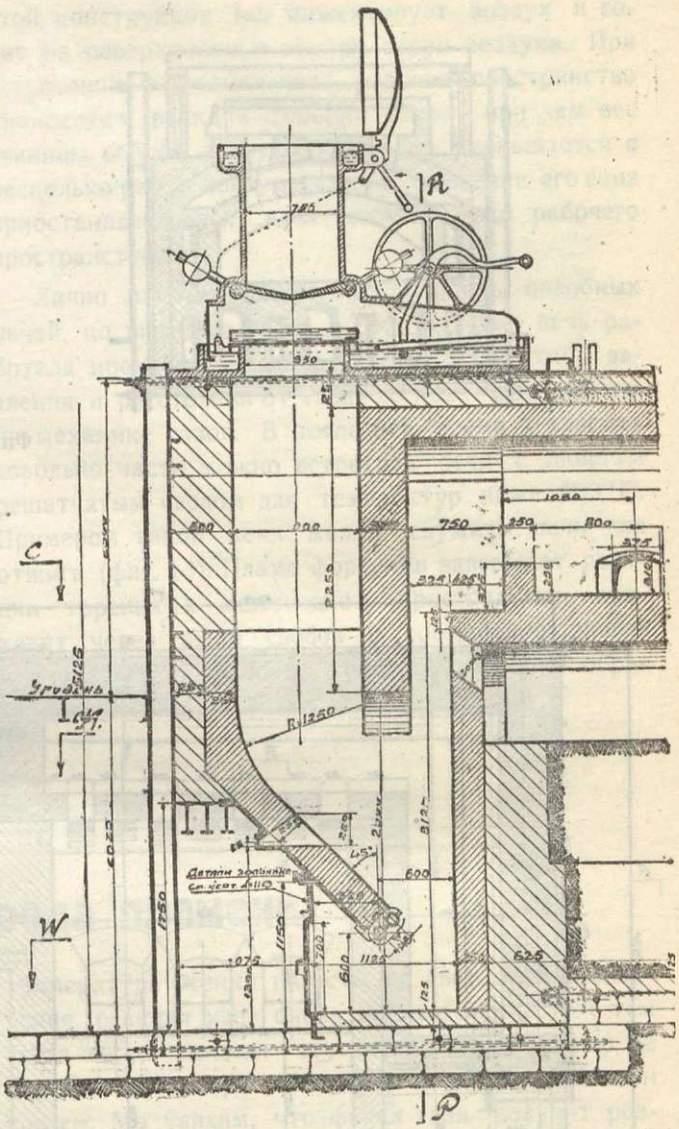
[1]) См. ч. II, стр. 53.

[1]) См. также часть IV, фиг. 13, 15, 17, 36, 37 и 38.

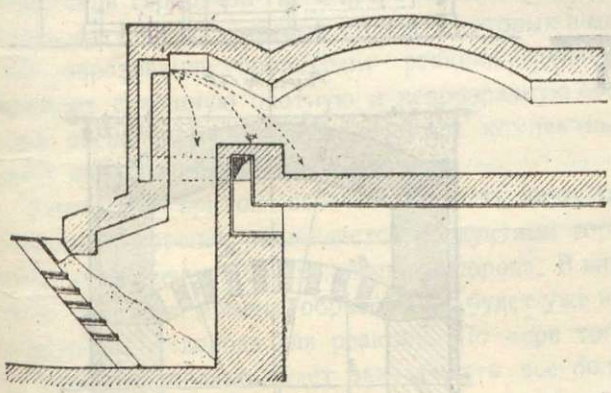
[2]) См. также часть IV, стр. 38.



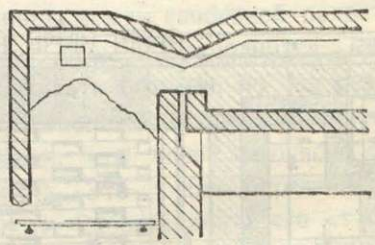
Фиг. 8.



Фиг. 9.



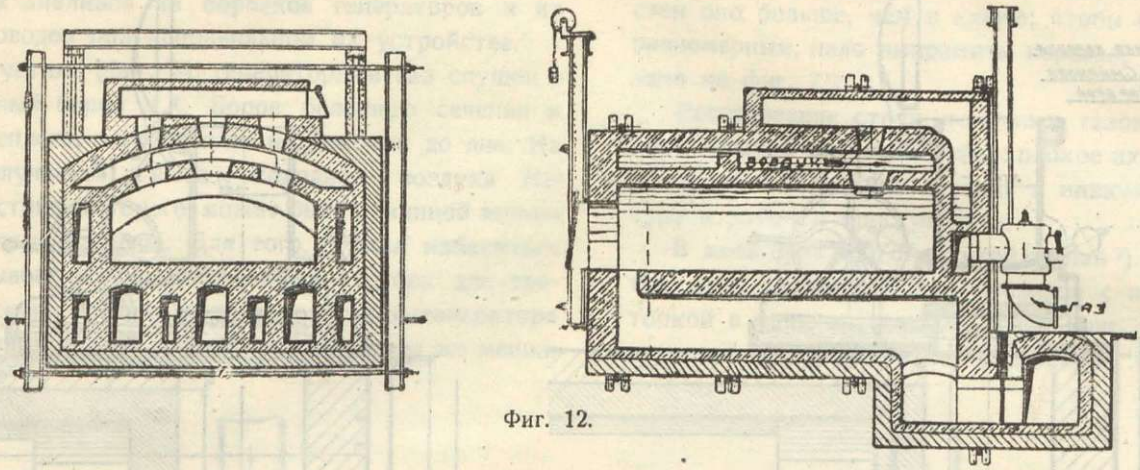
Фиг. 10.



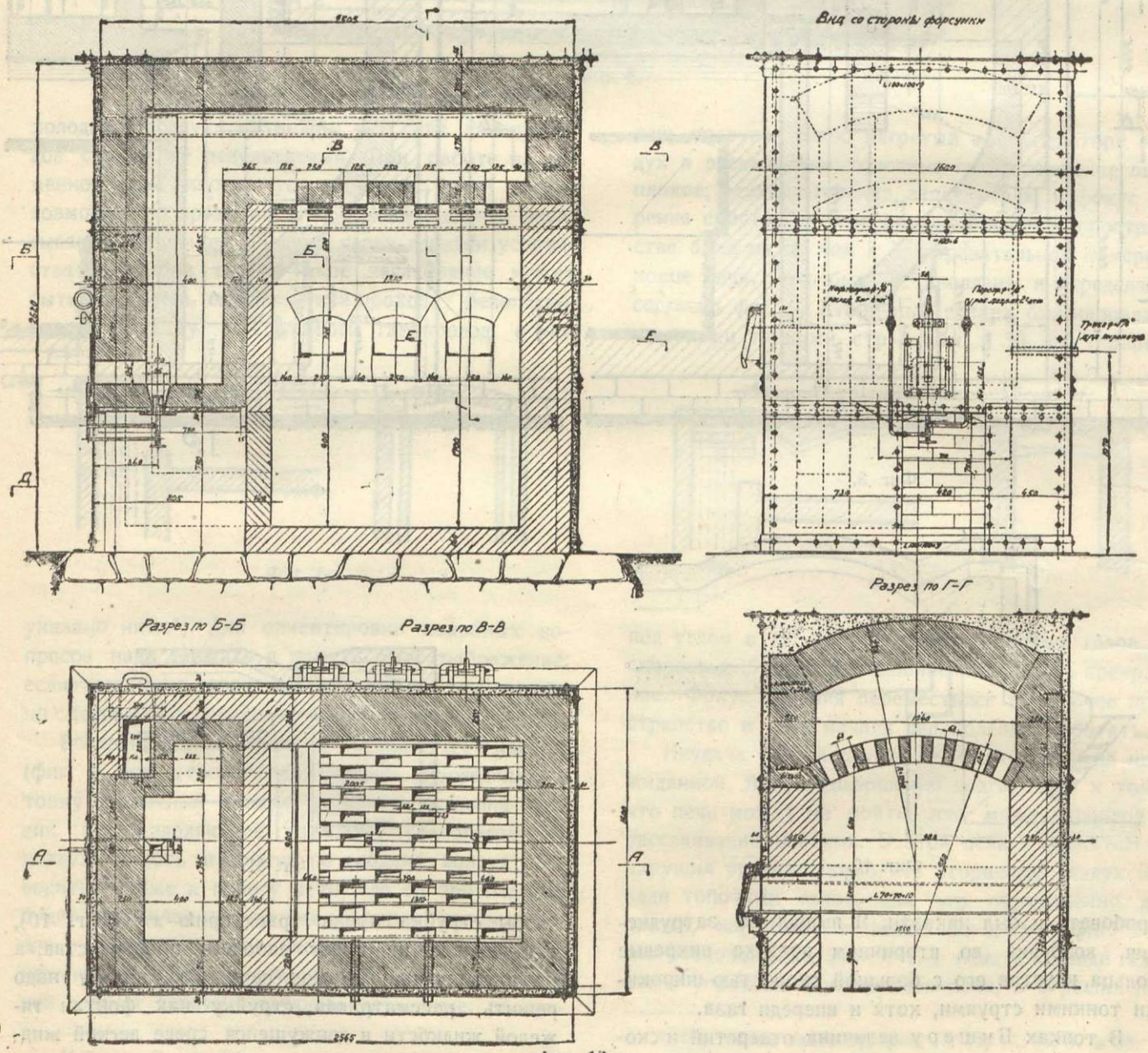
Фг. 11.

пробовать и был наказан. Я вышел из затруднения, возбудив во вторичном воздухе вихревые кольца, впустив его с большой скоростью широкими тонкими струями, хотя и впереди газа.

В топках Бишеру величина отверстий и скорость вторичного воздуха пропорционируются так, чтобы струйка имела траекторию *xx* (фиг. 10), т.-е. падала на порог рабочего пространства, а не в топку или на под печи. Эту задачу надо решить, рассматривая струйку как фонтан тяжелой жидкости в движущейся среде легкой жидкости.



Фиг. 12.



Фиг. 13.

и пирометрическом отношениях?

Мне как-то пришлось видеть конструкцию полугазовой печи с подводом дополнительного воздуха в порог (фиг. 11). Печь эта, конечно, не пошла, ибо в ней получилось расслаивание пламени и сильно окислительная атмосфера на поду, вредная для железа.

Но такая конструкция может быть с успехом применена для нагрева медных листов. Медь нельзя нагревать в восстановительном, коптящем пламени, ибо при этом поверхность ее покрывается закисью меди, жадно растворяющеюся в меди и делающею медь негодной к употреблению. В этой же печи на поду будет, конечно, слой воздуха, который образует на меди окалину из окиси меди, безвредную для меди. Такая же конструкция может быть применена в печах для обжига руд в сильно окислительном пламени.

В Германии большой популярностью пользуется конструкция печей Weardale (фиг. 12). Газ под давлением через круглые сопла пронизывает межсводовое пространство с теплым воздухом и вступает со свода через круглое отверстие увеличенного диаметра в рабочее пространство печи. При этой конструкции газ инжектирует воздух и горит на поверхности и внутри струи воздуха. При вступлении в раскаленное рабочее пространство происходит реакция горения смеси, при чем вес единицы об'ема вихревого кольца уменьшается в несколько раз, и поступательное движение его вниз приостанавливается, едва касаясь пода рабочего пространства.

Лично мне не приходилось строить подобных печей, но виденная мною в работе такая печь работала прекрасно. Подбор сечений отверстий, давления и расстояния от свода до пода—есть задача по механике газов. В последнее время в заводах довольно часто можно встретить печи с двойным решатчатым сводом для температур ниже 800° С. Примером такой печи может служить печь для отжига (фиг. 13). Пламя форсунки завершает реакции горения в межсводном пространстве, проходит через щели сводов и совершенно равномерно омывает рабочее пространство печи обращенной тягой.

ГЛАВА III.

Химическая природа пламени.

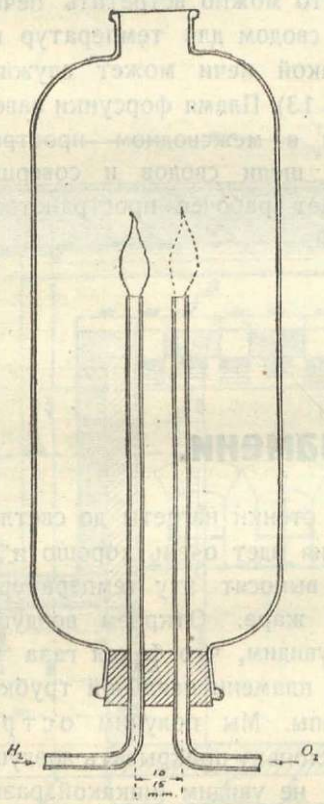
Если раскаленная струйка газа встретится со струйкой воздуха, то между ними произойдет реакция горения с выделением тепла и продукты реакции нагреваются до весьма высокой температуры. Место реакции выделяется на общем фоне газового потока в виде светлого пятна. Если газовый поток движется в свободной атмосфере воздуха, то ряд последовательных вихревых колец, в которых в момент образования происходит реакция горения, образуют сплошную плотную и непрозрачную оболочку раскаленных газов; получается компактный факел или блестящий ореол пламени.

Уменьшим приток воздуха. Полость печи, где происходит горение, заполняется продуктами горения с уменьшенным содержанием кислорода. В вихревом кольце в момент образования будет уже недостаточно кислорода для реакции. По мере того, как вихревое кольцо будет захватывать все большее и большее пространство, абсолютное количество кислорода будет увеличиваться, начавшаяся реакция горения будет продолжаться и пламя займет тем больший об'ем, чем меньший избыток воздуха мы пустили в печь.

На практике дело происходит так. Будем делать опыты над печью Сименса, когда она нагрета до температуры 1000—1100°С. При такой температуре стенки нагреты до светложелтого каления, реакция идет очень хорошо и вместе с тем глаза легко выносят эту температуру, а лицо не страдает от жара. Откроем воздушный клапан совсем. Мы увидим, что факел газа получит резкие контуры пламени паяльной трубки, или керосиновой лампы. Мы получим острое пламя. Начнем потихоньку прикрывать воздушный клапан. Вначале мы не увидим никакой разницы. Затем начнется увеличение об'ема факела и медленное потускнение резкости его контуров. Наконец, мы потеряем границу между свободной полостью печи и пламени. Вся печь им заполнится. Во всей печи начнут вспыхивать огоньки, но без резких контуров. Пламя, выполняющее печь, окажется настолько прозрачным, что через него ясно будет видна задняя стенка. Это пламя определяется русским словом «пыл». Рабочие зовут его «томильным жаром». Химический анализ печных газов, в момент появления «томильного жара» или «пыла», когда пламя в печи «как молочко»—совпадает с теоретическим расходом воздуха. На глаз не трудно установить горение с избытком кислорода воздуха в 1—2%. Это самое производительное и выгодное пламя при ведении металлургических процессов, начиная с печей термической обработки с

$t = 700—800°$ до печей Мартена. При дальнейшем уменьшении притока воздуха в печь Сименса, начнется помутнение пламени и заднюю стенку печи уже видно не будет. Вместе с тем ореол пламени переместится от газового пролета к воздушному. Здесь, в большом виде, мы увидим горение воздуха в газе, — опыт Томсена, показываемый начинающим изучать химию (фиг. 14).

Горение при уменьшенном количестве воздуха или неполное горение, сопровождается резким понижением температуры печи и выделением сажистого углерода, как продукта разложения тяжелых углеводородов.



Фиг. 14.

Появление сажи легко об'ясняется термическими данными.

Раз кислород в недостатке, то он может избрать одну из нижеследующих реакций.

1) $C + O = CO + 29.430$ кал, или на 1 ед. кислорода $+ 1.839$ кал.

2) $CO + O = CO_2 + 68.220$ кал, или на 1 ед. кислорода $+ 4.264$ кал.

3) $H_2 + O = H_2O_{пар} + 57.810$ кал, или на 1 ед. кислорода $+ 3.613$ кал.

Как видно, наименьшими термическими эффектами на единицу кислорода обладает реакция горения сажи. Поэтому вполне естественно, что в пламени невысокой температуры при недостатке воздуха, сажа, получающаяся при накаливании тяжелых углеводородов, остается несоединенной с кислородом. При температурах выше 1000° по условиям равновесия C,CO и CO_2, она немедленно исчезает.

Количество калорий, которое выделяется единицей горючего газа всегда одно и то же. Раз горение совершилось, то калории будут выделены. Но температура пламени, как следствия реакции горения, может быть существенно различна. В моей практике был такой случай. В Ленинградском Арсенале была печь у молота в кузнице. Она плохо работала и мне было поручено ее переделать. Переделанная печь давала прекрасный, ровный нагрев, но ниже того, который желательно было иметь. Все мои усилия поднять температуру еще на 50—100° не приводили ни к чему. Отоплялась печь нефтяной форсункой очень старой системы, пламя которой отличалось своеобразной особенностью: в нем иногда были видны искорки раскаленного кокса. Единственное об'яснение этого явления было таково: форсунка дает настолько крупные капельки нефти, что они, испаряясь, дают кусочки нефтяного кокса (явление которое в других форсунках не наблюдается). Тогда я повысил давление дутья с 12″ воды до 16″ воды. Печь сразу пошла хорошо, температура пламени поднялась больше, чем было необходимо.

Итак, температура пламени форсунки есть функция крупности нефтяной пыли. Крупные пылинки долго испаряются, происходит затяжка во времени реакции горения и понижение температуры горения, вследствие лучеиспускания.

Совершенно то же явление замечаем мы в пылевых топках: уголь с малым количеством летучих, слишком крупного размола, плохо высушенный, дает слишком длинную «метлу» пламени низкой температуры при увеличенном расходе пыли (вращающиеся печи для обжига цемента). Напротив того, каменный уголь с большим количеством летучих, мелкого помола и просушенный до содержания влажности в 1—2%, дает короткое пламя высокой температуры.

Интересны опыты горн. инж. Вертячих в Лысьвенском заводе. Он применял для пылевых топок горячее дутье, т.-е. облегчил процесс зажигания пыли и повел топку на пыли Егоршинского антрацита. Вне всякого сомнения, на горячем дутье можно будет работать на более крупной и более влажной пыли.

Из сказанного очевидно, что температура пламени или пирометрическое его действие есть функция скорости реакции горения. Если реакция горения идет быстро, то выделяющаяся теплота не успевает рассеяться в пространстве и пламя получается высокой температуры. Если реакция идет

медленно, то температура пламени понижается лучеиспусканием. То же происходит если реакция идет не до конца или к пламени примешиваются нейтральные, не участвующие в реакции газы.

Итак, реакция горения идет во времени. Вот пример, подтверждающий это положение.

Лица, которым приходилось работать на пламенных печах с обыкновенной топкой и высокой температурой пламени (как, например, печи пудлинговые, отражательные для переплавки чугуна сварочные и проч.) знают, что работа этих печей резко меняется при разгаре пламенного и дымового пролета. Как только площади их увеличились от разгара, так температура в рабочем пространстве понижается, а в дымовом пролете возрастает. Наконец в рабочем пространстве температура падает так низко, что печь перестает удовлетворять своему назначению, зато в дымовом пролете развивается белокалильный жар. Таким образом происходит смещение фокуса горения из центра печи к дымовому пролету. Явление это наблюдается особенно часто в печах, где вычисленная температура горения очень близка к наблюдаемой в печи и где, поэтому, пламя нельзя задерживать долгое время, а надо добиться, во чтобы то ни стало, быстрой реакции горения. Таковы перечисленные типы печей, когда они работают с простой колосниковой топкой. В таких печах пламя не задерживается в рабочем пространстве дольше секунды или частей секунды. При разгаре пламенного и дымового пролетов и увеличении их площадей при той же тяге, сопротивление печи понижается и топка начинает подавать в рабочее пространство количество газов большее, чем было прежде. Скорость пламени увеличивается, время пребывания уменьшается и реакция горения не успевает закончиться в рабочем пространстве. Оно заполняется пламенем с незаконченными реакциями, низкой томпературы, реакция же заканчивается только в борове и там развивается белокалильный жар. Сбавляя тягу, можно уменьшить приток печных газов в рабочее пространство, но перемешать газы в разгоревшем пламенном окне уже не удастся, и вновь переместить фокус горения в центр рабочего пространства, делается все более и более затруднительным. Поэтому предпочитают по мере разгара пламенного и дымового пролетов их ремонтировать и делать раз навсегда установленных, опытом выработанных размеров.

Вышеописанное явление так резко, что оно врезывается в память всех лиц, когда либо имевших дело с пудлинговыми или сварочными печами с обыкновенной топкой.

В печах Сименса и Мартена весьма часто происходит совершенно то же явление, но в столь мягкой форме, что остается непонятым и часто толкуется совершенно превратно.

В наших заводах обыденно такое явление. Новая мартеновская печь строится на определенный тоннаж, скажем 20 тонн. Затем постепенно тоннаж этот увеличивается в $1^1/_2$—2 раза. От печи требуется все большая и большая мощность. Ее начинают усиленно питать газом и воздухом. Часто переходят на дутье и вот нередко ночью можно увидеть оригинальную картину: из дымовой трубы поднимается к небу светящийся столб. Перекидные клапаны раскаляются докрасна. Особенно страдают пролеты печи. Часто применяют средство, патентованное в Германии, несмотря на всю свою логическую несообразность, а именно: в вертикальные каналы, ведущие в регенераторы, впускается атмосферный воздух, охлаждающий регенераторы. В охлаждении регенераторов ищут спасения от всех бед повышенного расхода топлива и от порчи печи. Истинная причина указанной ненормальности заключается в тесноте рабочего пространства печи. Время пребывания печных газов в полости рабочего пространства слишком мало для того, чтобы реакция горения успела вполне завершиться и чтобы в пролеты попадали бы нормальные продукты горения CO_2,N_2,H_2O и небольшой избыток O_2, как должно быть по существу дела. При малейшей перегрузке печи газом и воздухом в пролеты попадает пламя с незаконченными реакциями; пламя содержащее одновременно CO, H_2 и O_2. Иногда последние следы горючих газов пламени соединяются с содержащимся в нем кислородом в пролетах, вертикальных каналах, регенераторах, перекидных клапанах и даже в дымовой трубе. По существу явление то же, что и в пудлинговой печи. Как там, так и здесь, для завершения реакции горения в рабочем пространстве, это последнее должно иметь совершенно определенный об'ем и печные газы должны пребывать в нем совершенно определенное время. Пересыщая печь газом и воздухом, мы смещаем фокус горения в пролеты и сжигаем печь.

К сожалению, руководители мартеновских печей почти никогда не делают анализов дыма этих печей. Анализы, взятые из пролетов, могут многое рассказать заведующему цехом об искусстве управления газом и воздухом, входящем теперь всецело в компетенцию «старших» у печей, работающих без всякого руководства и часто очень плохо.

При посещении мною с партией студентов одного из заводов мы увидели перестройку группы котлов с двумя жаровыми трубами, работавших на доменном газе. Нам об'яснили, что после исследования выпарки и расхода доменного газа, расчет указал на весьма невыгодную их работу. Гарантированная фирмой выпарка котлов Гарбе была

сравнительно так велика, что затрата на перестройку котлов с двумя жаровыми трубами на котлы Гарбе окупалась в 2—3 года. Тут я встретился как-раз с тем же недостатком, над которым мне пришлось много думать в годы моей молодости, когда я служил в Н.-Салдинском заводе. У меня были котлы на доменном газе без сожигательной камеры. Несмотря на избыток воздуха, я никогда не мог добиться полного горения доменного газа в пролетах котла. В дымовом борове потухшее в пролетах пламя, вновь загоралось и нагревало боров до температуры 600—800°.

То же явление оказалось и в котлах с двумя жаровыми трубами, хотя они были снабжены специальными внешними топками для доменного газа. Я открыл «глазок» в последний пролет котла: в нем было совершенно темно, но изредка вдруг появлялись языки светло горящего пламени доменного газа. Очевидно, сожигательная камера была слишком тесна. Реакция горения в ней не кончалась и пламя с незаконченными реакциями энергично охлаждалось поверхностью котла. В нем оставались еще горючие газы и кислород, а потому время от времени реакция горения вновь осуществлялась под котлом и в дымовом пролете.

Итак, ошибка котельной установки была та же, что и в Нижней Салде, а совсем не в системе котлов. Позже мне пришлось познакомиться с котлами Гарбе на доменном газе. Отсутствие правильно устроенной сожигательной камеры вызывало то же явление, что и в котлах с жаровыми трубами: прорыв пламени в дымовой пролет и неполное горение доменного газа. К сожалению строители котлов с этим обстоятельством мало считаются.

Приведенные мною случаи практики убеждают нас в том, что реакция горения совсем не так проста, как это кажется. Меняя условия горения, мы можем добиться весьма различных результатов и заставить пламя исполнять те требования, которые мы ему поставим. Эти требования могут быть очень разнообразны: обжиг кирпича надо вести на очень мягком пламени с температурой для красного кирпича 800—1000°С, для динаса 1400—1600°С. При температуре выше 1350° стальные слитки подвергаются в печи Сименса пережогу. Печи Мартена требуют температуры не ниже 1700°С. Печи термической обработки должны работать при температуре от 600° до 1000° для прокатки жести, кровельного железа — 1000—1100°. Таким образом мы должны уметь поддерживать температуры в столь широких пределах, как 1700—600°, в обширных помещениях, каковы, например, кирпичеобжигательные печи. Большей частью в наших печах обрабатываемый материал приходит в непосредственное соприкосновение с пламенем, реже применяются муфельные печи; для печей с очень низкой температурой, например для отпуска стали употребляются печи с камерой предварительного сжигания. Пламя некоторых печей должно иметь резко окислительный характер; в других печах напротив того, весь успех производства базируется на нейтральности пламени, таковы печи для закалки, не допускающие окисления поверхности металла; печи кровельного и особенно производства черной жести, работают обязательно на бескислородном пламени.

Итак, мы должны выучиться извлекать из реакции горения целую гамму температур окислительного и нейтрального пламени, наблюдая при том, чтобы расход топлива был минимальный.

Эта задача легко достижима для человека, которому ясны физико-химические законы, управляющие реакцией горения.

Реакция, происходящая между горючим и кислородом воздуха, сопровождается выделением совершенно определенного числа калорий. Выделенное количество тепла передается большей частью продуктам горения; в меньшей же части теряется на лучеиспускание и полезную работу пламенного очага.

Понизить температуру пламени можно следующими способами:

1. Неполнотой горения, при чем часть теплоты остается в виде химической энергии CO, H_2 и сажистого углерода.

2. Введение нейтральных газов, например, паров воды. Введение избытка воздуха понижает общую температуру печных газов, но делает пламя острым, неравномерной температуры, с факелом очень высокой температуры, почему способ этот нельзя рекомендовать.

3. Затягиванием реакции горения, при чем увеличиваются потери на лучеиспускание и расход на полезную работу пламени.

Для повышения температуры горения необходимо:

1. Полное горение.

2. Горение без избытка воздуха или паров воды.

3. Горение на подогретом воздухе и газе.

4. Чем скорее при наличности вышеупомянутых факторов пройдет реакция горения, тем выше будет температура горения.

Рассмотрим способы удовлетворения этим требованиям.

1. Полнота или неполнота горения зависит, как мы видели от конструкции топки и ухода за ней, обеспечивающей наличность очага высокой температуры; при соблюдении этого условия она зави-

сит от количества газа и воздуха в газовых топках; от количества нефти и воздуха в форсунках; от количества пыли и воздуха в пылевых топках и от толщины слоя твердого горючего в топках с колосниками или без колосников.

2. Больший или меньший избыток воздуха зависит от ухода за топкой, например, при работе на шлаковой подушке избыток воздуха может быть меньшим. Пар обыкновенно является результатом влажности топлива. Только в нефтяных форсунках его вводят нарочно для распыления нефти. В антрацитовых топках то же делают для понижения температуры очага горения.

3. Предварительный подогрев газа и воздуха в регенераторах и рекуператорах есть, конечно, самый лучший и простой способ под'ема температуры пламени, но печи выходят при этом более сложной и дорогой конструкции, вот почему на практике часто строят печи, вся работа коих основана на соблюдении пункта 4,—увеличения скорости реакции горения.

4. Рассмотрение способов увеличения скорости горения приводит нас к изучению вопроса об скорости горения взрывчатых смесей.

Зависимость скорости горения от температуры.

Соединение двух приведенных в соприкосновение тел происходит не сразу. При низких температурах этому соединению препятствует значительное химическое трение.

По Ван-Гоффу реакция $H_2 + O = H_2O$ начинается при 450°C, но течет крайне медленно. Соединяется:

через	20 ч.		7%
„	40 „		11 „
„	60 „		14 „
„	80 „		16 „
„	100 „		18 „
„	120 „		20 „

О той же реакции Ле-Шателье (Le-Chatelier) говорит, что начало реакции может происходить уже при 180 °C, но и в крайне слабой степени. В 3 минуты соединились по Хелье (Hèlier):

при	180	200	240	330	430	620	825	845°C
%	0,04	0,12	1.3	9,8	39,8	84,5	96,1	взрыв.

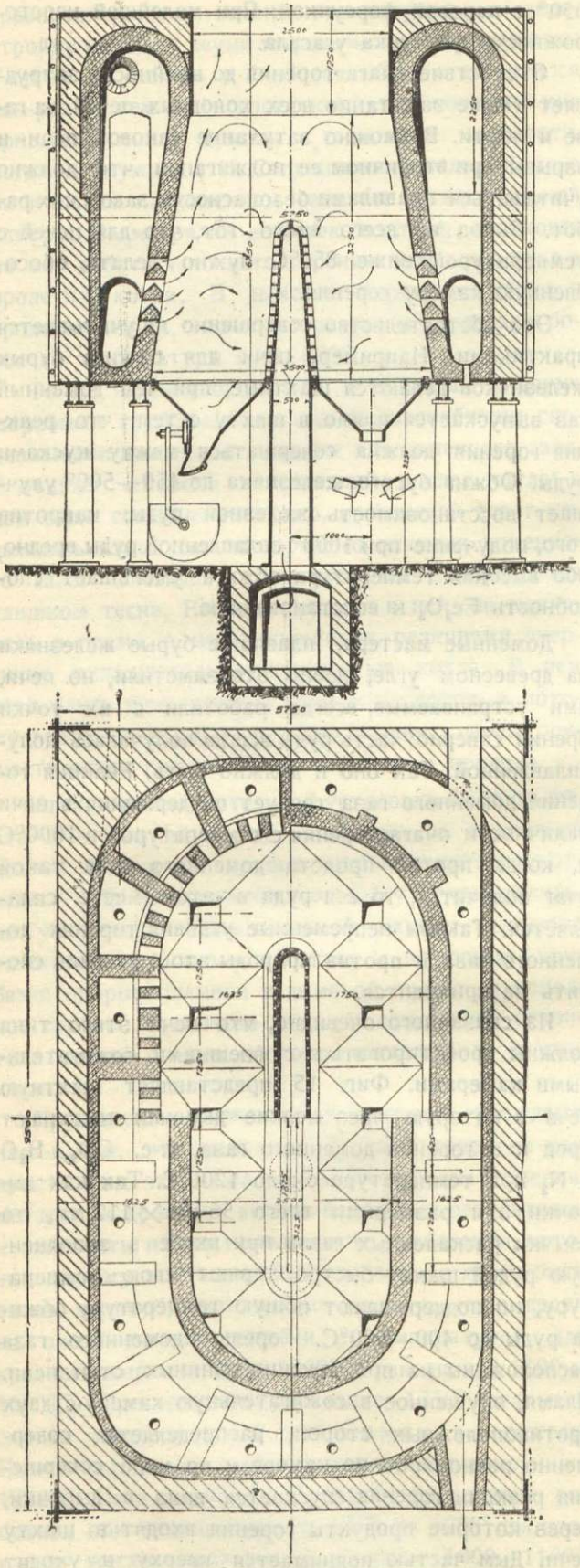
Из этого следует, что в условиях практики энергичное горение водорода возможно только при температуре очага горения в 850°C. Если такового очага нет, то реакцию горения поддерживать очень трудно. Мне пришлось как-то пускать печь для отпуска стальных снарядов с температурой 650° с паровой форсункой. При малейшей неосторожности форсунка угасала.

Отсутствие очага горения до крайности затрудняет также зажигание всех холодных печей на газе и нефти. Возможно затухание таковой печи и взрывы при вторичном ее поджигании, что должно учитываться правилами безопасности заводских работ. Вывод из всего этого тот, что для печей с температурой ниже 850°C нужно делать обособленную камеру горения.

Это обстоятельство совершенно не учитывается практиками. Например, печи для обжига бурых железняков делаются шахтные, при чем доменный газ выпускается прямо в шахту с тем, что реакция горения должна совершаться между кусками руды. Обжиг бурого железняка до 450—500° улучшает восстановимость железной руды, напротив того, получение при 1000° сплавленной руды вредно, ибо высокая температура обжига уменьшает способность Fe_2O_3 к восстановлению.

Доменные мастера, плавящие бурые железняки на древесном угле, давно это заметили, но печи, ими устраиваемые, всегда работали с их точки зрения скверно: часть руды всегда получалась полусплавленной. Так оно и должно быть. Реакция горения доменного газа требует поддержания в печи наличности очага горения с температурой в 1000°C и, когда против пролета доменного газа такой очаг получится, то вся руда в этом месте сплавляется. Таковы непременные условия горения доменного газа и против природы этого явления спорить не приходится.

Из сказанного очевидно, что печи этого типа должны проектироваться с внешними сожигательными камерами. Фиг. 15 представляет шахтную печь в которую чрез мелкие дырочки поступают продукты горения доменного газа, т.-е. CO_2, H_2O и N_2 при температуре около 1200°C. Так как дырочки эти размерами всего 56 мм × 112 мм, то язычки раскаленных газов при входе в заполненную рудой шахту быстро теряют свою температуру, но поддерживают общую температуру обжига руды до 400—500°C. Горелки доменного газа расположены на продолжении длинных стен печи. Пламя, впущенное в сожигательную камеру с двух противоположных сторон, распределяется совершенно равномерно по камере и по мере совершения реакции горения спускается вниз в дырочки, через которые продукты горения входят в шахту печи. Дым частью поднимается кверху и уходит через колошник, частью отсасывается вниз через чугунную трубу, поставленную в центре печи. Подобные же печи должны строиться и в других случаях, когда требуется обжиг невысокой температуры, например, обжиг алебастра, каустического



Фиг. 15.

магнезита и т. п. (см. ч. IV, стр. 104—106) Многие производства требуют печей с бескислородным пламенем. Таковы печи для термической обработки металлов, кровельного и жестяного производства. Практически такое горение удается при температуре в рабочем пространстве печи около 1000°C. При необходимости иметь более низкую температуру приходится мириться с некоторой потерей тепла в неутилизированных CO, H_2, или сажистом углероде.

Чем выше температура очага горения, тем скорее идет реакция горения. Однако предел увеличения скорости реакции должна положить диссоциация.

Ле-Шателье, на основании своих опытов и опытов Saint-Claire-Deville и Mallard'a дает. следующую таблицу диссоциации $CO_2 = CO + {}^1/_2 O_2$ [1]).

Давление атм. / Темпер. °C	0,001	0,1	1	10
1000	0,007	0,0013	0,0006	0,0003
1500	0,07	0,017	0,008	0,004
2000	0,40	0,08	0,04	0,03
2500	0,94	0,60	0,19	0,09

Реакция $CO_2 = CO + \frac{O_2}{2}$ идет с увеличением об'ема, а потому, согласно принципу Ле-Шателье, увеличение давления должно уменьшать диссоциацию, что подтверждается опытными данными таблицы. Для практики мы должны руководствоваться цифрами столбца 0,1 атм., или содержанием CO_2 в 10%. Из таблицы следует, что при 1000° диссоциация равна 0,13% при 1500°—1,7%, 2000°—8%, содержащейся в печных газах угле, кислоты, или соответственно 0,013%, 0,17% и 0,8% всех дымовых газов.

Диссоциация паров воды видна из следующих данных Nernst и Wartenberg (при атмосферном давлении):

1027°	0,000027
1124	0,000078
1207	0,000189
1227	0,000197
1288	0,00034
1882	0,0118
1974	0,0177

Реакция происходит с увеличением об'ема и, следовательно диссоциация с увеличением давления уменьшается.

---

1) Intred. de la Mét. H. Le-Chatelier, p. 83.

Из приведенных данных вполне очевидно, что в пламенных печах количественное значение диссоциации весьма мало. При температуре мартеновской печи этим путем будет недополучено тепла всего 3—4%. Но из этого вовсе не следует, что явление диссоциации можно игнорировать, напротив, работа мартеновской печи возможна только благодаря диссоциации и роль ее в процессе горения в регенеративной печи делается для нас ясной, если мы примем в расчет, что хороший генераторный газ, нагретый в регенераторах до 1100°С, при горении с $1^1/_2$ расходом воздуха при температуре 1100°С, дает вычисленную температуру горения от 2000 до 2300°С. Между тем динас перерожденный в тридимит, плавится при температуре 1750°С. Отсюда совершенно ясно, что использование до конца принципа регенерации тепла делается только потому возможным, что в реакции горения генераторного газа происходит спасительное для динаса замедление. Практика вполне подтверждает это соображение. По словам профессора А. А. Байкова, он никогда не определял температуру факела пламени по пирометру Ферри выше 1850°С[1]),—обыкновенно она ниже. Элементом задерживающим реакцию горения в мартеновской печи, является диссоциация и это понятно. Раз реакция осуществляется при начале распадения продукта реакции, то естественно, что такая реакция не может итти моментально.

И действительно, практика указывает на продолжительность этой реакции в $1^1/_2$—$2^1/_2$ секунды. Если выдерживать пламя в рабочем пространстве мартеновской печи меньшее время, то мы получим все явления, описанные на стр. 13.

На своих лекциях по мартеновскому производству я настаиваю на полном использовании тепла печных газов в регенераторах. Американская мода ставить у печей Мартена паровые котлы с моей точки зрения не заслуживает подражания. Для полной утилизации теряющегося тепла мартеновской печи нужны регенераторы не менее 6 м³ на тонну садки для каждой пары. Этот вопрос весьма часто дебатировался среди знакомых техников и он действительно того заслуживает. Мне ставились следующие возражения против таких больших регенераторов:

1. На сильно подогретом газе и воздухе температура пламени печи поднимается выше пределов плавления динаса и печь очень скоро изнашивается. В пример приводили печь, где время пребывания печных газов в рабочем пространстве было менее 1,4 секунды и пролеты коей спасли, впуская в регенераторы холодный воздух (стр. 13). Я посоветовал прежде всего увеличить рабочее пространство на тонну садки и тем обеспечить полноту горения в рабочем пространстве, а потом рассуждать о температуре пламени и влиянии подогрева газа и воздуха.

2. Более основательным казалось утверждение, что в регенераторах большой емкости разность между температурой печных газов и подогреваемых воздуха и газа незначительна и, потому, температура кладки регенератора поднимается тем выше, чем больше емкость регенераторов. Динас, насыщенный пылью теряет свою огнеупорность и решетки должны быть неминуемо сплавлены. Однако это оказалось не верно. Мы увидим ниже, что совершенно черный, пропитанный насквозь закисью железа, динас, содержащий 14,8% FeO, не плавится в горне Зевштрема при 1710°С, так как тридимит не растворим в железистом стекле.

Итак для полной утилизации тепла печных газов в регенераторах мартеновской печи нет препятствий. На нашу долю выпадает обязанность получить в рабочем пространстве пламя с температурой около 1750° и по возможности не выше этого.

---

[1]) Вообще об измерении температуры рабочего пространства надо сказать, что пока нет способа, дающего верные результаты. Все способы измерения температуры газов основаны на исследовании нагретых в данном пространстве тел (оптическим пирометром мы исследуем нагретые частички углерода). А раз это так, то вполне ясно, что результаты будут всегда или преуменьшены или преувеличены. В самом деле. Пусть имеем, например, подсводовое пространство регенератора печи. Будем измерять его температуру, хотя бы пирометром Le-Chatelier, в то время, когда через регенератор проходит нагревающийся воздух. В это время стенки и свод регенератора нагреты до температуры высшей, чем воздух; они будут лучеиспускать и трубка пирометра получит тепла больше, чем ей следовало бы получить одной конвекцией газов. Мы получим преувеличенные результаты. Когда мы перекинем клапана и через регенератор пойдут продукты горения, то очевидно результаты изменятся. Пирометр прогреется скорее, чем стенки регенератора и начнет лучеиспускать в сторону стенок. Очевидно результаты будут преуменьшены и мы так и не узнаем температуры газов. Далее, предположим, что при измерении температуры рабочего пространства какое-либо нагревательной печи мы пользовались пирометром в железной трубке, а потом ее заменили кварцевой. Очевидно, что результаты будут несравнимы, ибо коэффициенты лучеиспускания для железа и кварца различны. (См. стр. 20).

Чтобы обойти лучеиспускание, проф. И. А. Соколов, будучи еще студентом, по моему предложению, при исследовании Алапаевских мартеновских печей, пробивал в своде регенератора отверстие и вставлял в него газовую трубку, большего диаметра, чем кожух термопары. Газы проходили через трубку в щель между термопарой и трубкой и нагревали то и другое до одинаковой температуры. Очевидно, что в этом случае влияние лучеиспускания должно быть почти равно нулю. Результаты таких измерений получались весьма приличные.

Начало диссоциации CO_2 и H_2O, т.-е. нерасположение CO и H_2 к быстрой реакции с O_2, облегчает нам задачу. Если мы будем избегать острого пламени, для чего будем сбавлять до возможного минимума избыток кислорода воздуха, (согласно стр. 11), то задача будет решена и печь будет работать совершенно исправно. Разница между печами с большими регенераторами и с малыми выразится в следующем: об'ем пламени в печи с сильно подогретым газом и воздухом будет больше об'ема пламени при слабо подогретых газе и воздухе; а так как хвосты пламени не должны касаться пролетов печи, то количество газа и воздуха, которое мы должны впускать в печь в этом случае, должно быть меньше, чем в том случае когда газ и воздух плохо подогреты. Таким путем мы заставим печные газы пробыть большее время в рабочем пространстве печи и будем иметь большее время для использования излишней теплоты пламени, которую мы сообщили ему, дав больший нагрев газу и воздуху.

Совершенно очевидно, что увеличение емкости регенераторов не повысит температуры печи вопреки нашему желанию. Но оно сократит расход горючего в единицу времени, а при умелой работе с печью и на единицу выплавленного металла.

Было бы совсем другое дело, если бы температура мартеновской печи была очень далека от начала диссоциации CO_2 и H_2O. Сильный подогрев газа и воздуха способствовал бы быстрой реакции горения и об'ем факела пламени уменьшился. Его температура была бы очень близка к вычисленной в 2000—2300°C и работать с ним, имея печь из динаса было бы очень затруднительно.

Печи для нагрева слитков не должны иметь пламени температурой выше 1350—1400°C при которой плавится покрывающая поверхность слитков окалина. Если для нагрева слитков мы применим печи Сименса, то при полной утилизации теплоты печных газов в регенераторах мы сможем нагреть газ и воздух примерно до 800°C, а вычисленная температура пламени будет при $1^1/_2$ об'еме воздуха около 1800—2000°C. Можно ли будет работать на такой печи без риска пережечь слитки и таким образом испортить весь материал? Ответ на это даст нижеизложенное.

Зависимость скорости реакции горения от избытка реагирующих газов.

Выше мы видели, что поверхность движущегося потока печных газов покрыта вихревыми кольцами из смеси движущегося газа и газа среды, окружающей поток. Если печь работает с большим избытком воздуха, то в вихревые кольца сразу попадает количество воздуха достаточное для реакции горения. Если же среда бедна свободным кислородом воздуха, то в кольца кислород поступает мало-помалу.

Как идет реакция горения в этом случае?

У Ле-Шателье мы находим нижеследующие данные для горение смеси водорода и воздуха при различных взаимных отношениях реагирующих газов.

На 100 об'емов воздуха об'емов водорода.	10	20	30	40	50	60	70
Скорость горения смеси в м/сек	0,60	1,95	3,30	4,87	3,45	2,30	1,10

Максимум скорости соответствует 40% водорода, когда отношение об'ема водорода и кислорода приблизительно равно двум. Для скоростей горения метана имеем следующую таблицу:

На 100 об'емов воздуха об'емов метана.	6	8	10	12	14	16
Скорость горения смеси в м/сек.	0,03	0,23	0,42	0,61	0,36	0,10

Теоретическая смесь должна содержать метана ~10,5 об'емов на 100 об'емов воздуха.

Итак, когда поток топочных газов, несущий CO, H_2 и CH_4, вступает в рабочее пространство, в котором мало свободного кислорода, то, во-первых, смесь горючих газов и достаточного количества кислорода воздуха получается не сразу; кольца получают значительный об'ем раньше, чем нужное количество кислорода воздуха будет в них увлечено; во-вторых, реакция горения в кольцах идет в это время с малой скоростью, так как к массе газов примешивается весьма много продуктов горения выполняющих рабочее пространство, т.-е. газов совершенно посторонних реакций. Об их влиянии можно судить по следующим данным.

Смесь воздуха с водородом не воспламеняется при содержании

H_2	меньше	10%	и	больше	70%	смеси
CO	„	16 „	„	„	75 „	„
CH_4	„	6 „	„	„	16 „	„

или, иначе говоря, не взрывает смесь из:

70,0% H_2, 6,3 % O_2, 23,7 % N_2 и
10,0 „ H_2, 18,9 „ O_2, 71,1 „ N_2;
75,0% CO, 5,25% O_2, 19,75% N_2 и
16,0 „ CO, 17,64 „ O_2, 66,36 „ N_2;
16,0% CH_4, 17,64% O_2, 66,36% N_2 и
6 „ CH_4, 19,74 „ O_2 74,26 „ N_2.

Избыток одной из составных частей реакции делает взрыв невозможным, т.-е. обусловливает только весьма медленный темп реакции при очень благоприятных условиях ее протекания.

Итак, лабораторные исследования горения вполне подтверждают наш второй пункт и об'ясняют нам почему остатки горючих газов в пламени так долго не соединяются между собой.

Указанные причины действуют в одну сторону и вот почему простым уменьшением притока воздуха в рабочее пространство, нам удается его заполнить пламенем пониженной температуры, не только не уменьшив его нагревательную способность, но даже подняв его работоспособность уменьшением балласта избытка воздуха. Искусство «варовщиков» при печах для подогрева слитков, «обжигал» при печах для обжига кирпича, фарфора и проч. имеет своим основанием умение установить и поддерживать такое горение.

В моей практике был такой случай. В Алапаевском заводе динас обжигался в печах с обыкновенной дровяной топкой, с обращенной тягой, весьма плохо. Печь была недурна, но шуровщики не умели ею управлять. Кирпич обжигался «острым» пламенем при избытке воздуха со всеми последствиями такого обращения с кирпичом: часть кирпича была оплавлена (в рубашке), часть раздута, часть весьма плохо обожжена. Я позвал техника, заведывающего фабрикой и об'яснил ему причину плохой работы его печи. Затем велел ему смотреть через глазок в печь и начал опускать тягу, устанавливая положительное давление в печи; после этого принялся за регулировку притока воздуха через поддувало. Печь была на полном ходу и я очень быстро установил в ее полости горение с теоретическим количеством воздуха. Факел с резко очерченными контурами начал расплываться все шире и шире, наконец исчез и вся печь заполнилась пылом, в котором там и сям вспыхивали огоньки. Задняя стенка печи была ясно видна. Продержав печь так некоторое время, я нарочно еще убавил приток воздуха в поддувало. Пламя в печи сделалось мутным. Задняя стенка исчезла. Прибавив воздуха я добился опять горения с теоретическим количеством воздуха, и приказал держать печь при таком режиме. К вечеру оказалось, что печь начала быстро нагреваться. Конуса Зегера начали падать один за другим и посадка кирпича оказалась хорошо обожженной. Мой техник был человеком очень способным и одного урока оказалось достаточно, чтобы ремесло управления печью им было усвоено. Качество кирпича резко изменилось и случилось то, что всегда случается на заводах: моего ученика переманили через два года на соседний завод на повышенный оклад жалования.

Теперь читатель уже сам может ответить на поставленный на стр. 18 вопрос, можно ли нагревать в печи Сименса с полной утилизацией теряющегося жара, и с вычисленной температурой горения в 2000°С — стальные слитки, которые не выносят соприкосновения с ними пламени выше 1350—1400°С.

Очевидно можно. Но очень вероятно, что избыток воздуха, который придется держать в полости печи будет не 50% нужного для горения воздуха, а гораздо меньше. От этого печь ничего не проиграет. Напротив того, работоспособность пламени будет еще больше, ибо с'экономится теплота, нужная для нагрева избытка воздуха.

Молодым инженером я присутствовал при разговоре, когда старого практика спрашивали, как ему понравился вновь назначенный в соседний завод управитель. Он очень лестно отозвался о его образованности и учености, но... «я был с ним в заводе», — сказал он, — «он смотрит в печь, а в печи ничего не видит».

Эта насмешка старого практика над ученым невеждой, каким себя сознавал и я, меня преследовала много лет. Она вероятно будет преследовать моих молодых читателей и поэтому я остановлюсь на ней подольше.

В самом деле, посмотрите на работу старшого у мартеновской печи, варовщика у печи для нагрева слитков, обжигалы у печи для обжига керамических изделий. Время от времени он подходит к глазку печи, открывает заслонку, смотрит в печь, прибавляет и убавляет газа, воздуха и тяги. При печи с обыкновенной топкой прибавляет горючего, чистит колосники, меняет количество воздуха, поступающего в поддувала, опять посмотрит в печь и не находит себе ни минуты покоя в момент работы печи, когда под'ем ее температуры подходит к апогею.

На что он смотрит? Что видит? Он добивается максимума полезной отдачи печи; дает печи максимум тепла и заботится о том, чтобы не сжечь печь и не испортить нагреваемый материал. Ответственность этого периода для старшого у мартеновской печи видна из сопоставления двух температур: температура выпускаемого литого железа 1600° С и плавления динаса 1750° С. Медлить с

готовой ванной железа нельзя. Надо смело поднять его температуру до нужного предела и выпустить в ковш. При медленной работе печь страдает больше, чем при смелой уверенной работе. Надо дать в это время печи максимум газа и воздуха, который она может безопасно для себя принять.

Вот три основных правила управления мартеновской печью, которыми руководствуется старшой, управляя клапанами:

1. Давление. Что бы мы ни делали с печью, сколько бы мы ни давали газа и воздуха, давление в рабочем пространстве мартеновской печи должно быть атмосферное. Его надо регулировать так, чтобы под заслонку рабочего окна, с нижнего ее края, наблюдалось бы всасывание наружного воздуха, а через верхний ее край выделялся ореол печных газов.

Тронув воздушный и газовый клапан, мы непременно должны изменить и положение заслонки в дымовой трубе. К моему удивлению этого правила не знали в одном из лучших заводов Германии.

Инженер, посланный для пуска вновь выстроенного миксера-форфришера, выяснил, что неудовлетворительная работа на нем местного персонала между прочим зависит от неуменья установить и управлять давлением печи.

2. Количество газа должно быть таково, чтобы в пролеты не попадали хвосты пламени, т.-е. пламя с неоконченными реакциями, содержащее CO, H_2 и O_2, что, как увидим ниже, чрезвычайно опасно для целости пролетов.

3. Количество воздуха должно регулироваться так, чтобы печь была полна прозрачным пламенем. Пламя непрозрачно при избытке кислорода, когда оно очерчено резкими контурами; это — острое пламя. Пламя непрозрачно, мутно, при недостатке воздуха, вследствие своей сажистости. Реакция горения должна итти во всей печи, а не напоминать работу паяльной трубки.

Управление мартеновской печью отличается исключительной трудностью, вследствие сравнительной легкоплавкости динаса.

Управление прочими печами чрезвычайно просто. Чисто физические трудности представляет работа на колодцах для нагрева слитков, ибо приходится смотреть в печь сверху вниз, что конечно очень неудобно.

Всякий молодой инженер, сам лично берущий пробы и делающий анализы продуктов горения печей прибором Орса, чрезвычайно скоро научится искусству «видеть» в печи. Это избавит его от рабской зависимости от подчиненных ему старших, плавильщиков, варовщиков и т. п. и даст возможность установить в цехе правильную оценку искусства их работы. В настоящее время персонал у печей мало удовлетворителен. Свои неудачи плавильщики всегда сваливают на качество динаса. Между тем корень зла лежит обыкновенно в неуменьи работать «мягким пылом», взамен «острого» огня с одной стороны и на пламени с незаконченными реакциями—с другой.

Влияние на реакции горения катализаторов и охлаждающих поверхностей.

Что соприкосновение пламени с различными веществами имеет влияние на скорость реакции горения, видно из нижеследующего опыта проф. А. А. Байкова. Введем в пламя обыкновенной бунзеновской горелки голую термопару. Наблюдаемая температура 1390° С. Введем в ту же горелку термопару в кварцевой оболочке—получим 1133° С. На той же горелке станем нагревать платиновый тигель, получим на 200—400° температуру выше, чем в тигле фарфоровом.

Колпачки Ауера в наших лампах делаются из окиси тория (ThO_2) и церия (CeO_2). Они дают очень яркий свет, т.-е. накаливаются до очень высокой температуры; другие окиси дают свет тусклый. Ле-Шателье заметил, что реакция $H_2 + O$ идет в новой неупотребленной посуде при температуре более низкой, чем в посуде старой. Температура воспламенения различна для посуды кварцевой, фарфоровой и покрытой серебром. Согласно работе Wilfrid Ernest Slater степень разложения CH_4 при 900—1000° различна в зависимости от материала стенок. Исследовалось влияние фарфоровой трубки, SiO_2, MgO, CaO, древесного угля, Fe, графита, карборунда и Cu. Скорость разложения CH_4 оказалась весьма различной. Работы проф. W. Bone над беспламенным горением указывают на увеличение скорости горения в соприкосновении с кусками раскаленного шамота. К сожалению, до сих пор мне не удалось найти данных для вычисления скорости реакции горения в этих условиях.

Вышеописанные лабораторные опыты указывают нам, что не лишено вероятности предположение, что реакция горения в соприкосновении раскаленных стенок печи идет лучше, чем вне такого соприкосновения, но опытов и наблюдений, подтверждающих такую гипотезу, мне не известно. Я возвращусь еще к этому вопросу ниже при рассмотрении конструкции наивыгоднейшей сожигательной камеры, теперь же напомню один факт об влиянии газообразных катализаторов. Смесь $(CO + O)$, высушенная над P_2O_5 не взрывает ни при каких условиях. Достаточно ввести ничтожное количество водяных паров, чтобы сделать ее взры-

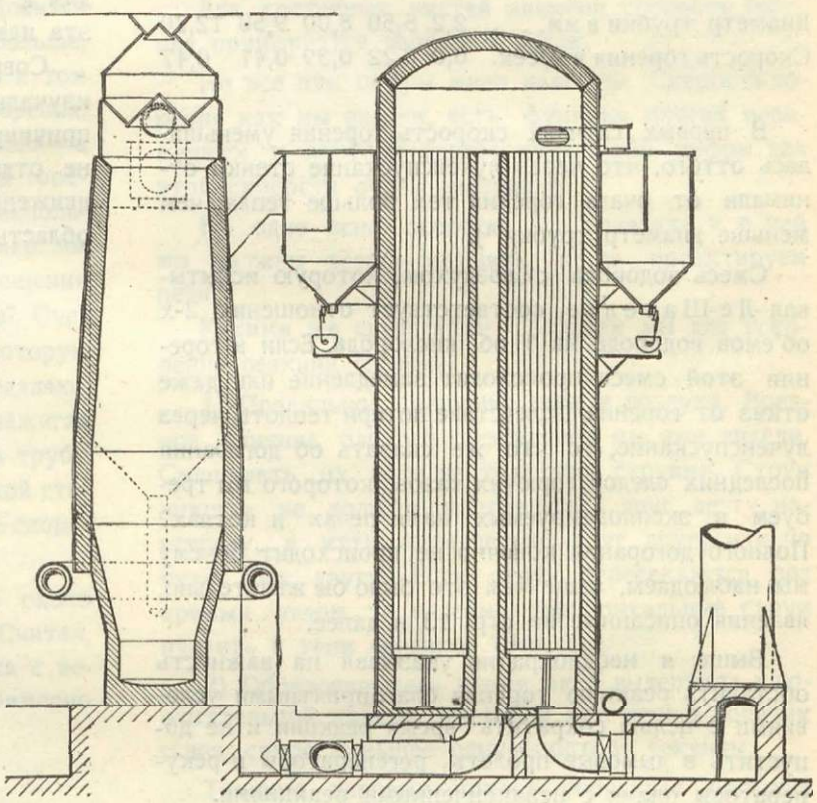
ваемой. Роль водяных паров, как катализатора, нам совершенно не ясна, и ни имеет общего с губчатой платиной, которая, сгущая на своей поверхности 250 об'емов кислорода, способствует реакции горения водорода (весьма вероятно, что огнеупорные стенки печей играют подобную роль в процессе горения). Наблюдения, сделанные в некоторых заводах, указывают, повидимому, на водяные пары, как катализатор для реакции Бэля $2CO = C + CO_2$. Повидимому влажность генераторного газа является причиной того, что подземные борова для генераторного газа забиваются сажей. На заводе Феникс избавились от нее, пустив генераторы на перегретом паре.

Ле-Шателье указывает на случаи замедления реакции горения: сухая смесь кислорода и рудничного газа взрывает при 650° С через десять секунд, при 1000°—через секунду. Это можно об'яснить медленным окислением CH_4, с получением ничтожного количества паров воды, являющихся катализатором и вызывающих взрыв.

Эти лабораторные опыты указывают нам на весьма малое знакомство наше с реакцией горения. Очевидно механизм этих реакций весьма сложен и нам сейчас совершенно неясен. Изучение его может нам открыть совершенно новые возможности, о которых мы сейчас не подозреваем.

Интересен опыт Ле-Шателье с раскаленным железным тиглем, бросаемым в сухую смесь рудничного газа и воздуха. Если бросить тигель в эту смесь отверстием кверху, то взрыв не происходит; бросив же его отверстием книзу, мы получаем взрыв. Об'яснение просто: очевидно, у стенок тигля получаются следы паров воды; в обращенном донышком кверху тигле они скапливаются в его полости и производят взрыв. На стр. 6 отмечалось потухание пламени в сожигательной камере кауперовских аппаратов, вследствие того что очаг горения не имеет устойчивости. Совершенно очевидно, что сожигательная камера устроена в кауперовских аппаратах по типу тигля, обращенного отверстием кверху; продукты горения рассеиваются в громадном об'еме и реакция затухает. Она кончается под куполом (см. стр. 6, работа Maccoun'a), представляющем тигль, обращенный донышком кверху. Здесь реакция горения заканчивается, смесь сразу увеличивается в об'еме и дает толчок, коим часть газов выталкивается через воздушный клапан наружу. Получается характерное пульсирующее горение аппаратов Каупера при количестве воздуха, близком к теоретическому.

Всякая правильно устроенная сожигательная камера должна представлять мешок горячих газов. Горячая струйка начавшейся реакции горения должна улавливаться сожигательной камерой, поднимать ее температуру и способствовать образованию мощного очага горения. Раскаленные своды и стенки сожигательной камеры как мешка горячих газов, принимают деятельное участие в реакции в качестве катализаторов. Лучшей сожигательной камерой для воздухонагревателя Каупера является подкупольное пространство, а цилиндрическая часть аппарата должны быть заполнена решеткой. Правильно спроектированный аппарат для нагрева воздуха должен быть устроен по типу фиг. 16.



Фиг. 16.

В отличие от обычной конструкции Каупера этот аппарат не имеет сожигательной камеры в виде колодца; газ и воздух для горения поступают через горелку прямо в подкупольное пространство, где и происходит горение. Вся полость аппарата заполнена решеткой кроме оси, по которой проведена труба для отвода нагретого в аппарате воздуха. Воздушная труба занимает меньший об'ем чем прежняя центральная камера, а потому, при том же об'еме насадки, аппарат выйдет значительно меньше и дешевле.

В главе о катализаторах уместно упомянуть о, так сказать, антикатализаторах. В реакциях горения таковыми являются холодные стенки.

Ле-Шателье испытывал горение смеси 30% H_2 и 70% воздуха в трубках различного диаметра. При диаметре трубки 0,25 мм горение не идет совсем;

при диаметре 0,9 мм скорость горения 1,72 м/сек.
" " 3 " " " 3,0 "
" " 6 " " " 3,25 "
" " 10 " " " 3,5 "

Для смеси 10,4% CH_4 + 89,6% воздуха исследования дали:

Диаметр трубки в мм. . .	2,2	5,50	8,00	9,50	12,20
Скорость горения в м/сек.	0,0	0,22	0,39	0,41	0,47

В первых случаях скорость горения уменьшалась оттого, что через лучеиспускание стенки отнимали от очага горения тем больше тепла, чем меньше диаметр трубки [1]).

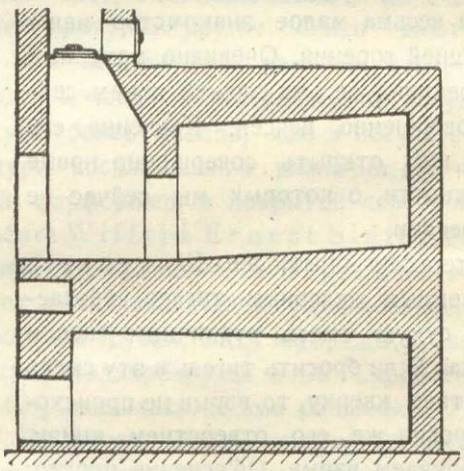
Смесь водорода с воздухом, которую испытывал Ле-Шателье, соответствует отношению 2-х об'емов водорода на 1 об. кислорода. Если в горении этой смеси происходит замедление или даже отказ от горения, вследствие потери теплоты через лучеиспускание, то что же сказать об догорании последних следов горючих газов, которого мы требуем в эксплоатируемых нами печах и котлах? Полного догорания конечно не происходит, почему мы наблюдаем, чаще чем это было бы желательно, явления описанные на стр. 13 и далее.

Выше я неоднократно указывал на важность обставить реакцию горения благоприятными условиями с целью сократить время реакции и не допустить в дымовые пролеты, регенераторы и рекуператоры пламя с незаконченными реакциями.

Рассмотрим вопрос, какую форму должно иметь рабочее пространство, чтобы удовлетворять этому условию? Совершенно очевидно, что требования для рабочего пространства и сожигательной камеры одни и те же. Следовательно и конструкция их должна быть одинакова. Итак, рабочее пространство должно представлять мешок горячих газов. Отсюда совершенно ясна ложность всех печей с отводом дымовых газов сверху. Дым надо отводить с пода; а так как из топки он поступает тоже с пода, то правильно построенная пламенная печь, представляет идеальный мешок горячих газов.

В существующих печах строители прилагают все усилия сделать свод пониже и прижать пламя к нагреваемым предметам. Той же тенденции держатся и конструкторы паровых котлов. Они помещают части котла, имеющие температуру 200—250°С в самый очаг горения. Эта тенденция современных строителей печей и котлов ложна и должна быть оставлена. Логика требует, чтобы печь имела подсводовое пространство совершенно достаточное для окончания горения и чтобы холодные, нагреваемые печью предметы омывались пламенем с законченными реакциями. В дальнейшем мы увидим к каким непривычным конструкциям привела эта идея.

Современные нам печи и котлы слишком мало изучались, конструкции их не продумывались и причину этого не трудно об'яснить: человечество не отдавало себе отчета в законах управлявших движением газов в печах; печи и котлы были областью чистой эмпирики, и только ощупью



Фиг. 17.

иногда подходим к правильным конструкциям, как, например, каменьщики всегда кладут русскую печь с «припором» представляющим сожигательную камеру (фиг. 17). Вообще же, можно ли было требовать от конструкторов тщательного анализа, подробностей и деталей, когда самая сущность дела для них закрытая книга. Теперь обстановка радикально меняется. В вопросах конструкции печей и котлов наступает эра продумывания всех деталей и несомненно начнется вымирание современных нам устройств. Пламенные печи будут строиться с высоко поднятыми над подом сводами, ибо подсводное пространство есть идеальная сожигательная камера. Котлы же будут строиться с обширными камерами горения.

[1]) Предохранительная лампа Дэви для рудников с грем учим газом, основана на том, что пламя рудничной смеси загорающейся внутри лампы не может проскочить через мелкую проволочную сетку, образующую как бы ряд тонких трубок с очень теплопроводимыми стенками.

О скорости горения взрывчатых смесей.

Пробуя зажигать струйку доменного газа из газопровода, я наткнулся на очень интересное явление: 1) при малом давлении газа струйка горела спокойно, 2) при более повышенном давлении пламя отрывалось от стенки газопровода и мы имели плавающий в воздухе огонек, 3) при еще большем давлении струйку доменного газа нельзя было зажечь—она гасла в тот момент, когда мы относили лучинку с огнем.

Об'яснить это явление не трудно. Скорость горения доменного газа есть величина постоянная. Горение идет навстречу газу. Когда скорость газа меньше скорости горения, факел пламени держится у стенки газопровода. Когда он немного больше, мы получим плавающий в воздухе огонек в том месте, где скорость струи равна скорости горения. При очень большом давлении и скорости газа—в воздухе не устанавливается прочного очага горения и доменный газ скоро гаснет. Практика использовала это явление очень интересно. Например: мы имеем в городе весьма развитую сеть освещения светильным газом. Как пустить в нее газ? Очевидно в сети получится взрывчатая смесь, которую надо как-то удалить из газопровода. Ее удаляют прямо через рожки газового освещения, зажигая их; для того, чтобы огонь не передался в трубы поднимают давление в газопроводах до такой степени, чтобы скорость горения была меньше скорости истечения струи.

Давление в газовой сети обыкновенно около 20 мм воды (или 20 кг на 1 кв. метр). Считая, что мы будем иметь смесь газа и воздуха с весом 1,2 кг/м³, получим, что напор газа примерно равен:

$$h = 20 : 1{,}2 = 16{,}7 \text{ м},$$

а скорость струи равна

$$v = \sim 0{,}8 \sqrt{2gh} = 0{,}8 \cdot 18{,}1 = \sim 14{,}5 \text{ м/сек}.$$

Следовательно, если скорость горения будет меньше $14^1/_2$ м/сек, то передача огня в сеть невозможна, что действительно и наблюдается.

В лабораториях, где нет светильного газа употребляют газ бензинный. Это воздух насыщенный парами бензина, т.-е., просто говоря — взрывчатая смесь.

Каким способом предохранить лабораторию от взрыва и пожара? Для этого нужно держать в сети газа значительное давление, тогда скорость струи в горелке будет больше скорости горения и пламя никогда не передастся газгольдеру со взрывчатой смесью.

Из сказанного очевидно насколько важны исследования скорости горения взрывчатых смесей. К сожалению эти исследования весьма трудны и немногочисленны.

Для смеси водорода и воздуха мы имеем скорость около $4^1/_2$ м/сек, для

CH_4 и воздуха.	0,5	м/сек
$CO + \frac{O_2}{2}$	2	„
$H_2 + \frac{O_2}{2}$	20	„ [1])

Для составных частей пламени скорость горения принимается вообще 1 м/сек.

Но все эти цифры мало надежны. Скорость горения как мы видели, есть функция многих переменных и поэтому давать какие-либо цифры для этой скорости очень рисковано.

Но одно ясно: скорость эта невелика и о ней мы должны всегда помнить, когда проектируем печи.

Какими же средствами обладаем мы для ускорения реакции горения?

1) Правильное смешение газа и воздуха. Вредное влияние плохого смешивания мы уже видели. Смешивать их надо не толстыми струями. Струи никогда не должны направляться друг другу навстречу, а итти параллельно друг другу или по пути друг другу. Если струи пересекаются под прямым углом, то полезно горизонтальные струи пустить в тени сводиков (фиг. 18).

2) Образовавшееся пламя надо выдержать в сожигательной камере, имеющей вид мешка горячих газов, самое меньшее одну—полторы секунды.

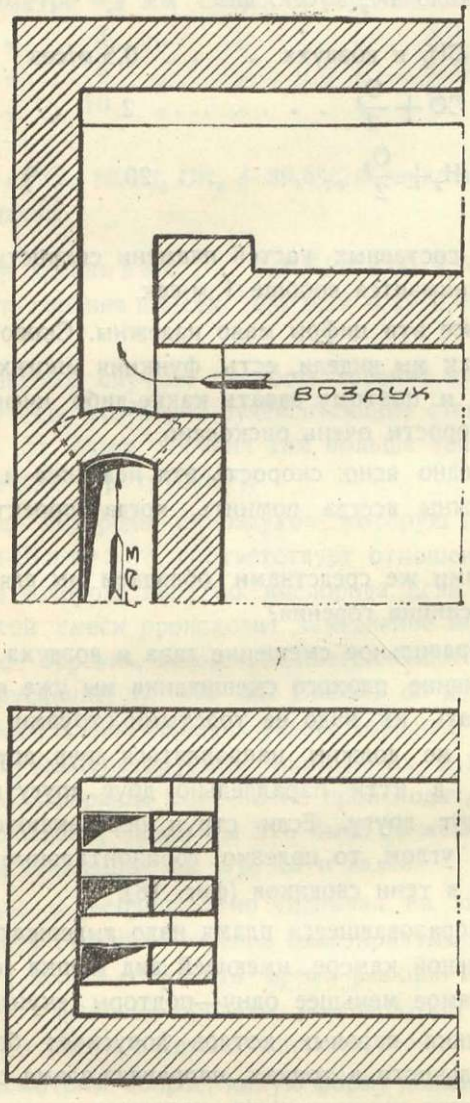
Техника паровых котлов допускает большие неправильности в топках, направляя пламя с незаконченными реакциями на холодные поверхности котла. Этим реакция горения может быть даже остановлена. Не редко можно наблюдать, что горение возникает вторично в борове паровых котлов за счет CO, H_2 и C, прошедших через все обороты котла.

В пламенных печах, где требуется высокий пирометрический эффект топлива, такое обращение с пламенем недопустимо.

---

[1]) Фотографируя пламя Бунзеновской горелки, Михельсон (Москва) определил скорость горения взрывчатых смесей $H_2 + \frac{O_2}{2}$ — 9 м/сек и $CO + \frac{O_2}{2}$ — 0,9 м/сек. H. Kruegen дает скорость горения для тяжелых углеводородов—6,5 м/сек, для H_2—4,5 м/сек, и для CO—2 м/сек.

3) Скорость реакции может быть увеличена увеличением избытка воздуха. Горение при избытке воздуха в 100% идет скорее, чем при избытке в 50% или при теоретическом количестве воздуха. Но пламя получается острое, что недопустимо для многих производств, ибо оно дает неравномерный нагрев.



Фиг. 18.

4) В действующих печах надо давать себе ясное представление о положении фокуса горения в рабочем пространстве печи. При замедлении реакции горения фокус горения смещается по направлению к дымовому борову.

При ускорении реакции горения, фокус горения смещается к топке, что обеспечивает правильную работу печи.

Смещение фокуса горения наблюдается весьма часто при разгаре пламенного окна и дымового пролета в пудлинговых печах. Разгар пламенного окна уменьшает сопротивление проходу в рабочее пространство печи топочным газам. Количество их увеличивается и время пребывания их в рабочем пространстве уменьшается. Реакция запаздывает и фокус смещается к дымовому пролету.

Правильная работа печи восстановляется починкой кладки окна, размер коего строго пропорционирован для каждой печи.

Разгар дымового пролета тоже не редко смещает фокус горения, ибо при повышенной тяге количество топочных газов увеличивается в такой мере, что они не успевают закончить свои реакции в рабочем пространстве. Силу тяги можно уменьшить просто приперев заслонку, но это неудобно в пудлинговых печах, где заслонкой управляют для увеличения степени окислительности пламени, и в случае смещения фокуса горения, приходится убавлять размер пламенного окна.

Общее заключение главы о химической природе пламени, которое надо иметь всегда в виду при проектировании и работе пламенных печей таково:

1) Реакция горения идет во времени и требует для своего осуществления заботы о поддержке достаточной температуры очага горения. Горение может быть полным только в условиях правильно устроенной сожигательной камеры.

2) Введение в пламя холодных предметов никоим образом допущено быть не может. Особенно рекомендуются печи со сводом, высоколежащим над подом и с отводом продуктов горения с пода в этих печах. Подсводовое пространство играет роль идеальной сожигательной камеры, нагреваемые же предметы омываются печными газами с вполне законченными реакциями горения.

ГЛАВА IV.

Классификация печей.

Техника пред'являет требования к печам самого разнообразного назначения.

Классифицировать печи по их назначению значит классифицировать нашу технику, задача совершенно неблагодарная, от которой я считаю правильным совершенно отказаться.

Практически при проектах печей мы встречаемся с двумя случаями:

1) Когда разность между теоретической температурой [1]) пламени и температурой печи велика и пламя может быть выдержано в рабочем пространстве достаточное время для полного окончания реакции горения, без применения каких-либо средств для ускорения этой реакции.

2) Когда разность между температурой печи и вычисленной температурой реакции горения так мала, что приходится применять меры для ускорения реакции горения.

В первых печах можно применять нагревание, вводимых в печь предметов, при помощи продуктов горения. Это нагрев мягким пламенем или пылом, без пережога предмета отдельными струями высокой температуры.

Пламя может быть восстановительное, нейтральное и окислительное по желанию. Печи этого типа представляют великолепный механизм для нагревания всевозможных предметов томильным жаром.

Ко второй категории печей относятся печи, для которых вычисленная температура горения близка к температуре требуемой от печи. Например, пудлинговая печь на сырых дровах. Обязательная температура этой печи 1300°. Добиться этой температуры можно, сжигая топливо при избытке воздуха менее 75%, что представляет уже некоторые трудности. Поэтому проектировать эту печь приходится так, чтобы не терять по возможности ни одного градуса фокуса горения. Приходится пламя направлять прямо на ванну печи. Греть ванну, так сказать, пламенем паяльной трубки.

К этой же категории относятся печи с простой колосниковой решеткой, например, отражательные для переплавки чугуна, ковочные для нагрева поковок, сварочные и т. п.

Характер работы этих печей: острое пламя и неравномерный, сильно окислительный нагрев. При нагреве возможен пережог, местное оплавление получение изделий с трещинами и рванинами.

Недостатки, свойственные этим печам так велики, что применение их на практике можно об'яснить только их компактными размерами и дешевизной постройки. Но эти печи, расходующие громадное количество топлива и экономически выгодные только в соединении с паровым котлом для утилизации теряющегося жара. Поэтому печей этой категории лучше не строить. Их всегда можно заменить печами первой категории, лучше удовлетворяющими своему назначению. Задача спроектировать печь 1-й категории совершенно определенна, строго научна и потому весьма проста

Совсем другого характера проектирование печей 2-й категории. Мы должны добиться, чтобы реакция горения в такой печи шла доли секунды, что возможно при очень тесном смешении горючих элементов пламени CO, CH_4, H_2 с кислородом воздуха. А так как подобное смешение может быть достигнуто только как результат вихревых движений в пламени, которыми пока еще не владеем, то мы опять наталкиваемся на область искусства, а не науки строить печи. Спроектированная нами печь может «не пойти». Ее придется переделать несколько раз ранее, чем добьемся правильного и достаточного интимного смешения элементов пламени.

Чтобы составить себе ясное представление о характере нашей работы, нужно вспомнить те случаи, когда нам приходилось возиться с коптящей керосиновой лампой. По опыту мы знаем, что незначительный разгар, изгиб частей горелки нарушает правильное смешение паров керосина с воздухом и наладить работу горелки бывает не так-то легко. Так же нелегко наладить и работу печи второй категории.

Печи 1-й и 2-й категории по внешнему виду ничем существенно друг от друга не отличаются. Например, печь с простыми колосниками, работающая как печь пудлинговая, сварочная, медноплавильная, нагревательная для поковок, по нашей классификации, как мы видели выше, есть печь 2-й категории. Но если эту же печь, подняв свод, мы пожелаем приспособить как печь для отжига, закалки и отпуска с температурой 900°—600°, то ее придется отнести к 1-й категории, т.-е. к печам, в которых разность между наблюдаемой температурой и вычисленной температурой горения так значительна, что допускает пребывание пламени в

[1]) Под теоретической температурой горения подразумевается та температура, до которой нагрелись бы продукты горения, если бы вся выделенная от горения топлива теплота пошла бы на их нагревание. (См. ниже стр. 28).

рабочем пространстве в продолжение 3-х и более секунд, что достаточно для полного окончания реакции горения без каких-либо особых приспособлений для увеличения скорости горения.

Из сказанного ясно, что печи 1-й категории есть печи с нормальной скоростью горения, печи 2-й категории — печи с заторопленой реакцией горения.

Итти против природы трудно. Задача удачно ускорить реакцию горения системой вихрей трудная задача. Трудная задача и постройка печей 2-й категории.

Выше я говорил, что печи этой категории отличаются большим расходом топлива. И это понятно. Если пламя остается в рабочем пространстве секунду или менее секудны, то очевидно нужно сжечь большее количество топлива, чем в том случае, когда пламя можно оставить в рабочем пространстве 2—3 или более секунд.

Чтобы получить эту возможность надо итти двумя путями:

а) уменьшить, по возможности избыток воздуха для горения и

б) вводить в печь дополнительное тепло, нагревая воздух или горючее (газообразное).

Первое достигается введением полугазовых и газовых топок. Второе—регенерацией и рекуперацией.

Уменьшение избытка воздуха, необходимого для реакции горения сопровождается увеличением времени реакции горения; следовательно, может быть проведено тем полнее, чем выше подогрев газа и воздуха. Вот почему в интересах экономии топлива нужно снабжать печи наилучшими устройствами для подогрева газа и воздуха. Чем выше подогрев, тем меньше может быть избыток воздуха, и сокращение расхода топлива идет с двух сторон.

Вот причина крайнего разнообразия в цифровых данных расхода топлива на одну и ту же работу в разных печах. Например: чтобы подогреть железо для прокатки в маленькой печи типа близкого к пудлинговой печи нужен расход каменного угля—40—50% веса железа. В печах методических, старых систем—20—25%, лучших—10—12%, в колодцах—8—10% и т. п. Таким образом расход топлива может быть сокращен в четыре, пять раз. В этом нет ничего удивительного, если принять в расчет, что в маленькой сварочной печи вычисленная температура горения почти совпадает с температурой нагрева железа, и пламя остается в печи менее секунды; в печи Сименса вычисленная температура пламени на 600—700° выше температуры нагрева железа и пламя может оставаться в печи около $3^1/_2$ и более секунд.

Из сказанного следует, что погоня за дешевыми маленькими печами не заслуживает подражания. Надо строить печи с полной утилизацией теряющегося жара, не считаясь с тем, что печи выходят более дорогие, более сложные.

Утилизация тепла для подогрева воздуха позволяет выдержать печные газы в них лишнюю секунду и соответственно понизить расход топлива.

Время выдерживания пламени в рабочем пространстве различных печей.

Ниже мы увидим, что вычисленная температура пламени тем выше, чем меньше избыток воздуха.

При горении с теоретическим расходом воздуха хороший каменный уголь дает вычисленную температуру около 2250° С [1]).

При полуторном расходе воздуха около 1650°С
При двойном „ „ около 1300 „
При тройном „ „ около 920 „

Итак, при проекте печи надо прежде всего остановиться на характере горения в проектируемой печи.

А) Печи с температурой до 1000°, не выше 1100°, нужно проектировать на горение с избытком воздуха равном нулю или 25%, ибо горение с теоретическим расходом воздуха идет так медленно, что в печах малой емкости температура редко поднимается выше 1100° С.

К этому типу относятся:

1) печи отжигательные,
2) закалочные и для отпуска,
3) печи кровельного и жестяного производства,
4) печи для обжига красного кирпича,
5) печи для обжига фарфора, огнеупорного кирпича, динаса и проч., хотя они имеют более высокую температуру, получающуюся за счет их громадной емкости и уменьшения лучеиспускания.

Приняв для всех этих печей горение с весьма малым избытком воздуха, мы получим вычисленную температуру их печных газов около 2000° С. Температура печных газов, покидающих печь для первых четырех категорий около 1000° С. Следовательно падение температуры за все время пребывания в печи около 1000° С. Для печей фарфорового производства и обжига огнеупорного кирпича температура печных газов покидающих печь около 1200—1400° С, следовательно общее падение 800—600° С. Спрашивается, сколько времени надо выдерживать печные газы в рабочем пространстве, чтобы они израсходовали всю ту химическую теплоту, которая могла бы поднять их температуру до 2000°, если бы реакция горения прошла бы моментально?

---

[1]) Дрова и бурый уголь дают более низкую температуру.

Это зависит от степени напряженности работы пламени и лучеиспускания. Наименьшими потерями на лучеиспускание и напряженностью работы отличаются печи кирпичеобжигательные. Для них падение температуры, определено мною 60—80° в секунду, а потому пламя нужно выдерживать:

в печах для красного кирпича $1000 : 80 = 12^1/_2$ сек.

для огнеупорного кирпича { от $600 : 80 = 7^1/_2$ „
до $800 : 80 = 10$ „

Для печей отжигательных, закалочных и проч., потерю в секунду надо принимать 100—150° С в среднем 125° С, а потому время пребывания надо считать:

$$1000 : 125 = 8{,}0 \text{ сек.}$$

Для печей кровельного производства расход тепла на нагрев в листокатальных печах очень велик, так как печи эти имеют большую выделку на 1 м² пода (около 4500 кг/24 час.). Падение надо принять 300° С в секунду, следовательно время пребывания для печей на каменном угле

$$900 : 300 = 3{,}0 \text{ сек.}$$

На дровах, вычисленная температура горения с теоретическим количеством воздуха равна 1950°С; при небольшом избытке воздуха около 1800°. Общее падение 1800°—1100° = 700° С. Время пребывания печных газов в рабочем пространстве в тех же печах на дровах.

$$700 : 300 = 2{,}3 \text{ сек.}$$

B) Маленькие печи для ковки под молотами и прессами устраиваются на хорошем каменном угле простые или полугазовые. Температура в них достигается при избытке воздуха 75% около 1400°С. Падение у этих печей, работающих с небольшой интенсивностью — 150°С/сек. Время пребывания 1—$1^1/_4$ сек. Температура отходящих газов—1200°С.

C) Перекатные методические печи большой производительности с рекуператорами или регенераторами проектируются с расходом воздуха около $1^1/_2$. Подсчет теоретической температуры горения дает обыкновенно около 1900° С.

Температура дыма покидающего камеру высокой температуры около 1200°. Падение в секунду около 200—250° С. Время пребывания от $3^1/_2$ до 2 секунд.

D) Печи Мартена расчитываются при нагреве газа и воздуха от 800° до 1100° С. Вычисленная температура при избытке воздуха в 50% около 2100—2300° С. Температура газов, покидающих печь 1600° С. В печах с интенсивной работой падение надо принимать от 250 до 350° С в секунду и время пребывания печных газов в рабочем пространстве печи от $1^3/_4$ до $2^1/_2$ секунд.

Падение температуры в секунду служит основанием расчета печей. Задавшись им, мы получаем об'ем печных газов в секунду, расход топлива, первичного и вторичного воздуха и вычисляем таким образом, все проектные данные, служащие основанием для расчета размеров печей. Отсюда ясна необходимость правильно задаться этим падением. Между тем те цифры, которые я рекомендую выше, пока довольно плохо обоснованы. Нужен ряд контрольных расчетов работающих печей, чтобы установить их более прочно.

Практическое правило одно: лучше задаваться бóльшим падением, бóльшим расходом топлива и получить бóльшие об'емы реагирующих газов и большие размеры пролетов печи. Печь расчитанная с запасом во всяком случае пойдет без отказа. А затем при ремонтах, при правильных расчетах размеры полостей печи могут быть уменьшены, если в этом будет найдена выгода.

Однако, чтобы проверить правильность наших заданий всегда не худо перед длительным расчетом печи во всей подробности сделать грубый подсчет расхода топлива на единицу нагреваемого материала, или подсчет полезного коэффициента печи, и сравнить с данными практики. Когда вопрос о расчете пламенных печей встанет на более прочные основания, будет иметь за собой давность, наши цифры падения температуры в секунду будут лучше обоснованы и таким колебаниям не будет места.

ГЛАВА V.

Решение задач на вычисление проектных данных для печей с простой топкой [1]).

Пояснения к расчетам топлив.

Нижеследующие расчеты будут относиться к случаю горения топлива в условиях простой топки на обыкновенных колосниках, которое в идеальном случае совершается по реакциям:

$$C + O_2 = CO_2 + 97.650 \text{ кал.} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

$$H_2 + {}^1/_2O_2 = H_2O_{пар} + 57.810 \text{ кал.} \quad . \quad . \quad (2)$$

$$FeS_2 + 2{,}5O_2 + SiO_2 = FeOSiO_2 + 2SO_2 + 180.893 \text{ кал.}^2) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

или на 1 мол. об. серы 90.447 кал.

Задача будет заключаться в определении следующего:

1. Необходимого для горения (теоретического) количества воздуха.

2. Количества и состава получающихся при этом продуктов горения.

3. Веса 1 м³ продуктов горения.

4. Теплопроизводительной способности данного топлива.

5. Теоретической температуры горения как при теоретическом количестве, так и при избытке воздуха.

Все эти вычисления мы будем вести на основании таблиц термохимических данных и теплоемкостей составленных проф. М. А. Павловым [3]). Ниже помещена таблица так-называемых теплосодержаний 1 м. об. газов при различных температурах. Числа этой таблицы полученные от умножения соответствующей молекулярной теплоемкости на температуру предоставляют то количество тепла, которое нужно затратить на нагревание 1 м. об. данного газа от 0° до нужной температуры при постоянном давлении.

Для облегчения пользования таблицами и упрощения выкладок при переходе от весов к об'емам и обратно, мы будем относить все не к кг или гр, а к молекулярным весам и об'емам.

Метод расчета в молекулярных об'емах был введен в металлургию H. Le-Chatelier, и позволяет решать некоторые задачи удивительно просто и в несколько раз скорее, чем в весовых количествах. Преимущество его будет понятно, когда вспомним, что грамм-молекула всякого вещества в газообразном состоянии занимает один и тот же об'ем в 22,4 литра или 0,0224 м³ при 0°C и 760 мм давления. Переход от весовых к об'емным отношениям делается поэтому весьма простым, не требует никаких справочных книжек, ибо веса молекул у нас всегда в памяти.

Хотя молекулярный вес углерода в твердом состоянии неизвестен, тем не менее его удобно принять равным 12, так как в состав одной молекулы CO_2, CO и CH_4, углерод входит одним атомом. По тем же основаниям молекула серы в твердом состоянии будет приниматься состоящей из одного атома.

На основании только что сказанного вышеприведенные три уравнения примут вид:

1) $C + O_2 = CO_2$
1 мо дает 1 мо

2) $H_2 + {}^1/_2O_2 = H_2O$
1 мо + ½ мо дают 1 мо

3) $FeS_2 + 2{,}5\ O_2 + SiO_2 = FeSiO_3 + 2SO_2$
2,5 мо дают 2 мо.

В заключение предпосылок к нижеследующим расчетам нужно сказать несколько слов по поводу теоретической температуры горения и способа ее вычисления.

Под теоретической температурой горения подразумевается та температура, до которой нагрелись бы продукты горения, если бы вся выделенная от горения топлива теплота пошла бы на их нагревание. В действительности, как это будет сказано далее, теоретическая температура пламени никогда не наблюдается, но вычисление ее служит нам хорошую службу в вопросе проектирования рабочего пространства печей и потому теоретическая температура нами будет всегда вычисляться.

Алгебраически эта температура выражается равенством:

$$t = \frac{Q}{c_1 + c_2 + c_3 + \ldots}$$

---

[1]) Настоящая глава, а также некоторые расчеты VI-й главы впервые были сделаны и напечатаны проф. Б. В. Старком, как руководство для студентов Ленинградского Политехнического Института. При редактировании книги эти расчеты были переработаны и пополнены Н. А. Соболевским, С. В. Грум-Гржимайло и К. Ф. Оленевым.

[2]) Схема реакций дана для практического случая образования шлака золы из имеющегося в каменном угле серного колчедана. В дальнейших расчетах мы для простоты будем принимать, что вся сера угля находится в виде серного колчедана.

[3]) Ж. Р. М. О. 1911, ч. 1, стр. 402 и 1912, ч. 1, стр. 421.

Теплосодержание 1 грамм-молекулярного об'ема различных газов при различных температурах (в больших калориях).

t °C	O_2	H_2, CO, N_2	H_2O	CO_2, SO_2	CH_4	Воздух.
100	0,693	0,673	0,810	0,810	1,038	0,677
200	1,395	1,355	1,630	1,893	2,196	1,363
300	2,106	2,046	2,461	2,926	3,474	2,059
400	2,826	2,746	3,305	4,009	4,872	2,763
500	3,555	3,455	4,162	5,139	6,390	3,476
600	4,293	4,173	5,036	6,311	8,028	4,198
700	5,040	4,900	5,928	7,519	9,786	4,929
800	5,796	5,636	6,842	8,759	11,664	5,670
900	6,561	6,381	7,781	10,027	13,662	6,419
1000	7,335	7,135	8,750	11,317	15,780	7,177
1100	8,118	7,898	9,753	12,625	18,018	7,944
1200	8,910	8,670	10,795	13,945	20,376	8,720
1300	9,711	9,451	11,881	15,275	—	9,506
1400	10,521	10,241	13,019	16,607	—	10,300
1500	11,340	11,040	14,212	17,938	—	11,103
1600	12,168	11,848	15,470	19,269	—	11,915
1700	13,005	12,665	16,801	20,640	—	12,736
1800	13,851	13,491	18,209	22,014	—	13,567
1900	14,706	14,326	19,707	23,391	—	14,406
2000	15,570	15,170	21,300	24,770	—	15,254
2100	16,443	16,023	22,999	26,147	—	16,111
2200	17,325	16,885	24,816	27,526	—	16,977
2300	18,216	17,756	26,756	28,902	—	17,853
2400	19,116	18,636	28,836	30,276	—	18,737
2500	20,025	19,525	31,062	31,650	—	19,630
2600	29,943	20,423	36,436	33,033	—	20,532
2700	21,870	21,330	36,018	34,385	—	21,443
2800	22,806	22,246	38,752	35,770	—	22,364

где Q — количество тепла, c_1, c_2, c_3, ...—теплоемкости продуктов горения, которые в свою очередь являются функциями от температуры. Благодаря этому, вышеприведенное уравнение, после преобразования, принимает вид алгебраического уравнения 4-й степени (в выражениях теплоемкостей H_2O и CO_2 входят кубы температур), решение которого представляет большие затруднения.

Для того, чтобы избежать решения такого уравнения приходится пользоваться способом проб. Задаваясь некоторой температурой, определяем запас тепла в продуктах горения, нагретых до этой температуры и сравниваем полученное количество тепла с имеющимся. Эти вычисления сильно облегчаются при пользовании вышеприведенными таблицами количеств тепла, заключающихся в 1 мо газов.

Для практических целей с более чем достаточной точностью можно интерполировать искомую температуру, задавшись температурой выше и ниже и сделав допущение, что во взятом интервале количество тепла в продуктах горения изменяется пропорционально первой степени температуры.

Именно этим приемом и решены соответствующие пункты первого и последующих заданий.

Расчет горения каменного угля.

Для сравнения будем вести параллельно два расчета; горение угля сырого с 6% влаги и горения того же угля, подсушенного до 0,9% влаги, т.-е. в том состоянии, в котором он был бы сожжен в топке, работающей пылевидным горючим.

1. Состав угля.

А. Уголь сырой.

Состав угля в %.		Состав угля в молекулярных об'емах.	
C . . .	75,78%	C . . .	75,78 : 12 = 6,315 мо
H_2 . .	4,29 „	H_2 . . .	4,29 : 2 = 2,145 „
O_2 . .	4,32 „	O_2 . . .	4,32 : 32 = 0,135 „
N_2 . .	1,29 „	. . .	1,29 : 28 = 0,046 „
S . . .	1,32 „	S . . .	1,32 : 32 = 0,041 „
H_2O . .	6,00 „	H_2O . . .	6,00 : 18 = 0,333 „
Зола . .	7,00 „		
	100,00% [1]		

[1] Если сумма не равна 100,00%, что часто бывает в данных лаборатории, то лучше пересчитать состав на 100,00%, хотя, как увидим далее, можно расчитывать и на любое количество. Если дан состав сухой массы угля и влажность в 5%, то следует состав сухой массы пересчитать на (100—5) и добавить 5% влаги.

Состав угля в молекулярных об'емах по Дюлонгу[1]).

C . . . . . 6,315 мо
H_2 . $2{,}145 - 2 \times 0{,}135 = 2{,}145 - 0{,}270 = 1{,}875$ „
N_2 . . . . . 0,046 „
S . . . . . 0,041 „
H_2O . . . . . $0{,}333 + 0{,}270 = 0{,}603$ „

B. Уголь подсушенный.

Состав угля в %		Состав угля в мо:	
C . . .	79,90%	C	$79{,}90 : 12 = 6{,}658$ мо
H_2 . .	4,52 „	H_2 . . .	$4{,}52 : 2 = 2{,}260$ „
O_2 . .	4,55 „	O_2 . . .	$4{,}55 : 32 = 0{,}142$ „
N_2 . .	1,36 „	N_2 . . .	$1{,}36 : 28 = 0{,}049$ „
S . . .	1,39 „	S	$1{,}39 : 32 = 0{,}043$ „
H_2O . .	0,90 „	H_2O . . .	$0{,}90 : 18 = 0{,}050$ „
Зола . .	7,38 „		
	100,00%		

Состав подсушенного угля в молекулярных об'емах по Дюлонгу:

C . . . . . 6,658 мо
H_2 . . . . . $2{,}260 - 2 \times 0{,}142 = 1{,}976$ „
N_2 . . . . . 0,049 „
S . . . . . 0,043 „
H_2O . . . . . $0{,}050 + 0{,}284 = 0{,}334$ „

2. Теоретически необходимое количество воздуха (в м³) для горения 1 кг угля.

A. Для горения C в CO_2 необходимо 6,315 мо O_2
„ „ H_2 „ H_2O „ $1{,}875 : 2 = 0{,}937$ мо O_2
Для горения S в SO_2 необходимо $0{,}041 \times 1{,}25$[2]) $= 0{,}051$ мо O_2
7,303 мо O_2

Вместе с O_2 поступит N_2 — $7{,}303 \times 3{,}762$[3]) $= 27{,}474$ мо N_2
Всего . . . 34,777 мо воздуха.

$34{,}777 \times 0{,}0224 = 0{,}7790$ м³
1 кг обыкновенного угля требует — $0{,}7790 \times 10 = 7{,}790$ м³ воздуха.

B. 1 кг подсушенного, до 0,9% H_2O, угля требует 8,213 м³ воздуха.

3. Состав и количество продуктов горения (в м³) 1 кг угля при теоретическом расходе воздуха.

A.
CO_2 . . . . . 6,315 мо
H_2O . . . $1{,}875 + 0{,}603 = 2{,}478$ „
SO_2 . . . . . 0,041 „
N_2 . . . $0{,}046 + 27{,}474 = 27{,}520$ „
36,354 мо

$36{,}354 \times 0{,}0224 = 0{,}8143$ м³
1 кг обыкновенного угля дает $0{,}8143 \times 10 = 8{,}143$ м³ продуктов горения.

B. 1 кг подсушенного угля дает $= 8{,}518$ м³ продуктов горения.

4. Вес 1 м³ продуктов горения.

A.
CO_2 . . . . $6{,}315 \times 44 = 277{,}860$ гр
H_2O . . . . $2{,}478 \times 18 = 44{,}604$ „
SO_2 . . . . . $0{,}041 \times 64 = 2{,}624$ „
N_2 . . . . . $27{,}520 \times 28 = 770{,}560$ „
1095,648 гр

1 м³ продуктов горения обыкновенного угля весит $\frac{1095{,}648 \times 10}{8{,}143 \times 1000} = 1{,}345$ кг.

B. 1 м³ продуктов горения подсушенного угля весит 1,350 кг.

5. Материальный баланс топки.

Приход

Угля . . . . . 100,000 гр.
Воздуха:
O_2 . . . . . $7{,}303 \times 32 = 233{,}696$ „
N_2 . . . . . $27{,}474 \times 28 = 769{,}272$ „
1102,968 гр.

Расход

Продуктов горения . . . . . 1095,648 гр.
Золы: $7{,}000 + (0{,}051 - 0{,}041) \times 32$[4]) $= 7{,}320$ „
1102,968 гр.

---

[1]) На основании правила Дюлонга весь кислород угля предполагается соединенным с соответствующим количеством водорода в воду (жидкую); это правило, строго говоря, неверно, и при расчете теплопроизводительной способности такого топлива, как торф и дрова, не применимо, но для каменного угля оно дает достаточно точные результаты.

[2]) Согласно уравнению на окисление молекулы серного колчедана (FeS_2), находящегося в угле, требуется 2,5 молекулы кислорода, откуда следует, что на одну молекулу серы надо считать 1,25 молекулы кислорода.

[3]) Воздух принимается состоящим из 21% O_2 и 79% N_2 по об'ему). $\frac{N_2}{O_2} = 3{,}762$, $\frac{O_2}{N_2} = 0{,}266$.

[4]) Кислород, перешедший в золу в виде FeO.

6. Теплопроизводительная способность топлива.

A. Горение C дает $6{,}315 \times 97.650 = 616.660$ кал
„ H_2 „ $1{,}875 \times 57.810 = 108.394$ „
„ S „ $0{,}041 \times 90.447 = 3.708$ „
728.762 кал.
Испарение H_2O отнимает $0{,}603 \times 10.550^{1}) = -6.362$ „
722.400 кал.

1 кг обыкновенного угля дает $722.400 \times 10 = 7224$ Кал.

B. 1 кг подсушенного угля дает = 7648 Кал.

Расчеты сделаны в предположении полного сгорания каменного угля. Но на практике весьма часто в золе остается очень много кокса и с золой получаются так называемые сгарки. Последних бывает особенно много, когда работают с очень большим напряжением топки, при увеличении площади колосниковой решетки количество сгарок уменьшается. Чтобы учесть влияние получения сгарок, надо из состава каменного угля вычесть количество углерода, находящееся в золе (например 20% веса золы) и вести дальше расчет так, как было указано.

7. Влияние избытка воздуха на теоретическую температуру горения.

a) Теоретический расход воздуха (без избытка). Задаемся температурой 2200°C.

A. Продукты горения, нагретые до 2200° содержат:
$CO_2 + SO_2$ . . . . . $6{,}315 + 0{,}041 =$
$= 6{,}356 \times 27.526 = 174.955$ кал
H_2O . . . . . $2{,}478 \times 24.816 = 61.494$ „
N_2 . . . . . $27{,}520 \times 16.885 = 464.675$ „
701.124 кал.

Полученное количество тепла меньше того количества, которое выделяется при горении угля. Задаемся более высокой температурой—2300°C.
Продукты горения нагретые до 2300°C, содержат:
$CO_2 + SO_2$ . . . . $6{,}356 \times 28.902 = 183.701$ кал
H_2O . . . . . $2{,}478 \times 26.756 = 66.301$ „
N_2 . . . . . $27{,}520 \times 17.756 = 488.645$ „
738.647 кал.

Интерполируем:

738.647 кал − 701.124 „ = 37.523 кал	722.400 кал − 701.124 „ = 21.276 кал	$\frac{x}{100} = \frac{21{,}276}{37{,}523}$

$x = 57°$

При горении обыкновен. угля $t = 2200° + 57° = 2257°C$.

B. При горении подсушенного угля $t = 2285°C$.

b) Расход воздуха в $1\frac{1}{2}$ раза больше теоретического.

A. Избыток воздуха:
$34{,}777 \times 0{,}5 = 17{,}388$ мо
Продукты горения нагретые до 1600°C содержат
$CO_2 + SO_2$ . . . . $6{,}356 \times 19.269 = 122.474$ кал.
H_2O . . . . . $2{,}478 \times 15.470 = 38.335$ „
N_2 . . . . . $27{,}520 \times 11.848 = 326.057$ „
Избыток воздуха . $17{,}388 \times 11.915 = 207.178$ „
694.044 кал.

Продукты горения нагретые до 1700°C содержат:
$CO_2 + SO_2$ . . . . $6{,}356 \times 20.640 = 131.188$ кал.
H_2O . . . . . $2{,}478 \times 16.801 = 41.633$ „
N_2 . . . . . $27{,}520 \times 12.665 = 348.541$ „
Избыток воздуха . $17{,}388 \times 12.736 = 221.454$ „
742.816 кал.

Интерполируем:

742.816 кал − 694.044 „ = 48.772 кал	722.400 кал − 694.044 „ = 28.356 кал	$\frac{x}{100} = \frac{28.356}{48.772}$

$x = 58°$.

При горении обыкновенного угля $t = 1600° + 58° = 1658°C$.

B. При горении подсушенного угля $t = 1674°C$.

c) Расход воздуха в 2 раза больше теоретического.

A. Избыток воздуха: $34{,}777 \times 1{,}0 = 34{,}777$ мо
Продукты горения нагретые до 1300°C содержат:
$CO_2 + SO_2$ . . . . $6{,}356 \times 15.275 = 97.088$ кал
H_2O . . . . . $2{,}478 \times 11.881 = 29.441$ „
N_2 . . . . . $27{,}520 \times 9.451 = 260.092$ „
Избыток воздуха . $34{,}777 \times 9.506 = 330.590$ „
717.211 кал.

Продукты горения нагретые до 1400°C содержат:
$CO_2 + SO_2$ . . . . $6{,}356 \times 16.607 = 105.554$ кал
H_2O . . . . . $2{,}478 \times 13.019 = 32.261$ „
N_2 . . . . . $27{,}520 \times 10.241 = 281.832$ „
Избыток воздуха . $34{,}777 \times 10.300 = 358.203$ „
777.850 кал.

Интерполируем:

777.850 кал − 717.211 „ = 60.639 кал	722.400 кал − 717.211 „ = 5.189 кал	$\frac{x}{100} = \frac{5.189}{60.639}$

$x = 9°$.

При горении обыкновенного угля $t = 1300° + 9° = 1309°C$.

B. При горении подсушенного угля $t = 1319°C$.

[1]) Скрытая теплота испарения одной молекулы H_2O при 18° принята $586 \times 18 = 10.548$ кал ∽ 10,550 кал.

d) Расход воздуха в 3 раза больше теоретического.

A. Избыток воздуха:

$$34{,}777 \times 2{,}0 = 69{,}554 \text{ мо}$$

Продукты горения нагретые до 900°C содержат:

$CO_2 + SO_2$ . . .	$6{,}356 \times 10.027 =$	63.732 кал
H_2O.	$2{,}478 \times 7.781 =$	19.281 „
N_2	$27{,}520 \times 6.381 =$	175.605 „
Избыток воздуха .	$69{,}554 \times 6.419 =$	446.467 „
		705.085 кал.

Продукты горения нагретые до 1000°C содержат:

$CO_2 + SO_2$	$6{,}356 \times 11.317 =$	71.931 кал
H_2O.	$2{,}478 \times 8.750 =$	21.682 „
N_2	$27{,}520 \times 7.135 =$	196.355 „
Избыток воздуха .	$69{,}554 \times 7.177 =$	499.189 „
		789.157 кал.

$$\begin{array}{r} 789.157 \text{ кал} \\ -\ 705.085 \text{ „} \\ \hline 84.072 \text{ кал} \end{array} \qquad \begin{array}{r} 722.400 \text{ кал} \\ -\ 705.085 \text{ „} \\ \hline 17.315 \text{ кал} \end{array} \qquad \frac{x}{100} = \frac{17.315}{84.072}$$

$$x = 21°.$$

При горении обыкновенного угля $t = 900° + 21° = 921°C$.

B. При горении подсушенного угля $t = 927°C$.

Вышеприведенные расчеты сделаны в предположении, что реакция горения совершается мгновенно и потому вся теплота передается продуктам горения. На самом деле, как мы видели выше, из изложения химической природы пламени, реакция горения мгновенно совершиться не может; она идет во времени, в течение которого тепло реакции отчасти передается продуктам горения, отчасти нагреваемым предметам, отчасти рассеивается в окружающей среде и составляет потерю на лучеиспускание.

Чем дольше идет реакция горения, тем больший процент теплоты утилизируется на работу печи и теряется в пространство, т.-е. тратится на лучеиспускание. Поэтому наблюдаемая температура горения не та, которая получается вычислением, а гораздо ниже.

Как мы только что видели, при расходе теоретически необходимого количества воздуха, температура горения каменного угля вычисляется равной 2257°C; в действительности же, печи, так работающие, имеют температуру около 1000°C.

Только в печах для обжига динаса, где громадный об'ем печи и толщина стен уменьшают лучеиспускание, а полезная работа пламени очень мала, температура горения поднимается до 1400°C. Такого же результата достигаем мы в пылевых топках, где, обращая каменный уголь в тонкую пыль и смешивая ее с воздухом, мы добиваемся громадной скорости горения и, благодаря этому, повышаем температуру реакции горения.

Какое же значение имеет вычисление температуры, которая никогда не наблюдается? Казалось бы—это потеря времени. Напротив! Разность, теоретически вычисленной температуры и действительно получающейся в печи, дает нам возможность учесть время, которое мы можем оставить пламя в печи и учесть запас тепла на лучеиспускание, важность чего мы видели выше.

Быстрое понижение вычисленной температуры горения при большом избытке воздуха дает нам совершенно конкретное указание, каким путем должны мы итти, чтобы добиться высокого пирометрического эффекта от данного топлива. Избыток воздуха есть самый страшный враг в печном деле и с ним надо вести самую ожесточенную борьбу для того, чтобы добиться высокой температуры в печи и высокого коэффициента ее полезного действия.

С целью контроля над горением в топке чрезвычайно полезно в заводах делать возможно чаще анализы дыма, чего обыкновенно не делают.

Анализы дыма могут сказать нам многое:

1. Кроме CO_2 и N_2 в дыме может быть H_2 и CO. Это указывает на недостаток воздуха и возможность повысить пирометрический и полезный эффект печи за счет более полного горения.

2. В дыме вместе с H_2 и CO может быть и свободный кислород. Это указывает на незаконченность реакции горения, причин для чего может быть несколько:

а) пламя оставалось в печи слишком короткое время, вследствие тесноты рабочего пространства печи;

б) воздух плохо смешивается с продуктами сухой перегонки топлива и фокус горения оказывается смещенным в дымовой пролет;

в) пламя с незаконченными реакциями застужено присутствием и соприкосновением с холодными предметами, случай очень часто наблюдаемый в паровых котлах. В этом случае характерно выделение сажистого углерода.

Во всех этих случаях анализ дыма явится надежным руководством для улучшения работы печи.

3. Наконец, в дыме может оказаться просто не вызываемый необходимостью избыток воздуха, вследствие неуменья сообразовать площадь поддувала с тягой.

Анализируя дым, техник, в заведывании коего находится печь, очень скоро освоится с работой печи и будет в состоянии вести ее как следует, или выяснить необходимые в печи переделки,

Однако, не только нужно делать анализы дыма, но надо уметь и проверять их, так как неверные анализы наблюдаются чаще, чем это было бы желательно. Контроль над лабораторией возможен и вот как он делается.

ЗАДАЧА: Поверить анализ дыма.

Возьмем горение с двойным против теоретически необходимого, количеством воздуха.

Согласно стр. 31 продукты горения состоят:

CO_2	6,315 мо
SO_2	0,041 „
H_2O	2,478 „
N_2	54,994 „
O_2	7,303 „

Пары воды и SO_2 прибором Орса не определяются, а потому состав дыма по Орса будет:

CO_2	6,315 мо	. . . .	9,2%
N_2	54,994 „	. . . .	80,2 „
O_2	7,303 „	. . . .	10,6 „
	68,612 мо		100,0%

Часть кислорода воздуха, ушедшая на окисление водорода и FeS_2, не учитывается прибором Орса; с другой стороны, в число азота определенного по Орса, входит азот горючего, что надо учесть при суждении о точности нижеизлагаемого метода поверки, который состоит в следующем:

Допустим, что весь азот принесен воздухом; тогда азоту дыма, по Орса соответствует кислорода

$$80{,}2 \times 0{,}266 = 21{,}3\%.$$

Свободного кислорода в дыме 10,6%.

Соединенного с углеродом, водородом, серой и железом:

$$21{,}3 - 10{,}6 = 10{,}7\%.$$

Соединенного только с водородом, серой и железом:

$$10{,}7 - 9{,}2 = 1{,}5\%,$$

что составит:

$$\frac{1{,}5}{9{,}2} \cdot 100 = 16{,}3\%$$ кислорода соединенного с углеродом.

Допустим, что мы небрежно сделали анализ, и по Орса определили

CO_2 . . .	8,9%	вместо . . .	9,2%
N_2 . . .	80,7 „	„ . . .	80,2 „
O_2 . . .	10,4 „	„ . . .	10,6 „
	100,0%		100,0%

По предыдущему находим:
азот принесет кислорода воздуха

$$80{,}7 \times 0{,}266 = 21{,}5\%$$

свободного кислорода 10,4%. Соединенного с H_2, S, Fe и C

$$21{,}5 - 10{,}4 = 11{,}1\%$$

соединенного с H_2, S и Fe

$$11{,}1 - 8{,}9 = 2{,}2\%,$$

что составит относительно кислорода соединенного с углеродом

$$\frac{2{,}2}{8{,}9} \times 100 = 24{,}7\%$$

вместо ранее подсчитанных 16,3%.

Таким образом наша ошибка в определении CO_2 и O_2 в дыме обнаружена. Делая эту поверку в лаборатории, лаборант получит точный контроль для всех деталей анализа газов прибором Орса и выучится работать безошибочно.

Точное отношение расхода кислорода воздуха на окисление H_2, S и Fe к расходу на окисление углерода подсчитывается по элементарному составу горючего.

Согласно стр. 30, оно равно:

$$\frac{0{,}937 + 0{,}051}{6{,}315} \cdot 100 = 15{,}6\%,$$

вместо грубо подсчитанных нами 16,3%.

Причиной неверности газовых анализов является недостаточная чистота в поглощении окиси углерода. Эта погрешность действует двояко: 1) просто фиктивно уменьшает количество CO в анализе; 2) фиктивно увеличивает в анализе количество H_2 и CH_4. Ошибка анализа всегда идет в эту сторону.

Чтобы раз'яснить это положение посмотрим сначала правильный ход анализа генераторного газа. После поглощения CO_2, O_2 и CO в газе остается водород и метан. Пусть будет A (H_2) и B (CH_4) и введено с воздухом для сжигания D (O_2). После сжигания получится: A (H_2O) которая сгустится в воду, B (CO_2), определяемая как таковая поглощением в растворе КОН и, наконец, $2B$ (H_2O), которая тоже сгустится в воду. Об'ем кислорода D частью израсходуется и уменьшится до $(D - \frac{A}{2} - 2B)$. Общее уменьшение об'ема смеси после сжигания будет:

$\Sigma = A + \frac{A}{2} + 2B$. Найдя далее B по поглощению КОН мы определим A по формуле:

$$A = \frac{(\Sigma - 2B)\,2}{3} \quad \ldots\ldots (1)$$

Теперь допустим, что анализ ведется небрежно; CH_4 у нас в газе нет, а CO была поглощена неполностью и в остатке находится A_1 (H_2) и B_1 (CO). Вводим опять D_1 кислорода воздуха, производим сожигание и получаем общее уменьшение об'ема смеси Σ_1. Что происходит на самом деле и что мы будем предполагать? На самом деле CO сгорит в CO_2, а H_2 в H_2O. Продукты реакции будут: A_1 (H_2O) + B_1 (CO_2). Об'ем кислорода будет $D_1 - \frac{A_1}{2} - \frac{B_1}{2}$; а общая потеря в об'еме после сожигания будет: $\Sigma_1 = A_1 + \frac{A_1}{2} + \frac{B_1}{2}$; после поглощения CO_2 определяем по Орса B_1 и затем A_1 по формуле:

$$A_1 = \frac{\left(\Sigma_1 - \frac{B_1}{2}\right) 2}{3} \quad \ldots \quad (2).$$

Таким образом наблюдаемые нами величины есть B и Σ величина же A — количество водорода нами не наблюдается, а вычисляется по формулам (1) или (2). Расчитывая на полное поглощение CO до сжигания и применив во втором случае формулу (1) мы совершенно извратим анализ, преуменьшив содержание в газе водорода и получив содержание метана, которого на самом деле не было.

Все усилия проектирующего печи и работающего при них в заводах должны быть направлены на то, чтобы добиться полного горения топлива при условии наименьшего расхода воздуха. В этом случае верный газовый анализ есть необходимость.

Кроме понижения вычисленной температуры горения, избыток воздуха вреден тем, что увеличивая об'ем печных газов, он уменьшает время пребывания их в полости печи, т.-е. время тепловой отдачи газов нагреваемым предметам. Но, подчеркивая необходимость стремления работать с наивозможно меньшим избытком воздуха, нужно еще оговориться, что уменьшение избытка воздуха уменьшает концентрацию в пламени реагирующего кислорода и тем замедляет скорость реакции горения, а потому, параллельно с уменьшением избытка воздуха, должны итти различные меры для увеличения скорости и облегчения хода самой реакции горения.

ЗАДАЧА: Расчитать горение каменного угля с таким избытком воздуха, чтобы температура пламени была равна 1400°C (температура сварочной печи).

1. Количесто избытка воздуха в %% от теоретического.

A. При горении с теоретическим количеством воздуха, продукты горения нагретые до 1400°C уносят тепла:

$CO_2 + SO_2$ . .	6 356	× 16.607 =	105.554 кал
H_2O	2 478	× 13.019 =	32.261 „
N_2	27,520	× 10.241 =	281.832 „
			419.647 кал.

Количество тепла, которое должен содержать избыточный воздух

$$722.400 - 419.647 = 302.753 \text{ кал.}$$

Количество воздуха, нагретого до 1400°, которое достаточно для поглощения этого тепла, будет:

$$302.753 : 10.300 = 29{,}393 \text{ мо,}$$

где 10.300 есть количество тепла в 1 мо воздуха при 1400°C.

или $\frac{29{,}393}{34{,}777} = 84{,}5\%$ теоретического расхода воздуха.

B. Горение подсушенного угля потребует 86,4%.

2. Количество воздуха (в м³) на 1 кг угля.

A. 34,777 + 29.393 = 64,170 мо воздуха
или 64,170 × 0,0224 × 10 = 14,374 м³/кг.
1 кг обыкновенного угля потребует — 14,37 м³ воздуха.

B. 1 кг подсушенного угля потребует—15,31 м³ воздуха.

3. Количество продуктов горения (в м³) на 1 кг угля.

A. $CO_2 + SO_2$	6,356	мо
H_2O	2,478	„
N_2	27,520	„
Изб. воздуха	29,393	„
	65,747	мо.

$$65{,}747 \times 0{,}0224 = 1{,}473 \text{ м}^3.$$

A. 1 кг. обыкновенного угля дает 14,73 м³ пр. гор.
B. „ „ подсушенного „ „ 15,61 „ „ „

4. Вес 1 м³ продуктов горения.

Количество избыточного воздуха.

A. 29,393 × 0,79 =	23,220	мо N_2
29,393 × 0,21 =	6,173	„ O_2.
	29,393	мо воздуха.

Вес продуктов горения

O_2 . . . . . $6{,}315 \times 44 =$ 277,860 гр
H_2O . . . . . $2{,}478 \times 18 =$ 44,604 „
SO_2 . . . . . $0{,}041 \times 64 =$ 2,624 „
N_2 . $27{,}520 + 23{,}220 = 50{,}740 \times 28 =$ 1420,720 „
O_2 . . . . . $6{,}173 \times 32 =$ 197,536 „

1943,344 гр

$$\frac{1943{,}344 \times 10}{14{,}73} = 1319 \text{ гр}$$

1 м³ продуктов горения обыкновенного угля весит 1,32 кг.

В. 1 м³ продуктов горения подсушенного угля весит 1,32 кг.

5. Материальный баланс топки.

Приход.

Угля . . . . . 100,000 гр
Воздуха:
N_2 . . $(27{,}474 + 23{,}220) \times 28 =$ 1419,432 „
O_2 . . $(7{,}303 + 6{,}173) \times 32 =$ 431,232 „

1950,664 гр.

Расход.

Продуктов горения . . . . . 1943,344 гр
Золы . . $7{,}000 + (0{,}051 - 0{,}041)32 =$ 7,320 „

1950,664 гр.

Если в данный расчет внести еще потерю на лучеиспускание в топке в количестве 20% выделенного тепла, то допустимый избыток воздуха при взятом нами топливе понизится до:

$$\frac{722.400 \times 0{,}80 - 419.647}{10.300} = 15{,}366 \text{ мо},$$

или $\frac{15{,}366 \times 100}{34{,}777} = 44{,}2\%$ теоретического количества воздуха.

Это указывает на большие трудности проектирования и ведения на практике (вследствие малого допуска избытка воздуха) таких печей с высокой температурой, но с простой колосниковой решеткой.

ЗАДАЧА: Расчитать горение подсушенного каменного угля в виде пыли в печи для обжига клинкера.

Задание: Каменный уголь (из предыдущего расчета). Избыток воздуха в 15% теоретического количества. Расход угля 35% от веса обожженного клинкера. Воздух для горения подогревается клинкером, охлаждающимся от 1450° до 100°, причем 50% отдаваемого им тепла подогревает воздух, а 50% теряется на лучеиспускание.

Сначала находим количество тепла, идущее на подогрев воздуха.

Количество клинкера, получающееся на 100 гр угля будет:

$$100 : 0{,}35 = 286 \text{ гр или } 0{,}286 \text{ кг}.$$

Отдаваемое им тепло при охлаждении от 1450° до 100°.

$(0{,}294$ [1]$) \times 1450 - 0{,}190 \times 100) \times 0{,}286 \times 1000 =$
$= 116.488$ кал и на нагрев воздуха пойдет:

$$116.488 \times 0{,}5 = 58.244 \text{ кал}.$$

Теперь находим нужное количество воздуха при 15% избытка и температуру до которой он подогревается:

Воздуха: $8{,}213$ [2]$) + 8{,}213 \times 0{,}15 = 9{,}445$ м³/кг.

или $\frac{9{,}445 \times 100}{0{,}0224 \times 1000} = 42{,}165$ мо/100 гр

$$\frac{58.244}{42{,}165} = 1.381 \text{ кал/мо}.$$

Интерполируем по таблице теплосодержаний в пределах 200 — 300 °C.

$$\frac{2.059 \text{ кал}}{1.363 \text{ „}} \quad \frac{1.381 \text{ кал}}{1.363 \text{ „}}$$

696 кал 18 кал

$$\frac{x}{100} = \frac{18}{696}; \quad x = 3°$$

Температура подогретого воздуха будет:

$$t = 200 + 3 = 203°.$$

Наконец, найдем состав и количество продуктов горения и теоретическую температуру пламени.

Продуктов горения получится:

$$8{,}517 + 8{,}213 \times 0{,}15 = 9{,}749 \text{ м}^3/\text{кг},$$

их состав:

$CO_2 + SO_2$ . . . . . 6,701 мо.
H_2O . . . . . 2,310 „
N_2 . . . . . 29,013 „
Избыток воздуха . . . 5,499 „

Всего тепла будет:

$$764.700 + 58.244 = 822.944 \text{ кал/100 гр}.$$

Задаемся температурой 2100°.

$CO_2 + SO_2$ . . . . $6{,}701 \times 26.147 = 175.211$ кал
H_2O . . . . . $2{,}310 \times 22.999 = 53.128$ „
N_2 . . . . . $29{,}013 \times 16.023 = 464.875$ „
Избыток воздуха . $5{,}499 \times 16.111 = 88.594$ „

781.808 кал.

---

[1]) Теплоемкость кликера, которую можно принять прриблизительно равной теплоемкости кирпича и шлака (см. приложения к V части).

[2]) См. предыдущий расчет горения подсушенного каменного угля.

При 2200°:

$CO_2 + SO_2$	6,701 × 27.526 = 184.452	кал.
H_2O	2,310 × 24.816 = 57.325	„
N_2	29,013 × 16.885 = 489.885	„
Избыток воздуха .	5,499 × 16.977 = 93.357	„
	825.019	кал.

825.019 кал	822.944 кал
— 781.808 „	— 781.808 „
43.211 кал	41.136 кал

$$\frac{x}{100} = \frac{41.136}{43.211}; \quad x = 95°.$$

Теоретическая температура горения получилась $t = 2195°$. В действительности для спекания клинкера нужна температура около 1500°C.

Из этого расчета легко удостовериться в преимуществах пылевидного топлива. Благодаря ничтожному избытку воздуха, нужного для горения пыли, запас тепла в цементной печи весьма значителен и соответствует:

$$2195 - 1500 = \sim 700°C,$$

т.-е. почти такой же, как в печах Сименса. Вот причина, почему на пыль теперь переводят все печи, где зола пыли не может испортить товар, т.-е. все плавильные печи, не исключая мартеновских, все печи для нагрева слитков, отжига металлических изделий и т. п.

Второй вывод, который можем сделать из этого расчета это то, что количество тепла в обожженном клинкере совсем не так велико, как принято думать. Полная утилизация этого тепла могла бы нагреть нужный для горения воздух всего до 400°C.

Лица, интересующиеся трубо-печами, получат в этом расчете все основные данные для проверки их работы.

Расчет горения кокса.

1. Состав кокса.

Состав кокса в %:		Состав кокса в молекулярных об'емах:	
C	84,23%	C — 84,23 : 12 = 7,019	мо
H_2	0,50 „	H_2 — 0,50 : 2 = 0,250	„
O_2	1,73 „	O_2 — 1,73 : 32 = 0,054	„
S	1,04 „	S — 1,04 : 32 = 0,033	„
H_2O	3,50 „	H_2O — 3,50 : 18 = 0,194	„
Зола . . .	9,00 „		
	100,00%		

По Дюлонгу состав кокса в молекулярных об'емах.

C	7,019	мо
H_2	0,250 — 0,054 × 2 = 0,142	„
S	0,033	„
H_2O	0,194 + 0,108 = 0,302	„

2. Теоретически необходимое количество воздуха (в м³) для горения 1 кг кокса.

Для горения C в CO_2 необходимо .	7,019	мо O_2		
„ „ H_2 „ H_2O	0,142 : 2 = 0,071	„ „		
„ „ S „ SO_2	0,033 × 1,5 = 0,049	„ „ [1])		
	7,139	мо O_2		
	7,139 × 3,762 = 26,857	„ N_2		
	33,996	мо возд.		

$33,996 \times 0,0224 = 0,7615$ м³

1 кг кокса требует: $0,7615 \times 10 = 7,61$ м³ воздуха.

3. Состав и количество продуктов горения (в м³) из 1 кг кокса.

CO_2	7,019	мо
H_2O	0,142 + 0,302 = 0,444	„
N_2	26,857	„
SO_2	0,033	„
	34,353	мо

$34,353 \times 0,0224 = 0,7695$ м³.

1 кг кокса дает — $0,7695 \times 10 = 7,69$ м³ продуктов горения.

4. Вес 1 м³ продуктов горения.

CO_2	7,019 × 44 =	308,836 гр
H_2O	0,444 × 18 =	7,992 „
SO_2	0,033 × 64 =	2,112 „
N_2	26,857 × 28 =	751,996 „
		1070,936 гр

$$\frac{1070,936 \times 10}{0,7695 \times 1000} = 1,392 \text{ кг.}$$

5. Материальный баланс.

Приход.

Кокса	100,000	гр
Воздуха:		
O_2	7,139 × 32 = 228,448	„
N_2	26,857 × 28 = 751,996	„
	1080,444	гр.

[1]) Во время выжига кокса FeS_2 каменного угля обращается в FeS, а потому реакция горения серы кокса должна быть написана так:

$FeS + 1,5O_2 + SiO_2 = FeO\ SiO_2 + SO_2 + 127.793$ кал.

(см. стр. 4).

Расход.

Продуктов горения . . . . 1070,936 гр.
Золы.
$9{,}000 + (0{,}049 - 0{,}033) \times 32 = 9{,}512$ „
1080,448 гр.

6. Теплотворная способность 1 кг кокса.

Горение C дает . . $7{,}019 \times 97.650 = 685.405$ кал
„ H_2 „ . . $0{,}142 = 57.810 = 8.209$ „
„ S „ . . $0{,}033 \times 127.793 = 4.217$ „
697.831 кал
Скрытая теплота испарения H_2O
$0{,}302 \times 10.550 = 3.186$ „
694.645 кал.

1 кг кокса при горении дает:
$694.645 \times 10 = \sim 6946$ Кал.

7. Теоретическая температура горения кокса при теоретическом расходе воздуха.

Продукты горения, нагретые до 2300°, содержат:
$CO_2 + SO_2$ . . . . $7{,}052 \times 28.902 = 203.817$ кал
H_2O . . . . . $0{,}444 \times 26.756 = 11.880$ „
N_2 . . . . . $26{,}857 \times 17.756 = 476.873$ „
692.570 кал.

Продукты горения, нагретые до 2400°, содержат:
$CO_2 + SO_2$ . . . $7{,}052 \times 30.276 = 213.506$ кал.
H_2O . . . . . $0{,}444 \times 28.836 = 12.803$ „
N_2 . . . . . $26{,}857 \times 18.636 = 500.507$ „
726.816 кал.

$694.645 - 692.570 = 2.075$ кал;
$726.816 - 692.570 = 34.246$ кал.
$2.075 : 34.246 = x : 100$, откуда $x = 6$°C.
$t = 2300 + 6 = 2306$°C.

ЗАДАЧА: Расчет горения кокса с таким избытком воздуха, чтобы температура пламени была равна 1600°C (температура тигельного горна для плавки стали).

1. Количество избыточного воздуха в °/₀°/₀ теоретического.

Продукты теоретического горения, нагретые до 1600°C уносят:
$CO_2 + SO_2$ . . . . $7{,}052 \times 19.269 = 135.885$ кал
H_2O . . . . . $0{,}444 \times 15.470 = 6.869$ „
N_2 . . . . . $26{,}857 \times 11.848 + 318.202$ „
460.956 кал

Количество тепла в избыточном воздухе
$694.645 - 460.956 = 233.689$ кал.
Количество воздуха
$233.689 : 11.915 = 19{,}613$ мо
$19{,}613 : 33{,}996 = x : 100$;
$x = 57{,}7$°/₀ теоретического количества воздуха.

2. Количество воздуха на 1 кг кокса.

$33{,}996 + 19{,}613 = 53{,}609$ мо воздуха.
$53{,}609 \times 0{,}0224 \times 10 = 12{,}008$ м³/кг кокса.

3. Количество продуктов горения (в м³) из 1 кг кокса.

Избыточный воздух:
$19{,}613 \times 0{,}21 = 4{,}119$ мо O_2;
$19{,}613 - 4{,}119 = 15{,}494$ мо N_2.
Продукты горения
CO_2 . . . . . 7,019 мо
H_2O . . . . . 0,444 „
SO_2 . . . . . 0,033 „
N_2 . . . . . $15{,}494 \times 26{,}857 = 42{,}351$ „
O_2 . . . . . 4,119 „
53,966 мо
$53{,}966 \times 0{,}0224 \times 10 = 12{,}088$ м³/кг.

4. Вес 1 м³ продуктов горения.

CO_2 . . . . . $7{,}019 \times 44 = 308{,}836$ гр
H_2O . . . . . $0{,}444 \times 18 = 7{,}992$ „
SO_2 . . . . . $0{,}033 \times 64 = 2{,}112$ „
N_2 . . . . . $42{,}351 \times 28 = 1185{,}828$ „
O_2 . . . . . $4{,}119 \times 32 = 131{,}808$ „
1636,576 гр

$$\frac{1636{,}576 \times 10}{12{,}088 \times 1000} = 1{,}35 \text{ кг/м}^3.$$

5. Материальный баланс.

Приход.

Кокс . . . . . 100,000 гр
Воздух:
N_2 . . . . $42{,}351 \times 28 = 1185{,}828$ „
O_2 . . . . $11{,}258 \times 32 = 360{,}256$ „
1646,084 гр

Расход.

Продуктов горения . . . . 1636,576 гр
Зола . . . . . 9,512 „
1646,088 гр.

При наличии потерь на лучеиспускание, сталеплавильные горна на коксе должны работать очень малым избытком воздуха, что достигается наличием толстого слоя кокса.

Расчет горения воздушно-сухих дров.

1. Состав дров.

Состав дров в %.		Состав дров в молекулярных об'емах.	
C	40,65%	C . . .	40,65 : 12 = 3,388 мо
H_2	4,63 „	H_2 . .	4,63 : 2 = 2,315 „
O_2	35,37 „	O_2 . .	35,37 : 32 = 1,105 „
N_2	0,24 „	N_2 . .	0,24 : 28 = 0,009 „
H_2O . . .	18,70 „	H_2O . .	18,70 : 18 = 1,039 „
Зола . . .	0,41 „		
	100,00%		

Состав в молекулярных об'емах по Дюлонгу.

C . . . . . 3,388 мо
H_2 . . . . . 2,315—1,105 × 2 = 0,105 „
N_2 . . . . . 0,009 „
H_2O . . . . . 1,039 + 2,210 = 3,249 „

2. Теоретически необходимое количество воздуха (в м³) для горения 1 кг дров.

Для горения C в CO_2 нужно . . . 3,388 мо O_2
„ „ H_2 в H_2O „ 0,105 : 2 = 0,053 „ „
3,441 мо O_2

Поступает в воздухе—3,441 × 3,762 = 12,945 „ N_2
16,386 мо возд.

16,386 × 0,0224 × 10 = 3,670 м³.

1 кг дров требует . . . 3,67 м³ воздуха.

3. Состав и количество продуктов горения (в м³) 1 кг дров при теоретически необходимом расходе воздуха.

CO_2 . . . . . 3,388 мо
H_2O . . . . . 0,105 + 3,249 = 3,354 „
N_2 . . . . . 12,945 + 0,009 = 12,954 „
19,696 мо

19,696 × 0,0224 = 0,4412 м³.

1 кг дров дает 0,4412 × 10 = 4,41 м³ продуктов горения.

4. Вес 1 м³ продуктов горения.

CO_2 . . . . . 3,388 × 44 = 149,072 гр
H_2O . . . . . 3,354 × 18 = 60,372 „
N_2 . . . . . 12,954 × 28 = 362,712 „
572,156 гр

$$\frac{572{,}156 \times 10}{4{,}412 \times 1000} = 1{,}297 \text{ кг.}$$

4. Материальный баланс

Приход.

Дров . . . . . 100,000 гр
Воздуха
O_2 . . . . . 3,441 × 32 = 110,112 „
N_2 . . . . 12,945 × 28 = 362,460 „
572,572 гр

Расход.

Продуктов горения . . . . 572,156 гр
Золы . . . . . 0,410 „
572,566 гр.

6. Теплопроизводительная способность 1 кг дров.

Теплопроизводительную способность каменного угля мы определяем руководствуясь правилом Дюлонга, т.-е. считая, что весь кислород, заключающийся в угле, соединен с водородом угля в жидкую воду и потому соответствующее количество водорода при горении угля не выделяет тепла. Теперь, если применить то же правило при расчете теплопроизводительной способности дров, то получаются количества тепла, меньшие тех, которые дает непосредственное определение на опыте в калориметре. А потому для дров надо:

или 1) вести расчет теплопроиздодительной способности по специальной эмпирической формуле данной Менделеевым:

$$Q = 81 \cdot C + 300 \cdot H - 26(O - S)$$

где C, H, O и S—обозначают содержание углерода, водорода, кислорода и серы топлива в процентах, а Q—теплопроизводительную способность 1 килограмма этого топлива;

или 2) из формулы Менделеева вычислить поправку на тепло, даваемое конституционной водой топлива и эту поправку вводить в наш расчет по Дюлонгу[1]). Мы всегда в дальнейших расчетах будем поступать по второму способу, а потому, вычислим поправку.

Допустим, что наше топливо содержит только кислород и водород в эквивалентном отношении. Процентный состав такого топлива будет: 11,11% H_2 и 88,89% O_2, а теплотворная способность одного кг по формуле Менделеева.

$$Q = 300 \cdot 11{,}11 - 26 \cdot 88{,}89 = 1022 \text{ Кал.}$$

или на 18 гр, т.-е. на 1 мо образующейся воды

$$\frac{1022.18}{1000} \cdot 1000 = 18.400 \text{ кал.}$$

[1]) Конституционной водой называется вода, входящая в состав органической массы древесины и определяемая по кислороду элементарного анализа топлива.

Такое количество тепла надо прибавлять к вычисляемой по Дюлонгу теплотворной способности дров и торфа на каждый мо воды Дюлонга.

Итак, теплотворная способность дров будет:

Горение C в CO_2—дает: 3,388 × 97.650 = 330.838 кал
„ H_2 „ H_2O— „ 0,105 × 57.810 = 6.070 „
Поправка на воду
Дюлонга . . „ 2,210 × 18.400 = 40.664 „
377.572 кал.

Скрытая теплота испарения воды
3.249 × 10.550 = 34.277 кал.
343.295 кал.

На 1 кг дров — . . . 3433 Кал. [1]).

7. Теоретическая температура горения при теоретическом расходе воздуха.

Продукты горения, нагретые до 1900°, содержат:
CO_2 . . . . . 3,388 × 23.391 = 79.249 кал
H_2O . . . . . 3,354 × 19.707 = 66.097 „
N_2 . . . . . 12,954 × 14.326 = 185.579 „
330.925 кал.

Продукты горения нагретые до 2000° содержат:
CO_2 . . . . . 3,388 × 24.770 = 83.921 кал
H_2O . . . . . 3,354 × 21.300 = 71.440 „
N_2 . . . . . 12,954 × 15.170 = 196.512 „
351.873 кал.

Интерполируем

343.295—330.925 = 12.370 кал;
351.873—330.925 = 20.948 кал.
12.370 : 20.948 = x : 100,

откуда $x = \frac{12.370 \times 100}{20.948} = 59°$.

Теоретическая температура горения $t = 1900 + 59 = 1959°$ C.

ЗАДАЧА: Расчитать горение дров с таким избытком воздуха, чтобы температура пламени была равна 1300° (температура пудлинговой печи).

1. Количество избыточного воздуха в % % теоретического.

Продукты горения при теоретическом расходе воздуха, нагретые до 1300°, содержат:
CO_2 . . . . . 3,388 × 15.275 = 51.752 кал
H_2O . . . . . 3,354 × 11.881 = 39.849 „
N_2 . . . . . 12,954 × 9.451 = 122.428 „
214.029 кал.

Теплосодержание избытка воздуха:

343.295 — 214.029 = 129.266 кал;
129.266 : 9.506 = 13,598 мо возд.
(13,598 : 16,386) × 100 = 83% теоретического количества воздуха.

2. Количество воздуха (в м³) на 1 кг дров.

Количество воздуха
16,386 + 13,598 = 29,984 мо,
или 29,984 × 0,0224 = 0,6716 м³,

1 кг дров требует:
0,6716 × 10 = ~ 6,72 м³ воздуха.

3. Состав и количество (в м³) продуктов горения из 1 кг дров.

Избыточный воздух:
13,598 × 0,21 = 2,856 мо O_2;
13,598 — 2,856 = 10,742 мо N_2.

Продукты горения
CO_2 . . . . . 3,388 мо
H_2O . . . . . 3,354 „
N_2 . . . . 12,954 + 10,742 = 23,696 „
O_2 . . . . . 2,856 „
33,294 мо

33,294 × 0,224 = 0,7458 м³

Из 1 кг дров получится 7,46 м³ продуктов горения.

4. Вес 1 м³ продуктов горения.

CO_2 . . . . 3,388 × 44 = 149,072 гр
H_2O . . . . 3,354 × 18 = 60,372 „
N_2 . . . . . 23,696 × 28 = 663,488 „
O_2 . . . . . 2,856 × 32 = 91,392 „
964,324 гр

$$\frac{964{,}324 \times 10}{7{,}458 \times 1000} = 1{,}293 \text{ кг.}$$

Если в данный расчет пудлинговой печи ввести еще потери на лучеиспускание в топке в количестве 20% выделенного там тепла, то допустимый избыток воздуха при взятых нами дровах понизится до:

$$\frac{343.295 \times 0.8 - 214.029}{9.506} = 6{,}376 \text{ мо}$$

или $\frac{6{,}376 \times 100}{16{,}386} = 39\%$.

Это указывает на большие трудности проектирования и ухода за пудлинговыми печами с обыкновенной топкой на самосохлых дровах.

[1]) Если подсчитать непосредственно по формуле Менделеева, то получается 3419 кал, т.-е. почти то же самое. Небольшая разница происходит от того, что коэффициенты в формуле Менделеева подобраны приблизительно.

ЗАДАЧА: Рассчитать горение дров в печи Померанцева.

Для плавки медных руд инж. Померанцевым была предложена печь с регенераторами и дровяными топками (см. ч. IV стр. 76).

Горение в печи идет при избытке воздуха в 50% теоретически необходимого количества, при чем воздух предварительно подогревается в регенераторах до 700°. Температура отходящих из рабочего пространства газов 1200°.

1. Количество воздуха.

Количество воздуха, идущее на 1 кг воздушно-сухих дров при избытке 50%:

$$16{,}386 + 16{,}386 \times 0{,}5 = 16{,}386 + 8{,}193 = 24{,}579 \text{ мо/100 гр},$$

или $24{,}579 \times 10 \times 0{,}0224 = 5{,}51$ м³/кг.

2. Количество продуктов горения:

$$19{,}696 + 8{,}193 = 27{,}889 \text{ мо/100 гр}$$

или $27{,}889 \times 10 \times 0{,}0224 = 6{,}25$ м³/кг.

3. Теоретическая температура горения.

Воздух подогретый до 700° внесет тепла:

$$24{,}579 \times 4.929 = 121.150 \text{ кал/100 гр}$$

Всего поступит тепла:

$$343.295 + 121.150 = 464.445 \text{ кал/100 гр.}$$

Продукты горения нагретые до 1900° содержат:

CO_2	$3{,}388 \times 23.391 =$	79.249 кал
H_2O	$3{,}354 \times 19.707 =$	66.097 „
N_2	$12{,}954 \times 14.326 =$	185.579 „
Воздух	$8{,}193 \times 14.406 =$	118.028 „
		448.953 кал.

Продукты горения нагретые до 2000° содержат:

CO_2	$3{,}388 \times 24.770 =$	83.921 кал
H_2	$3{,}354 \times 21.300 =$	71.440 „
N_2	$12{,}954 \times 15.170 =$	196.512 „
Воздух	$8{,}193 \times 15.254 =$	124.976 „
		476.849 кал.

476.849 кал	464.445 кал
− 448.953 „	− 448.953 „
27.896 кал	15.492 кал

$$\frac{15.492}{27.896} = \frac{x}{100}; \quad x = 56°.$$

Теоретическая температура горения в печи $t = 1900 + 56 = 1956°$C.

Общее падение температуры в печи будет $1956 - 1200 = 756°$

Задавшись падением температуры в секунду 200—250° мы можем расчитывать печь на время пребывания печных газов в рабочем пространстве печи 3—3½ секунды.

Из этого расчета ясно видна выгода подогрева первичного и вторичного воздуха, ибо проводя процесс газообразования отдельно в дровяных генераторах мы при горячем газе и том же нагреве воздуха получим теоретическую температуру горения около 1750°, т.-е. значительно ниже (см. расчеты генераторного газа). Печь Померанцева имеет те же выгоды, как печи на пылевидном топливе, хотя употребление пыли еще выгоднее, ибо пыль для горения требует меньше избытка воздуха. В конструктивном отношении идея Померанцева встречает трудности при ее осуществлении (см. часть IV стр. 76).

Расчет горения сушеных дров с 6% влаги[1]).

1. Состав дров.

Состав дров в гр.		Состав в мо по Дюлонгу.
C	40,65 гр	3,388 мо
H_2	4,63 „	0,105 „
O_2	35,37 „	—
N_2	0,24 „	0,009 „
H_2O	5,19 „	2,498 „
Зола	0,41 „	
	86,49 гр.	

2. Теоретически необходимое количество воздуха (в м³) для горения 1 кг дров.

$$\frac{3{,}67 \times 100}{86{,}49} = 4{,}24 \text{ м}^3 \text{ воздуха.}$$

3. Состав и количество продуктов горения (в м³) из 1 кг дров.

CO_2	3,388 мо
H_2O	$2{,}498 + 0{,}105 =$ 2,603 „
N_2	12,954 „
	18,945 мо

$$\frac{18{,}945 \times 0{,}0224 \times 1000}{86{,}49} = 4{,}91 \text{ м}^3.$$

4. Вес 1 м³ продуктов горения.

CO_2	$3{,}388 \times 44 =$	149,072 гр
H_2O	$2{,}603 \times 18 =$	46,854 „
N_2	$12{,}954 \times 28 =$	362,712 „
		558,638 гр

$$\frac{558{,}638}{86{,}49 \times 4{,}91} = 1{,}32 \text{ кг/м}^3.$$

[1]) См. выше: «Расчет горения воздушно-сухих дров».

5. Теплотворная способность 1 кг подсушенных дров.

По предыдущему 86,49 гр дают:
от горения C и H_2 . . . . . 377.572 кал
Тратится на испарение воды Дюлонга и влажности: 2,498 = 10.550 = 26.354 „
351.218 кал.

$$\frac{351{,}218 \times 1000}{86{,}49} = 4060 \text{ Кал.}$$

6. Теоретическая температура горения при теоретическом расходе воздуха.

Продукты горения, нагретые до 2000°C содержат:

CO_2 . . 3,388 × 24.770 = 83.921 кал
H_2O . . 2,603 × 21.300 = 55.444 „
N_2 . . . 12,954 × 15.170 = 196.512 „
335.877 кал.

Продукты горения, нагретые до 2100°C содержат:

CO_2 . . 3,388 × 26.147 = 88.586 кал
H_2O . . 2,603 × 22.999 = 59.866 „
N_2 . . . 12,954 × 16.023 = 207.562 „
356.014 кал.

356.014 кал	351.218 кал
— 335.877 „	— 335.877 „ ×
20.137 кал	15.341 кал

$$\frac{x}{100} = \frac{15.341}{20.137}; \quad x = 76°$$

$$t = 2000 + 76 = 2076°\text{C}.$$

Итак процесс сушки дров повысил теоретическую температуру горения дров с 1959°C для самосохлых до 2076°C для сушеных. Разница не столь большая, не оправдывающая весьма больших расходов на сушку.

Эта разница может быть компенсирована лучшим устройством топки. Действительность подтверждает этот вывод,—во многих заводах сушеные дрова заменяются самосохлыми при лучшем устройстве топки.

ЗАДАЧА: Расчитать горение дров с таким количеством избыточного воздуха, чтобы температура пламени была равна 1400°C (температура сварочной печи).

1. Количество воздуха в °/₀°/₀ теоретического.

Продукты горения при теоретическом расходе воздуха, нагретые до 1400° содержат:

CO_2 . . 3,388 × 16.607 = 56.265 кал
H_2O . . 2,603 × 13.019 = 33.888 „
N_2 . . . 12,954 × 10.241 = 132.662 „
222.815 кал.

351.218 − 222.815 = 128.403 кал
128.403 : 10.300 = 12,466 мо воздуха
или (12,466 : 16,386) × 100 = 76,1°/₀ теоретического количества воздуха.

2. Количество воздуха на 1 кг дров.

16,386 + 12,466 = 28,852 мо возд.
28,852 × 0,0224 = 0,6463 м³

$$\frac{0{,}6463 \times 1000}{86{,}49} = 7{,}47 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3. Состав и количество продуктов горения на 1 кг дров.

Избыточный воздух:

12,466 × 0,21 = 2,618 мо O_2;
12,466 − 2,618 + 9,848 мо N_2.

Продукты горения:

CO_2 . . . . . 3,388 мо
H_2O . . . . . 2,603 „
N_2 . . . . 12,954 × 9,848 = 22,802 „
O_2 . . . . . 2,618 „
31,411 мо

$$\frac{31{,}411 \times 0{,}0224 \times 1000}{86{,}49} = 8{,}135 \text{ м}^3.$$

4. Вес 1 м³ продуктов горения.

CO_2 . . . . . 3,388 × 44 = 149,072 гр
H_2O . . . . . 2,603 × 18 = 46,854 „
N_2 . . . . . 22,802 × 28 = 638,456 „
O_2 . . . . . 2,618 = 32 = 83,776 „
918,158 гр

$$\frac{918{,}158}{86{,}49 \times 8{,}135} = 1{,}305 \text{ кг/м}^3.$$

Учитывая лучеиспускание в топке в количестве 20°/₀ получим допустимый избыток:

$$\frac{351.218 \times 0{,}8 - 222.815}{10.300} = 5{,}647 \text{ мо}$$

$$\text{или } \frac{5{,}647 \times 100}{16{,}386} = 34{,}5\%.$$

Сравнивая эти результаты с результатами работы топки пудлинговой печи, мы приходим к выводу, что пудлинговая топка с температурой 1300° делается пригодной для применения к сварочной печи с температурой 1400° при употреблении сухих дров, что в заводах действительно и наблюдалось.

Расчет горения нефти.

1. Состав нефти.

Состав нефти в %. Состав нефти в молекулярных об'емах.

C	86,5%	C . .	86,5 : 12 = 7,208 мо
H_2	12,0 „	H_2 . .	12,0 : 2 = 6,000 „
O_2	1,5 „	O_2 . .	1,5 : 32 = 0,047 „
	100,0%		

Состав в мо по Дюлонгу.

C	7,208 мо
H_2	6,000 — (2 × 0,047) = 5,906 „
H_2O	0,094 „

2. Теоретически необходимое количество воздуха (в м³) для горения 1 кг нефти.

C для горения в CO_2 требует . . 7,208 мо O_2
H_2 „ „ „ H_2O „ 5,906 : 2 = 2,953 „ „
10,161 мо O_2
10,161 × 3,762 = 38,226 „ N_2
48,387 мо воздуха.

48,387 × 0,0224 = 10,84 м³.

3. Состав и количество продуктов горения (в м³) на 1 кг нефти.

CO_2	7,208 мо
H_2O	0,094 + 5,906 = 6,000 „
N_2	38,226 „
	51,434 мо

51,434 × 0,0224 × 10 = 11,52 м³.

4. Вес 1 м³ продуктов горения.

CO_2	7,208 × 44 = 317,152 гр
H_2O	6,000 × 18 = 108,000 „
N_2	38,226 × 28 = 1070,328 „
	1495,480 гр

$$\frac{1495{,}480 \times 10}{11{,}521 \times 1000} = 1{,}30 \text{ кг.}$$

5. Материальный баланс топки.

Приход:

Нефти	100,000 гр
Воздуха	
O_2	10,161 × 32 = 325,152 „
N_2	38,222 × 28 = 1070,328 „
	1495,480 гр

Расход:

Продуктов горения	1495,480 гр
	1495,480 гр.

6. Теплопроизводительная способность 1 кг нефти.

C сгорая в CO_2, выделяет
7,208 × 97.650 = 703.861 кал
H_2 сгорая в H_2O выделяет
5,906 × 57.810 = 341.426 „
1.045.287 кал

Скрытая теплота испарения
0,094 × 10.550 = — 992 „
1.044.295 кал.

1.044,295 × 10 = 10443 Кал.

7. Теоретическая температура горения при теоретическом расходе воздуха.

Продукты горения, нагретые до 2200°C, содержат:

CO_2 . .	7,208 × 27.526 = 198.407 кал
H_2O . .	6,000 × 24.816 = 148.896 „
N_2 . . .	38,226 × 16.885 = 645.446 „
	992.749 кал.

Продукты горения, нагретые до 2300°C, содержат:

CO_2 . .	7,208 × 28.902 = 208.326 кал
H_2O . .	6,000 × 26.756 = 160.536 „
N_2 . . .	38,226 × 17.756 = 678.741 „
	1.047.603 кал.

1.044.295 кал	1.047.603 кал
— 992.749 „	— 992.749 „
51.546 кал	54.854 кал

$$\frac{x}{100} = \frac{51.546}{54.854};\ x = 94°$$

$t = 2200 + 94 = 2294°C.$

ЗАДАЧА: Расчитать горение нефти при расходе воздуха в 1½ раза большем теоретического.

1. Количество воздуха (в м³) на 1 кг нефти.

Избыток воздуха
48,387 : 2 = 24,194 мо.

Количество воздуха
48,387 + 24,194 = 72,581 мо
72,581 × 0,0224 = 1,6258 м³;
1,6258 × 10 = 16,258 = ~ 16,26 м³.

2. Состав и количество продуктов горения (в м³) из 1 кг нефти.

Избыточный воздух:

$24{,}194 \times 0{,}21 = 5{,}081$ мо O_2

$24{,}194 - 5{,}081 = 19{,}113$ мо N_2;

CO_2	7,208	мо
H_2O	6,000	„
N_2 . . 38,226 + 19,113 =	57,339	„
O_2	5,081	„
	75,628	мо.

$75{,}628 \times 0{,}0224 \times 10 = 16{,}94$ м³.

3. Вес 1 м³ продуктов горения.

CO_2	$7{,}208 \times 44 =$	317,152 гр
H_2O	$6{,}000 \times 18 =$	108,000 „
N_2	$57{,}339 \times 28 =$	1605,492 „
O_2	$5{,}081 \times 32 =$	162,592 „
		2193,236 гр.

$$\frac{2193{,}236 \times 10}{16{,}94 \times 1000} = 1{,}2946 = \sim 1{,}29 \text{ кг.}$$

4. Теоретическая температура горения.

Продукты горения, нагретые до 1700°С, содержат:

CO_2 . .	$7{,}208 \times 20.640 =$	148.773 кал
H_2O . .	$6{,}000 \times 16.801 =$	100.806 „
N_2 . .	$57{,}339 \times 12.665 =$	726.198 „
O_2 . .	$5{,}081 \times 13.005 =$	66.078 „
		1.041.855 кал.

Продукты горения, нагретые до 1800°С, содержат:

CO_2 . .	$7{,}208 \times 22.014 =$	158.677 кал
H_2O . .	$6{,}000 \times 18.209 =$	109.254 „
N_2 . .	$57{,}339 \times 13.491 =$	773.560 „
O_2 . .	$5{,}081 \times 13.851 =$	70.377 „
		1.111.868 кал.

1.111.868 кал	1.044.295 кал
1.041.855 „	1.041.855 „
70.013 кал	2.440 кал

$$\frac{x}{100} = \frac{2.440}{70.013};\ x = 3°$$

$t = 1700 + 3 = 1703$°С.

ЗАДАЧА. Сравнить горение нефти в капельниковой топке и при распыливании ее в паровой форсунке.

Капельниковая нефтяная топка была применена автором в печах для варки оптического стекла (см. ч. IV стр. 95—98). Печи эти регенеративные; воздух подогревается до 1000°; расход его в полуторном количестве против теоретически необходимого. Нефть поступает в печь каплями и навстречу ей поднимается струя нагретого воздуха. Продукты горения уходят из печи при 1500° в регенератор.

1. Количество воздуха идущее на 1 кг нефти:

$48{,}387 + 48{,}387 \times 0{,}5 = 48{,}387 + 24{,}194 = 72{,}581$ мо/100 гр

или $72{,}581 \times 10 \times 0{,}0224 = 16{,}26$ м³/кг нефти.

2. Количество продуктов горения:

$51{,}434 + 24{,}194 = 75{,}628$ мо/100 гр

или $75{,}628 \times 10 \times 0{,}0224 = 16{,}94$ м³/кг нефти.

Тепло, вносимое подогретым до 1000° воздухом:

$72{,}581 \times 7.177 = 520.914$ кал.

3. Теоретическая температура горения.

Всего вносится тепла:

$1.044.295 + 520.914 = 1.565.209$ кал.

Продукты горения, нагретые до 2400°С, содержат:

CO_2 . . .	$7{,}208 \times 30.276 =$	218.229 кал
H_2O . . .	$6{,}000 \times 28.836 =$	173.016 „
N_2 . . .	$38{,}226 \times 18.636 =$	712.380 „
Воздух . .	$24{,}194 \times 18.737 =$	453.323 „
		1.556.948 кал.

Продукты горения, нагретые до 2500°С, содержат:

CO_2 . . .	$7{,}208 \times 31.650 =$	228.133 кал
H_2O . . .	$6{,}000 \times 31.062 =$	186.372 „
N_2 . . .	$38{,}226 \times 19.525 =$	746.363 „
Воздух . .	$24{,}194 \times 19.630 =$	474.928 „
		1.635.796 кал.

1.635.796 кал	1.565.209 кал
1.556.948 „	1.556.948 „
78.848 кал	8.261 кал

$$\frac{x}{100} = \frac{8.261}{78.848};\ x = 10°$$

Теоретическая температура пламени

$t = 2400 + 10 = 2410$°С.

4. Теплоотдача газов в рабочем пространстве.

Продукты горения, нагретые до 1500°С, уносят тепла из печи:

CO_2 . . .	$7{,}208 \times 17.938 =$	129.297 кал
H_2O . . .	$6{,}000 \times 14.212 =$	85.272 „
N_2 . . .	$38{,}226 \times 11.040 =$	422.015 „
Воздух . .	$24{,}194 \times 11.103 =$	268.626 „
		905.210 кал.

Отдается газами в рабочем пространстве печи:

$$1.565.209 - 905.210 = 659.999 \text{ кал/100 гр нефти}$$

или $\frac{659.999}{1.044.295} \times 100 = 63{,}2\%$ теплопроизводительной способности нефти.

Теперь возьмем те же условия работы печи, но нефть будем распыливать паром, расходуя пара 72% от веса нефти [1]).

1. Количество воздуха, идущее на 1 кг нефти то же 72,581 мо/100 гр или 16,26 м³/кг.

2. Количество продуктов горения увеличится на об'ем вдуваемого пара. На 100 гр нефти идет 72 гр или

$$72 : 18 = 4{,}000 \text{ мо воды.}$$
$$75{,}628 + 4{,}000 = 79{,}628 \text{ мо/100 гр}$$
$$\text{или } 79{,}628 \times 10 \times 0{,}0224 = 17{,}84 \text{ м}^3\text{/кг.}$$

Тепло, вносимое паром, считать не будем, ибо при расширении пара в форсунке расходуется теплота и можно допустить, что тепло пара эквивалентно работе расширения.

Приход тепла останется тот же—1.565.209 кал.

3. Теоретическая температура горения.

Продукты горения, нагретые до 2300°C, содержат:

CO_2	$7{,}208 \times 28.902 =$	208.326 кал
H_2O . . .	$6{,}000 + 4{,}000 =$	
	$= 10{,}000 \times 26.756 =$	267.560 „
N_2	$38{,}226 \times 17.756 =$	678.741 „
Воздух	$24{,}194 \times 17.853 =$	431.935 „
		1.586.562 кал.

Продукты горения, нагретые до 2200°C, содержат:

CO_2	$7{,}208 \times 27.526 =$	198.407 кал
H_2O	$10{,}000 \times 24.816 =$	248.160 „
N_2	$38{,}226 \times 16.885 =$	645.446 „
Воздух . . .	$24{,}194 \times 16.977 =$	410.742 „
		1.502.755 кал.

1.586.562 кал	1.565.209 кал
— 1.502.755 „	— 1.502.755 „
83.807 кал	62.454 кал

$$\frac{x}{100} = \frac{62.454}{83.807}; \quad x = 75°$$

Теоретическая температура пламени

$$t = 2200 + 75 = 2275°\text{C.}$$

4. Теплоотдача нефти в рабочем пространстве.

Продукты горения, нагретые до 1500°C, уносят:

CO_2 . . .	$7{,}208 \times 17.938 =$	129.297 кал
H_2O . . .	$10{,}000 \times 14.212 =$	142.120 „
N_2 . . .	$38{,}226 \times 11.040 =$	422.015 „
Воздух .	$24{,}194 \times 11.103 =$	268.626 „
		962.058 кал.

Отдается газами в рабочем пространстве печи:

$$1.565.209 - 962.058 = 603.151 \text{ кал/100 гр}$$

или $\frac{603.151}{1.044.295} \times 100 = 57{,}8\%$ теплопроизводительной способности нефти.

Как видно, пар уменьшает использование тепла от горения нефти.

Иногда нефть распыливается не паром, а воздухом [1]). В этом случае излишнего балласта в газах в виде водяного пара не будет, но зато воздух, идущий в форсунку, уже не может быть подогрет в регенераторах.

ГЛАВА VI.

Расчеты генераторного газа.

Пояснения к расчету генераторного газа.

Сущность генераторного процесса заключается в превращении твердого топлива в газообразное. Воздух, вступающий в генератор, встречает толстый слой раскаленного кокса или древесного угля и первоначальная реакция горения углерода

$$C + O_2 = CO_2 + 97.650 \text{ кал}, \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

в верхних частях этого слоя, сменяется реакцией

$$CO_2 + C = 2CO - 38.790 \text{ кал} \quad . \quad . \quad (2).$$

В конечном результате получается

$$2C + O_2 = 2CO + 97.650 - 38.790 =$$
$$= 2CO + 58.860 \text{ кал.}$$

или

$$C + {}^1/_2\, O_2 = CO + 29.430 \text{ кал.} \quad . \quad . \quad . \quad (3).$$

---

[1]) Расход пара в 72% от веса нефти это средний практический. При особенно хорошем уходе за форсункой и печью, расход пара может быть понижен до 30% веса нефти, а расход воздуха до 1,2 теоретически необходимого количества.

[1]) В случае воздуха можно считать, что вес идущего для распыления нефти воздуха превышает вес пара в отношении весов одного и того же об'ема 29 и 18.

Определим температуру получающейся CO, при условии, что горение происходит в воздухе и температура кокса спускающегося сверху к колосникам равна 1000°C.

Имеем:

$$C + {}^1/_2O_2 + \frac{3{,}762}{2}N_2 = CO + \frac{3{,}762}{2}N_2 + 29.430 \text{ кал.}$$

Теплота кокса:

$$Q = P \cdot c_o^t \quad t = 12 \cdot c_o^{1000} \cdot 1000 =$$
$$= 12 \times 0{,}363 \times 1000 = 4.356 \text{ кал.}$$

Сумма тепла:

$$29.430 + 4.356 = 33.786 \text{ кал.}$$

Если считать лучеиспускание колосниковой решетки равным нулю, то максимальная температура смеси: 1,881 мо N_2 + 1 мо CO определится так: при 1500°C смесь содержит тепла

$$2{,}881 \times 11.040 = 31.806 \text{ кал,}$$

при 1600°C

$$2{,}881 \times 11.848 = 34.134 \text{ кал.}$$

Интерполируем:

34.134 кал	33.786 кал
31.806 „	31.806 „
2.328 кал	1.980 кал

$$\frac{x}{100} = \frac{1.980}{2.328};\ x = 85°$$

$$t = 1500 + 85 = 1585°C.$$

Если отчислить на лучеиспускание очага горения 20% выделенного в горне тепла, то получим температуру, более близкую к действительности.

Остается тепла: $0{,}8 \times 33.786 = 27.029$ кал.

Температура в горне 1291°C, т.-е. около 1300°C.

За исключением случаев, когда генераторы работают с расплавлением золы, и когда температура в пределах 1300°—1500° в горне желательна, нет никакой необходимости иметь в горне такую высокую температуру.

Действительно, условия равновесия CO, CO_2 и C, в зависимости от температуры таковы [1])

Температура	CO	CO_2
400°	0,01	0,99
500°	0,05	0,95
600°	0,23	0,77
700°	0,57	0,43
800°	0,87	0,13
900°	0,97	0,03
1000°	0,99	0,01

[1]) Le-Chatelier. Intr. de la Met. 88.

т.-е. окись углерода при 400° разлагается по реакции:

$$2CO = CO_2 + C\ ^1)$$

с выделением сажистого углерода в присутствии окислов железа, играющих роль катализаторов. Но реакция эта идет не до конца, и в смеси CO и CO_2 на один об'ем смеси при 400° приходится 0,01 об'емов CO. При 700° количество окиси углерода увеличивается до 0,57 об'ема. При еще более высоких температурах количество окиси углерода больше, чем углекислоты и при 1000°C количество углекислоты падает до 0,01 об'ема, т.-е. практически говоря смесь состоит почти из одной окиси углерода. Итак, если мы в горне генератора будем иметь температуру в 1000°C, то горение будет иметь своим результатом почти чистую окись углерода.

Правда, если времени будет недостаточно, то превращение углекислоты в окись углерода по реакции

$$CO_2 + C = 2CO - 38.790 \text{ кал.} \quad . \ . \ . \ (2)$$

несколько задержится и углекислоты будет несколько больше.

Итак нам необходимо иметь в горне генератора только 1000°C. Температура 1300°—1500°, которая получается при горении кокса в CO, нам не нужна, ибо результатом чрезвычайно высокой температуры горна будет выделение на колошнике физически горячего генераторного газа, что в большинстве случаев невыгодно, так как уменьшает работу регенераторов газовых печей.

Практика пользуется избытком температуры горна выше 1000°C для разложения паров воды [2]) и для увеличения в газе количества водорода по реакции

$$H_2O_{пар} + C = CO + H_2 - 23.380 \text{ кал.} \quad . \ . \ (4)$$

Условия равновесия этой реакции таковы [3]):

Температура	$H_2 : H_2O$
500°	0,42
600°	2,3
700°	6,2
800°	13,6
900°	45,0
1000°	103,0

т.-е. при 1000° пары воды, почти сполна превращаются в водород и окись углерода; на один об'ем паров воды приходится при 1000°—103 об'ема во-

[1]) Это так-называемая реакция Б э л я, идущая в верх. них горизонтах доменных печей.

[2]) О практическом осуществлении подвода пара под колосники и об измерении количества подводимого пара, см. часть IV стр. 6 и 7.

[3]) По Boudoird'y и Haber'y (Le-Chatelier 328).

дорода. При 500° пары воды слабо действуют на углерод и на 1 об'ем паров воды приходится только 0,42 об'ема водорода.

Если иметь в горне генератора 1000°С, то почти все пары воды превращаются в водород и окись углерода. Более высокую температуру иметь нет нужды.

В горн генератора надо вводить столько паров воды, чтобы температура понизилась бы до 1000°, тогда газ будет заключать в себе очень немного CO_2 и H_2O и температура его будет наименьшая.

Кроме этих двух реакций, идущих в горне генератора, в его шахте может итти еще реакция взаимодействия CO и H_2O, а именно:

$$CO + H_2O_{пар} = CO_2 + H_2 + 10.410 \text{ кал}, \quad . (5)$$

или $$CO + H_2O_{жид} = CO_2 + H_2 - 140 \text{ кал}. \quad . . (6)$$

Условия равновесия четырех газов этой реакции в зависимости от температуры таковы:

Температура	$\frac{CO \times H_2O}{CO_2 \times H_2}$
500°	0,25
600°	0,41
700°	0,59
800°	0,88
900°	1,20
1000°	1,60

Увеличивая влажность генераторного газа, мы в то же время увеличиваем развитие этой реакции и при очень влажном газе получаем газ с большим содержанием CO_2. Примером такого газа является газ Монда. В интересах извлечения из каменного угля $(NH_4)_2SO_4$, Монд понижает температуру в горне генератора до 900°, вдувая избыток пара и получает значительное количество паров воды и CO_2 в генераторном газе.

Обыкновенно принято говорить, что при процессе Монда получается плохой генераторный газ; но это несправедливо, что видно из такого примера:

имеем генераторный газ

CO_2 — 5%
CO — 20%
H_2 — 12%
H_2O — 13%
N_2 — 50%

он совершенно равноценен газу

CO_2 — 12%
CO — 13%
H_2 — 19%
H_2O — 6%
N_2 — 50%

в котором завершилась реакция

$$7\,CO + 7\,H_2O = 7\,CO_2 + 7\,H_2$$

Когда эта реакция идет за счет жидкой воды Дюлонга или жидкой воды влажности угля (например, в бурых углях), то она, происходя с тепловым эффектом почти равным нулю, меняет только внешний вид анализа газа, не меняя его температуры и теплотворной способности.

Теперь вполне очевидно, что суждение о генераторном газе по %% содержанию углекислоты неправильно и должно быть оставлено.

Таким образом мы пришли к выводу, что при обыденной работе генератора выгодно под колосники подводить пары воды. Если мы этого не сделаем, то получим на колошнике генераторный газ высокой температуры. В большинстве случаев, когда газ служит для нагрева регенеративных печей Сименса, такое повышение температуры газа невыгодно. Оно бесполезно повышает температуру низа регенеративной решетки и, следовательно, температуру дыма. Получение газа повышенной температуры выгодно только в применении к полугазовым печам или печам Сименса с одними воздушными регенераторами, где может быть сполна использована физическая теплота генераторного газа. Для печей Сименса с воздушными и газовыми регенераторами выгоднее получить генераторный газ возможно более низкой температуры, но обогащенный водородом разложенной на колосниках воды.

На колосниках кроме реакций горения углерода идет реакция окисления сернистого железа, полученного из колчедана в верхних частях шахты генератора:

$$FeS + 1{,}5\,O_2 + SiO_2 = Fe\,SiO_3 + SO_2 + 127.793 \text{ кал}. \quad (7)$$

В верхних частях шахты идут кроме перечисленных выше еще следующие реакции:

$$C + 2H_2 = CH_4 + 20.870 \text{ кал}, \ . \ . \ . \ . \ (8)$$
$$FeS_2 = FeS + S - 16.700 \text{ кал}, \ . \ . \ . \ . \ (9)$$

испарение гигроскопической влаги — 10.550 кал и выделение H_2 как продукта сухой перегонки.

Таким образом мы пришли к выводу, что количество угольной кислоты в генераторном газе главным образом есть следствие реакции

$$CO + H_2O = CO_2 + H_2,$$

которую можно рассматриват, как введение влажности в химический состав газа. Если газ не подвергается осушке, то очевидно качество его не изменяется от обогащения углекислотой и произвольное задание количества углекислоты в расчете газа не может влиять ни на качество газа, ни на количество разложенной на колосниках воды. Количество углекислоты бывает обыкновенно от 3 до 6%; в этих пределах и можно задаваться содержанием CO_2 в генераторном газе.

Можно обосновывать содержание углекислоты в генераторном газе и иначе: на количество углекислоты можно смотреть как на функцию содержания в горючем химически связанной воды и влажности дутья. Поэтому в газе дровяном, торфяном и буро-угольном, с одной стороны, и газе Монда, полученном на пересыщенном парами воды дутье — с другой, угольной кислоты получается больше, чем в газе каменноугольном или антрацитном. Мы можем считать, что в реакции:

$$CO + H_2O_{жид} = CO_2 + H_2 - 140 \text{ кал}$$

участвует при бурых углях вся конституционная вода (вода Дюлонга), при торфе — половина ее, а при дровах—одна треть; тогда мы получим по составу газы, тоже близкие к действительно получаемым в генераторах.

Я нарочно так долго останавливаюсь на вопросе об угольной кислоте в генераторном газе, чтобы читателю было совершенно ясно, что количество углекислоты в генераторном газе действительно может колебаться в широких пределах без влияния на качество и расчет генераторного газа, и что задаваясь количеством угольной кислоты в $^1/_5$ или $^1/_{10}$ содержания углерода в 100 гр горючего, мы не делаем никакой натяжки, не вводим в расчет искусственности или произвола и не влияем на решение основной задачи вычисления генераторного газа —определения количества воды, разложенной на колосниках.

То же должно сказать и о метане. Реакции разложения горючего с выделением метана нам неизвестны. Повидимому, более жирные горючие, в которых больше водорода смол в генераторах, дают и большее количество метана. Однако обыкновенно количество метана не более 1—2% т.-е. от $^1/_{15}$ до $^1/_{30}$ содержания углерода в 100 частях каменного угля. Для более жирного горючего надо брать первую цифру, для тощего—вторую.

Впрочем, повидимому, на количество метана имеет влияние быстрота процесса сухой перегонки в генераторах. Медленно идущие генераторы дают генераторный газ более бедный метаном.

После этих предварительных замечаний перехожу к изложению метода, элементарного приближенного расчета газа.

Расчет генераторного газа из каменного угля.

1. Состав угля

Состав угля в %%		В молекулярных об'емах.
C	72,49%	: 12 = 6,041 мо
H_2	6,39 „	: 2 = 3,195 „
O_2	8,72 „	: 32 = 0,273 „
H_2O	6,00 „[1]	: 18 = 0,333 „
N_2	1,69 „	: 28 = 0,060 „
S	1,15 „	: 32 = 0,036 „
Зола	6,16 „	
	102,60%	

Состав угля в молекулярных об'емах по Дюлонгу[2])

C	6,041 мо
H_2	3,195 — 2 × 0,273 = 2,649 „
H_2O	0,333 + 2 × 0,273 = 0,879 „
N_2	0,060 „
S	0,036 „

[1]) В них 2,6 рудничной сырости.

[2]) На основании правила Дюлонга весь кислород угля принимается соединенным с соответствующим количеством водорода в жидкую воду (также см. стр. 30).

2. Определение состава генераторного газа.

		На колосниках.	В газопроводе.
CH_4	$^1/_{15} \times 6,041 = 0,403$ мо [1])	—	0,403 мо
CO_2	$^1/_{10} \times 6,041 = 0,604$ мо [2])	—	0,604
CO	$6,041 - 0,403 = 5,638$ мо	5,638 мо	—
	$5,638 - 0,604 = 5,034$ мо	—	5,034
H_2	Получается по реакциям:		
	$C + H_2O_{пар} = CO + H_2$ . . . . . x мо		
	$CO + H_2O_{пар} = CO_2 + H_2$ 0,604		
	Из каменного угля 2,649		
	$3,253 + x$ мо		
	На образование метана — $0,403 \times 2 =$ 0,806		
	$2,447 + x$ мо	x	$2,447 + x$

[1]) От $^1/_{30}$ до $^1/_{15}$ количества углерода (см. выше).

[2]) От $^1/_{10}$ до $^1/_4$ количества углерода (см. выше).

		На колосниках.	В газопроводе.
S_6 [1]	От разложения FeS_2 на FeS и S: $0{,}036 : (2 \times 6) = 0{,}003$ мо	—	0,003
SO_2	По реакции: $FeS + 1{,}5\ O_2 + SiO_2 = FeOSiO_3 + SO_2$ $0{,}036 : 2 = 0{,}018$ мо	0,018	0,018
N_2	По реакции $C + {}^1/_2O_2 = CO$ поступает в составе воздуха: $\frac{3{,}762}{2}(5{,}638 - x) = 10{,}605 - 1{,}881\ x$ мо		
	Вместе с воздухом для горения серы поступает $1{,}5 \times 0{,}018 \times 3{,}762 = 0{,}102$		
	$10{,}707 - 1{,}881\ x$ мо	$10{,}707 - 1{,}881\ x$	—
	Из каменного угля 0,060		
	$10{,}767 - 1{,}881\ x$ мо	—	$10{,}707 - 1{,}881\ x$
H_2O	Об'ем сухого газа в газопроводе:		
	CH_4 0,403		
	CO_2 0,604		
	CO 5,034		
	H_2 . . . . . $2{,}447 + x$		
	S_6 0,003		
	SO_2 0,018		
	N_2 . . . . . $10{,}767 - 1{,}881\ x$		
	$19{,}276 - 0{,}881\ x$ мо		
	Примем влажность газа 50 гр H_2O на 1 м³ сухого газа [2]		
	или $50 : 18 = 2{,}778$ мо.		
	На 1 мо газа: $2{,}778 : 44{,}64$ [3] $= 0{,}0622$ мо влажности.		
	Всего влажности в газе из 102,60 гр угля $(19{,}276 - 0{,}881\ x)\ 0{,}0622 = 1{,}199 - 0{,}055\ x$ мо	—	$1{,}199 - 0{,}055\ x$
	Для реакции $C + H_2O_{пар} = CO + H_2$ необходимо . . . . . $+ x$		
	Для реакции $CO + H_2O_{пар} = CO_2 + H_2$: $-0{,}604$		
	$1{,}803 + 0{,}945\ x$ мо		
	Имеется воды . . . . . $-0{,}879$		
	Нужно доставить . . . . . $0{,}924 + 0{,}945\ x$ мо		
	На колосниках разлагается . . $- x$		
	Остается . . . $0{,}924 - 0{,}055\ x$ мо	$0{,}924 - 0{,}055\ x$	—

[1]) Сера в парах шестиатомна.

[2]) По наблюдениям от 30 до 60 гр в 1 м³ газа. Результаты отдельных расчетов будут более согласованы, если задаваться не конечной влажностью газа, которая должна вариировать в зависимости от влаги угля, а процентами того пара, который в силу физико-химических условий проходит через колосники неразложившись (см. далее расчет генераторного газа из дров).

[3]) В 1 м³ заключается $\frac{1}{0{,}0224} = 44{,}64$ мо.

Составление и решение уравнения.

Состав газа на колосниках:

CO 5,638
H_2 x
SO_2 0,018
N_2 . . . . . $10{,}707 - 1{,}881\,x$
H_2O . . . . . $0{,}924 - 0{,}055\,x$

Газ нагретый до 1000°C уносит тепла:

$CO + N_2 + H_2$
$(16{,}345 - 0{,}881\,x) \times 7.135 = 116.622 - 6.286\,x$ кал
H_2O
$(0{,}924 - 0{,}055\,x) \times 8.750 = 8.085 - 481\,x$ „
SO_2 . . . . . $0{,}018 \times 11.317 = 204$ „

$124.911 - 6.767\,x$ кал.

Реакции, на колосниках, выделяют тепла

$C + {}^1/_2\,O_2 = CO$
$(5{,}638 - x)\ 29.430 = 165.926 - 29.430\,x$ кал
$C + H_2O_{пар} = CO + H_2$ . . . . . $-28.380\,x$ „
$FeS + 1{,}5\,O_2 + SiO_2 = FeSiO_3 + SO_2$ „
$0{,}018 \times 127.793 = + 2.300$ „

$168.226 - 57.810\,x$ кал.

Кокс приносит тепла:

$5{,}638 \times 12 \times 0{,}363 \times 1000 = 24.559$ кал.

Всего тепла на колосниках:

$192{,}785 - 57{,}810\,x$ кал.

Количество выделенного тепла = количеству тепла, унесенному газами + количество тепла, истраченное на лучеиспускание [1]), т.-е.

$$192{,}785 - 57{,}810\,x = (124{,}911 - 6{,}767\,x) + 0{,}2\,(192{,}785 - 57{,}810\,x)$$

откуда $x = 0{,}743$ мо

Состав газа:	в мо		в %
CH_4	0,403	мо	2,04 %
CO_2	0,604	„	3,05 „
CO	5,034	„	25,45 „
H_2	3,190	„	16,13 „
S_6	0,003	„	0,01 „
SO_2	0,018	„	0,09 „
N_2	9,369	„	47,37 „
H_2O	1,158	„	5,86 „
	19,779	мо	100,00 %

[1]) Лучеиспускание на колосниках принимается равным 20% выделенного на них тепла. Лучеиспускание же всего генератора принимается равным 40% от всего выделенного в нем тепла.

3. Поверка состава генераторного газа.

Количество химических элементов в 100 об'емах газа:

		C	O_2	H_2	N_2
CH_4 . . .	2,04	2,04	—	4,08	—
CO_2 . . .	3,05	3,05	3,05	—	—
CO . . .	25,45	25,45	12,72	—	—
H_2 . . .	16,13	—	—	16,13	—
S_6 . . .	0,01	—	—	—	—
SO_2 . . .	0,09	—	0,09	—	—
N_2 . . .	47,37	—	—	—	47,37
H_2O . . .	5,86	—	—	—	—
		30,54	15,86	20,21	47,37 об'емов.

Количество N_2 в газе из угля (по углероду):

$$6{,}041 : 0{,}060 = 30{,}54 : x;\quad x = \frac{30{,}54 \cdot 0{,}060}{6{,}041} = 0{,}30.$$

Количество N_2 из воздуха:
$47{,}37 - 0{,}30 = 47{,}07.$

Количество O_2 из воздуха:
$47{,}07 : 3{,}762 = 12{,}51.$

Количество O_2 из воды:
$15{,}86 - 12{,}51 = 3{,}35$ [2]).

Количество H_2 из воды:
$3{,}35 \times 2 = 6{,}70.$

Количество H_2 из угля:
$20{,}21 - 6{,}70 = 13{,}51.$

Отошение H_2 угля к C в газе:
$13{,}51 : 30{,}54 = 0{,}44.$

Отношение H_2 к C в элементарном составе угля:
$2{,}649 : 6{,}041 = 0{,}44.$

4. Температура генераторного газа.

Тепло выделенное на колосниках:
$168.226 - 57.810\ x = + 125.273$ кал

Тепло образования метана:
$0{,}403 \times 20.870 = + 8.411$ „

Тепло образования CO_2 по реакции:
$CO + H_2O_{жид} = CO_2 + H_2 - 140$ кал
$-0{,}604 \times 140 = -85$ „

Тепло разложения FeS_2 по реакции:
$FeS_2 = FeS + S - 16.700$ кал
$-0{,}018 \times 16.700 = -301$ „

Тепло испарения воды, кроме влажности угля, идущей на образование CO_2
$-(0{,}879 - 0{,}604) \times 10.550 = -2.901$ „

130.397 кал.

[2]) Кислородом, потраченным на окисление Fe, в золе пренебрегаем.

Считая лучеиспускание генератора 40%, получим тепла в газе:

$$130.397 \times 0{,}6 = 78.238 \text{ кал.}$$

Генераторный газ, нагретый до 500°, содержит:

CH_4	$0{,}403 \times 6.390 =$	2.575 кал
$CO_2 + SO_2$	$0{,}622 \times 5.139 =$	3.196 „
$CO + H_2 + N_2$	$17{,}593 \times 3.455 =$	60.784 „
H_2O	$1{,}158 \times 4.162 =$	4.820 „
		71.375 кал.

Генераторный газ, нагретый до 600°, содержит:

CH_4	$0{,}403 \times 8.028 =$	3.235 кал
$CO_2 + SO_2$	$0{,}622 \times 6.311 =$	3.925 „
$CO + H_2 + N_2$	$17{,}593 \times 4.173 =$	73.416 „
H_2O	$1{,}158 \times 5.036 =$	5.832 „
		86.408 кал.

$$\begin{array}{rr} 78.238 \text{ кал} & 86.408 \text{ кал} \\ -\ 71.375 \text{ „} & -\ 71.375 \text{ „} \\ \hline 6.863 \text{ кал} & 15.033 \text{ кал} \end{array}$$

$$\frac{x}{100} = \frac{6{,}863}{15{,}033}; \quad x = 46°.$$

$$t = 500 + 46 = 546°\text{C}.$$

5. Расход первичного воздуха[1])

$10{,}707 - 1{,}881\ x =$	9,309	мо N_2
$9{,}309 : 3{,}762 =$	2,475	„ O_2
	11,784	мо воздуха.

$$\frac{11{,}784 \times 0{,}0224 \times 1000}{102{,}6} = 2{,}572 \text{ м}^3.$$

6. Расход пара в % веса угля.

$$0{,}924 + 0{,}945\ x = 1{,}626 \text{ мо}$$

$$\frac{1{,}626 \times 18 \times 100}{102{,}6} = 28{,}53\ \%.$$

7. Количество генераторного газа в м³ из 1 кг каменного угля.

$$\frac{19{,}779 \times 0{,}0224 \times 1000}{102{,}6} = 4{,}318 \text{ м}^3.$$

8. Расход вторичного воздуха[2]).

Для горения CH_4		
нужно	$0{,}403 \times 2 =$	0,806 мо O_2
Для горения CO		
нужно	$5{,}034 : 2 =$	2,517 „ „
Для горения H_2		
нужно	$3{,}190 : 2 =$	1,595 „ „
Для горения S_6	$0{,}003 \times 6 =$	0,018 „ „
		4,936 мо O_2
	$4{,}936 \times 3{,}762 =$	18,569 мо N_2
		23,505 мо воз.

$$\frac{23{,}505 \times 0{,}0224 \times 1000}{102{,}6} = 5{,}132 \text{ м}^3 \text{ возд.}$$

9. Поверка расхода первичного и вторичного воздуха.

Количество воздуха, расходуемого для сожигания единицы каменного угля, не должно зависеть от способа сожигания угля и потому сумма первичного и вторичного воздуха, равная

$$11{,}784 + 23{,}505 = 35{,}289 \text{ мо возд.},$$

должна равняться количеству воздуха, расходуемого в условиях простой топки:

Для горения C		
нужно	6,041	мо O_2
Для горения H_2		
нужно	$2{,}649 : 2 =$ 1,324	„ „
Для горения S		
нужно	$0{,}036 \times 1{,}25 =$ 0,045	„ „
	7,410	мо O_2
	$7{,}410 \times 3{,}762 =$ 27,876	„ N_2
	35,286	мо воз.

10. Вес 1 м³ генераторного газа.

CH_4	$0{,}403 \times 16 =$	6,448 гр
CO_2	$0{,}604 \times 44 =$	26,576 „
CO	$5{,}034 \times 28 =$	140,952 „
H_2	$3{,}190 \times 2 =$	6,380 „
S_6	$0{,}003 \times 192 =$	0,576 „
SO_2	$0{,}018 \times 64 =$	1,152 „
N_2	$9{,}369 \times 28 =$	262,332 „
H_2O	$1{,}158 \times 18 =$	20,844 „
		465,260 гр

$$\frac{465{,}260 \times 1000}{4{,}32 \times 102{,}6 \times 1000} = 1{,}05 \text{ кг/м}^3.$$

11. Материальный баланс генератора.

Приход.		
Угля поступило		102,600 гр
Воздуха: N_2	$9{,}309 \times 28 = 260{,}652$ гр	
O_2	$2{,}475 \times 32 = 79{,}200$ „	339,852 „
Паров воды	$1{,}626 \times 18 =$	29,268 „
		471,720 гр
Расход.		
Генераторного газа		465,260 гр
Золы . . .	$6{,}160 + 0{,}018 \times 0{,}5 \times 32 =$	6,448 „
		471,708 гр[1]).

[1]) Первичным воздухом называется воздух, поступающий в генератор и расходующийся на газификацию угля.

[2]) Вторичным воздухом называется воздух, расходуемый на горение генераторного газа.

[1]) Получившаяся разница в 0,012 гр не выходит за пределы ошибки, происходящей от отбрасывания четвертого десятичного знака при предшествовавших вычислениях.

12. Состав и количество продуктов горения.

CO_2	0,403+0,604+5,034=	6,041 мо
H_2O	2×0,403+3,190+1,158=	5,154 „
SO_2	0,003×6+0,018=	0,036 „
N_2	9,369+18,569=	27,938 „
		39,169 мо

$$\frac{39{,}169\times 0{,}0224\times 1000}{102{,}6}=8{,}552\ м^3.$$

13. Вес 1 м³ продуктов горения генераторного газа.

CO_2	6,041×44=	265,804 гр
H_2O	5,154×18=	92,772 „
SO_2	0,036×64=	2,304 „
N_2	27,938×28=	782,264 „
		1143,144 гр

$$\frac{1143{,}144\times 1000}{102{,}6\times 8{,}55\times 1000}=1{,}303\ кг/м^3.$$

14. Теплопроизводительная способность 1 м³ газа.

CO сгорая выдел.	5,034×	68.220=	343.419 кал
CH_4 „ „	0,403×	192.400=	77.537 „
H_2 „ „	3,190×	57.810=	184.414 „
S_6 „ „	6×0,003×	69.800=	1.256 „
			606.626 кал

$$\frac{606{,}626\times 1000}{102{,}6\times 4{,}32}=1369\ Кал/м^3.$$

15. Тепловой баланс генератора.

Приход.

Потенциальная энергия угля:

C	6,041×97.650=+	589.904 кал
H_2	2,649×57.810=+	153.139 „
S	0,036×90.447=+	3.256 „
Испарение H_2O	0,879×10.550=−	9.273 „
		737.026 кал.

Расход.

Потенциальная энергия газа	606.626 кал
Физическая теплота газа	78.238 „
Лучеиспускание генератора	52.159 „
	737.023 кал.

РАСЧЕТ теоретической температуры горения газа при различном подогреве газа и вторичного воздуха. Расход воздуха теоретический.

1. Газ и вторичный воздух холодные.

Продукты горения нагретые до 1900° С содержат:

CO_2+SO_2	6,077×23.391=	142.147 кал
H_2O	5,154×19.707=	101.570 „
N_2	27,938×14.326=	400.240 „
		643.957 кал.

Продукты горения нагретые до 1800° С содержат:

CO_2+SO_2	6,077×22.014=	133.779 кал
H_2O	5,154×18.209=	93.849 „
N_2	27,938×13.491=	376.912 „
		604.540 кал.

606.626 кал	643.957 кал
−604.540 „	−604.540 „
2.086 кал	39.417 кал

$$\frac{x}{100}=\frac{2.086}{39.417};\ x=5°.$$

$$t=1800+5=1805°\ C.$$

2. Газ нагрет до 400° С; вторичный воздух до 500°С.

Воздух вносит тепла:

23,505×3.476=81.703 кал.

Газ вносит тепла:

CH_4	0,403×4.872=	1.963 кал
CO_2+SO_2	0,622×4.009=	2.494 „
$CO+H_2+N_2$	17,593×2.746=	48.310 „
H_2O	1,158×3.305=	3.827 „
		56.594 кал.

Всего вносится тепла:

81.703+56.594+606.626=744.923 кал.

Продукты горения нагретые до 2100° С содержат:

CO_2+SO_2	6,077×26.147=	158.895 кал
H_2O	5,154×22.999=	118.537 „
N_2	27,938×16.023=	447.651 „
		725.083 кал.

Продукты горения нагретые до 2200° С содержат:

CO_2+SO_2	6,077×27.526=	167.276 кал
H_2O	5,154×24.816=	127.902 „
N_2	27,938×16.885=	471.733 „
		766.911 кал.

744.923 кал	766.911 кал
−725.083 „	−725.083 „
19.840 кал	41.828 кал

$$\frac{x}{100}=\frac{19.840}{41.828};\ x=47°.$$

$$t=2100+47=2147°\ C.$$

РАСЧЕТ горения генераторного газа при расходе вторичного воздуха в 1,5 раза больше теоретического.

(Условия горения газа в мартеновской печи).

1. Расход вторичного воздуха в м³ на кг угля.

23,505 : 2 = 11,752 мо избыточного воздуха.

Расход воздуха: 23,505 + 11,752 = 35,257 мо

$$\frac{35,257 \times 0,0224 \times 1000}{102,6} = 7,70 \text{ м}^3.$$

2. Состав и количество продуктов горения (в м³).

Избыточный воздух вносит:

11,752 : 4,762 = 2,468 мо O_2.
11,752 — 2,468 = 9,284 мо N_2.

Продукты горения:

CO_2		6,041 мо
H_2O		5,154 „
SO_2		0,036 „
N_2	27,938 + 9,284 =	37,222 „
O_2		2,468 „
		50,921 мо

$$\frac{50,921 \times 0,0224 \times 1000}{102,6} = 11,12 \text{ м}^3.$$

3. Вес 1 м³ продуктов горения.

CO_2	6,041 × 44 =	265,804 гр
H_2O	5,154 × 18 =	92,772 „
SO_2	0,036 × 64 =	2,304 „
N_2	37,222 × 28 =	1042,216 „
O_2	2,468 × 32 =	78,976 „
		1482,072 гр

$$\frac{1482,072 \times 1000}{102,6 \times 11,12 \times 1000} = 1,30 \text{ кг/м}^3.$$

4. Теоретическая температура горения генераторного газа при подогреве газа и вторичного воздуха до 1100° С.

Газ вносит тепла:

CH_4	0,403 × 18.018 =	7.261 кал
$CO_2 + SO_2$	0,622 × 12.625 =	7.853 „
$CO + H_2 + N_2$	17,593 × 7.898 =	138.950 „
H_2O	1,158 × 9.753 =	11.294 „
		165.358 кал

Воздух вносит тепла. 35,257 × 7,944 = 280.082 кал
Горение газа даст . . . . . 606.626 „
1052.066 кал.

Продукты горения нагретые до 2300° С содержат:

$CO_2 + SO_2$	6,077 × 28.902 =	175.637 кал
H_2O	5,154 × 26.756 =	137.900 „
O_2	2,468 × 18.216 =	44.957 „
N_2	37,222 × 17.756 =	660.914 „
		1019.408 кал.

Продукты горения нагретые до 2400° С содержат:

$CO_2 + SO_2$	6,077 × 30.276 =	183.987 кал
H_2O	5,154 × 28.836 =	148.621 „
O_2	2,468 × 19.116 =	47.178 „
N_2	37,222 × 18.636 =	693.669 „
		1073.455 кал.

Интерполируем

1052.066 кал	1073.455 кал
— 1019.408 „	— 1019.408 „
32.658 кал	54.047 кал

$$\frac{x}{100} = \frac{32.658}{54.047};\ x = 60°$$

$t = 2300 + 60 = 2360°$ С.

Расчет генераторного газа из Челябинского бурого угля.

1. Состав угля

Состав угля в %%		В молекулярных об'емах.
C	42,36 : 12 =	3,530 мо
H_2	2,94 : 2 =	1,470 „
O_2	11,92 : 32 =	0,373 „
N_2	2,00 : 28 =	0,071 „
S	0,78 : 32 =	0,024 „
H_2O	18,00 : 18 =	1,000 „
Зола	22,00	
	100,00%	

Состав угля в молекулярных об'емах по Дюлонгу:

C	3,530 мо
H_2	1,470 — 2 × 0,373 = 0,724 „
N_2	0,071 „
S	0,024 „
H_2O	1,000 + 2 × 0,373 = 1,746 „

2. Определение состава генераторного газа.

		На колосниках.	В газопроводе.
CH_4	$^1/_{15} \times 3{,}530 = 0{,}235$ мо	—	0,235 мо
CO_2	Примем, что на образование CO_2, по реакции $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ пошла вся конституционная вода (см. стр. 47) т.-е. 0,746 мо	—	0,746
CO	$3{,}530 - 0{,}235 = 3{,}295$ мо	3,295 мо	
	$3{,}295 - 0{,}746 = 2{,}549$ мо		2,549
H_2	Образуется по реакциям:		
	$C + H_2O_{пар} = CO + H_2$ . . . . . x мо	x	—
	$CO + H_2O_{жид} = CO_2 + H_2$ 0,746		
	Из каменного угля 0,724		
	$1{,}470 + x$ мо		
	На образование CH_4:		
	$-2 \times 0{,}235 = -0{,}470$		
	$1{,}000 + x$ мо	—	$1{,}000 + 1{,}000\ x$
S_2	По реакции $FeS_2 = FeS + S$		
	$0{,}024 : (2 \times 6) = 0{,}002$ мо	—	0,002
SO_2	Образуется по реакции		
	$FeS + 1{,}5O_2 + SiO_2 = FeSiO_3 + SO_2$:		
	$0{,}024 : 2 = 0{,}012$ мо	0,012	0,012
N_2	По реакции $C + {}^1/_2(O_2 + 3{,}762\ N_2) = CO + 1{,}881\ N_2$.		
	$(3{,}295 - x)\frac{3{,}762}{2} = 6{,}198 - 1{,}881\ x$ мо		
	По реакции		
	$FeS + 1{,}5(O_2 + 3{,}762\ N_2) + SiO_2 =$		
	$= FeSiO_3 + SO_2 + 1{,}5 . 3{,}762\ N_2$		
	$0{,}012 . 1{,}5 . 3{,}762 = 0{,}068$		
	$6{,}266 - 1{,}881\ x$ мо	$6{,}266 - 1{,}881\ x$	—
	Из каменного угля 0,071		
	$6{,}337 - 1{,}881\ x$ мо	—	$6{,}337 - 1{,}881\ x$
H_2O	Пара разложится под колосниками x мо		
	Пройдет через генератор неразложенного пара . . . . . $0{,}5\ x$		
	Нужно доставить . . . . . $1{,}5\ x$ мо		
	На колосниках останется . . . . $0{,}5\ x$	$0{,}500\ x$	—
	Поступит из угля 1,000		
	Всего воды в газе . . $1{,}000 + 0{,}5\ x$ мо	—	$1{,}000 + 0{,}500\ x$

Составление и решение уравнения.

Состав газа на колосниках:

CO	3,295 мо	
H_2		x
SO_2	0,012	
N_2	6,266	$-1,881\ x$
H_2O		$0,500\ x$

Количество развиваемого на колосниках тепла.

Реакции выделяют тепла:

$C + {}^1/_2O_2 = CO + 29.430$ кал,

$(3,295 - x)\ 29.430 = +\ 96.972 - 29.430\ x$ кал

$FeS + 1,5\ O_2 + SiO_2 =$

$= FeSiO_3 + SO_2 + 127.793$ кал,

$0,012 \times 127.793 = +\ 1.534$

$C + H_2O_{пар} = CO + H_2 - 28.380$ кал,

$x \times 28.380 = \quad -28.380\ x$

$98.506 - 57.810\ x$ кал.

Кокс приносит тепла при 1000°C.

$$\frac{3,295 \times 12 \times 0,363 \times 1000}{1000} = 14.353$$

Всего . . . . . $112.859 - 57.810\ x$ кал.

Расход тепла:

Газы нагретые до 1000° C уносят тепла:

$CO + H_2 + N_2$ . . $(9,561 - 0,881\ x) \times 7.135 =$

$= 68.218 - 6.286\ x$ кал

SO_2 . . . $0,012 \times 11.317 =$ 136

H_2O . . $0,500\ x \times 8.750 =$ $4.375\ x$

$68.354 - 1.911\ x$ кал.

Принимая лучеиспускание на колосниках равным 20% от всего полученного тепла получим уравнение:

$$0,8\ (112.859 - 57.810\ x) = 68.354 - 1,911\ x,$$

откуда $x = 0,495$ мо.

Состав газа (сырого).

CH_4	0,235 мо	2,01%
CO_2	0,746 „	6,38 „
CO	2,549 „	21,80 „
H_2	1,495 „	12,79 „
S_6	0,002 „	0,02 „
SO_2	0,012 „	0,10 „
N_2	5,406 „	46,23 „
H_2O	1,247 „	10,67 „
	11,692 мо	100,00%

3. Поверка состава газа.

		C	H_2	O_2	N_2
CH_4	0,235	0,235	0,470	—	—
CO_2	0,746	0,746	—	0,746	—
CO	2,549	2,549	—	1,274	—
H_2	1,495	—	1,495	—	—
S_6	0,002	—	—	—	—
SO_2	0,012	—	—	0,012	—
N_2	5,406	—	—	—	5,406
H_2O	1,247	—	—	—	—
		3,530	1,965	2,032	5,406

Количество N_2 из воздуха

$5,406 - 0,071 = 5,335$,

количество O_2 из воздуха

$5,335 : 3,762 = 1,418$,

O_2 из воды

$2,032 - 1,418 + 0,012 : 2$ [1]$) = 0,620$,

H_2 из воды

$0,620 \times 2 = 1,240$,

H_2 из угля

$1,965 - 1,240 = 0,725$ мо

Первоначальное количество H_2 в угле 0,724 мо

4. Температура генераторного газа.

В генераторе выделяется тепла:

на колосниках выделяется согласно выше подсчитанному:

$98.506 - 57.810 \times 0,495 = +\ 69.890$ кал

по реакции $CO + H_2O_{жид} =$

$= CO_2 + H_2 - 140$ кал

$140 \times 0,746 = -\ 104$ „

образование метана

$0,235 \times 20.870 = +\ 4.904$ „

по реакции $FeS_2 = S +$

$+ FeS - 16.700$ кал

$-0,002 \times 6 \times 16.700 = -\ 200$ „

на испарение влажности

$(1,746 - 0,746)\ 10.550 = -\ 10.550$ „

Всего выделится тепла 63.940 кал.

За вычетом 40% на лучеиспускание генератора на нагрев газа идет:

$0,6 \times 63.940 = 38.364$ кал.

Температура вычислится аналогично предыдущему:

$t = 446°C$.

5. Расход первичного воздуха в м³ на 1 кг.

$5,406 - 0,071 = 5,335$ мо N_2

$5,335 : 3,762 = 1,418$ „ O_2

6,753 мо возд.

$$\frac{6,753 \times 0,0224 \times 1000}{100} = 1,513\ м^3/кг.$$

[1]) Количество кислорода, ушедшее на окисление Fe в золе.

6. Расход пара в % веса угля.

$$1{,}5 \times 0{,}495 = 0{,}742 \text{ мо}$$

$$\frac{0{,}742 \times 18 \times 100}{100} = 13{,}36\%.$$

7. Количество генераторного газа, получаемого из 1 кг угля.

$$\frac{11{,}692 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 2{,}619 \text{ м}^3.$$

8. Расход вторичного воздуха.

Для горения	CH_4	нужно	$0{,}235 \times 2 = 0{,}470$	мо	O_2
„ „	CO	„	$2{,}549 : 2 = 1{,}274$	„	„
„ „	H_2	„	$1{,}495 : 2 = 0{,}748$	„	„
„ „	S_6	„	$0{,}002 \times 6 = 0{,}012$	„	„
			2,504	мо	O_2
С воздухом поступает			$2{,}504 \times 3{,}762 = 9{,}420$	мо	N_2
			11,924	мо	воз.

$$\frac{11{,}924 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 2{,}671 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

9. Проверка расхода первичного и вторичного воздуха.

При прямом горении угля расходуется:

для горения	C	3,530	мо	O_2
„ „	H_2	0,362	„	„
„ „	S	$0{,}024 \times 1{,}25 = 0{,}030$	„	„
		3,922	мо	O_2
		$3{,}922 \times 3{,}762 = 14{,}755$	„	N_2
		18,677	мо	возд.

Сумма первичного и вторичного воздуха:

$$11{,}924 + 6{,}753 = 18{,}677 \text{ мо возд.}$$

10. Вес 1 м³ генераторного газа.

CH_4	$0{,}235 \times 16$	= 3,760	гр
CO_2	$0{,}746 \times 44$	= 32,824	„
CO	$2{,}549 \times 28$	= 71,372	„
H_2	$1{,}495 \times 2$	= 2,990	„
S_6	$0{,}002 \times 192$	= 0,384	„
SO_2	$0{,}012 \times 64$	= 0,768	„
N_2	$5{,}406 \times 28$	= 151,368	„
H_2O	$1{,}247 \times 18$	= 22,446	„
		285,912	гр

$$\frac{285{,}912 \times 1000}{100 \times 2{,}619 \times 1000} = 1{,}09 \text{ кг/м}^3.$$

11. Материальный баланс генератора.

Приход.

Бурого угля поступило		100,000 гр
Первичного воздуха:		
O_2	$1{,}418 \times 32 = 45{,}376$ гр	
N_2	$5{,}335 \times 28 = 149{,}380$ „	194,756 „
Пара	$0{,}742 \times 18 =$	13,356 „
		308,112 гр.

Расход.

Генераторного газа	285,912 гр
Золы $22{,}000 + 0{,}012 \times {}^1/_2 \times 32 =$	22,192 „
	308,104 гр.

12. Состав и количество продуктов горения.

CO_2	$0{,}235 + 2{,}549 + 0{,}746 =$	3,530	мо
SO_2	$0{,}012 + 0{,}002 \times 6 =$	0,024	„
H_2O	$2 \times 0{,}235 + 1{,}495 + 1{,}247 =$	3,212	„
N_2	$5{,}406 + 9{,}420 =$	14,826	„
		21,592	мо

$$\frac{21{,}592 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 4{,}836 \text{ м}^3.$$

13. Вес 1 м³ продуктов горения.

CO_2	$3{,}530 \times 44$	= 155,320	гр
SO_2	$0{,}024 \times 64$	= 1,536	„
H_2O	$3{,}212 \times 18$	= 57,816	„
N_2	$14{,}826 \times 28$	= 415,128	„
		629,800	гр

$$\frac{629{,}800 \times 1000}{100 \times 4{,}836 \times 1000} = 1{,}30 \text{ кг/м}^3.$$

14. Теплотворная способность 1 м³ газа.

Горение CH_4	дает	$0{,}235 \times 192.400$	= 45.214	кал
„ CO	„	$2{,}549 \times 68.220$	= 173.893	„
„ H_2	„	$1{,}495 \times 57.810$	= 86.426	„
„ S_6	„	$6 \times 0{,}002 \times 69.800$	= 838	„
			306.371	кал.

$$\frac{306{,}371 \times 1000}{100 \times 2{,}619} = 1170 \text{ Кал/м}^3.$$

15. Тепловой баланс генератора.

Приход.

Теплотворная способность угля:

Горение C	дает	$3{,}530 \times 97.650$	= 344.705	кал.
„ H_2	„	$0{,}724 \times 57.810$	= 41.854	„
„ S	„	$0{,}024 \times 90.447$	= 2.171	„
			388.730	кал.
Испарение воды		$1{,}746 \times 10.550$	= — 18.420	„
			370.310	кал.

Расход.

Потенциальная энергия газа	306.371 кал
Теплота нагрева газа и лучеиспускание генератора.	63.940 „
	370.311 кал.

16. Теоретическая температура горения при теоретическом расходе воздуха и холодном газе и воздухе.

Теоретическая температура горения вычислится равной

$$t = 1659°C.$$

Сравнение работы центральной генераторной станции с работой отдельно стоящих генераторов.

Богословский и Челябинский бурые угли быстро выветриваются на воздухе и потому употребление их для многих мелких печей, рассеянных по заводу очень невыгодно. Масса угля распыливается и пропадает. Легкоплавкость золы требует ухода за топками вообще и генераторами — в особенности. Поэтому явилась мысль газифицировать весь потребляемый заводом уголь в мощной газовой станции и все печи перевести на газ.

Интересен вопрос: выгодно ли это в тепловом и пирометрическом отношениях?

Для ответа на этот вопрос сравним два газа: 1) полученный на общезаводской генераторной станции с подводом пара под колосники, с промывкой и осушкой газа и 2) газ из отдельных генераторов с расплавлением золы, без вдувания пара, т.-е. газ высокой температуры от генераторов с одним рядом фурм, не требующих большого ухода.

РАСЧЕТ генераторного газа центральной станции с промывкой и осушкой.

1. Состав осушенного газа.

Осушка генераторного газа достигается его охлаждением до температур ниже точки росы. Определим точку росы для только что расчитанного нами газа из Челябинского бурого угля (см. стр. 52).

Парциальное давление паров воды в газе:

$$0{,}1067 \times 760 = 81{,}09 \text{ мм рт. ст.}$$

Точка росы около 47°C [1]).

[1]) См. приложения к V ч.

Считая, что газ нам удастся охладить до 20°C [1]), мы получим количество воды в газе:

$$x = (11{,}692 - 1{,}247)\frac{17{,}40}{760 - 17{,}40} = 0{,}245 \text{ мо.}$$

Таким образом, при охлаждении до 20°C мы удалим:

$$\frac{1{,}247 - 0{,}245}{1{,}247} \times 100 = \sim 80\% \text{ влаги.}$$

Состав осушенного газа:

CH_4	0,235 мо	2,20 %
CO_2	0,746 „	6,98 „
CO	2,549 „	23,85 „
H_2	1,495 „	13,98 „
S_6	0,002 „	0,02 „
SO_2	0,012 „	0,11 „
N_2	5,406 „	50,57 „
H_2O	0,245 „	2,29 „
	10,690 мо	100,00 %.

2. Количество генераторного газа из 1 кг угля.

$$\frac{10{,}690 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 2{,}395 \text{ м}^3.$$

3. Состав и количество продуктов горения.

CO_2	3,530 мо
SO_2	0,024 „
H_2O	2,210 „
N_2	14,826 „
	20,590 мо

$$\frac{20{,}590 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 4{,}612 \text{ м}^3.$$

4. Теплотворная способность 1 м³ газа (см. выше).

$$\frac{306{,}371 \times 1000}{100 \times 2{,}395} = 1279 \text{ Кал/м}^3.$$

5. Теоретическая температура горения при теоретическом расходе воздуха и холодном газе и воздухе.

Теоретическая температура вычисляется равной

$$t = 1740° \text{ C.}$$

[1]) На практике эта цифра достижима в мощных газгольдерах. Обычно в конденсаторах газ ниже 35° охладить не удается.

РАСЧЕТ генераторного газа из отдельно стоящих генераторов.

Расчитаем генераторный газ по прежней схеме, только без подвода пара под колосники, т.-е. примем $x = 0$. В результате расчет сильно упростится и мы сразу получим состав генераторного газа

1. Состав генераторного газа.

			В газопроводе.
CH_4	$^1/_{15} \times 3{,}530 = 0{,}235$ мо		0,235 мо
CO_2	Принимаем, что вся конституционная вода идет на образование CO_2 по реакции: $CO + H_2O_{жид} = CO_2 + H_2$		0,746 „
CO	$3{,}530 - 0{,}235 - 0{,}746 = 2{,}549$ мо		2,549 „
H_2	Получается по реакции. $CO + H_2O_{жид} = CO_2 + H_2$	0,746 мо	
	Из бурого угля	0,724 „	
		1,470 мо	
	На образование метана $2 \times 0{,}235 =$	0,470 „	
		1,000 мо	1,000 „
S_6	По реакции $FeS_2 = FeS + S$		0,002 „
SO_2	По реакции: $FeS + 1{,}5\,O_2 + SiO_2 = FeSiO_3 + SO_2$		0,012 „
N_2	При образовании CO $(2{,}549 + 0{,}746)\frac{3{,}762}{2} =$	6,198 мо	
	При образовании SO_2 $1{,}5 \times 0{,}012 \times 3{,}762 =$	0,068 „	
	Из бурого угля	0,071 „	
		6,337 мо	6,337 „
H_2O	Влажность бурого угля		1,000 „
			11,881 мо

Состав газа;

CH_4	0,235 мо	1,98 %
CO_2	0,746 „	6,28 „
CO	2,549 „	21,45 „
H_2	1,000 „	8,42 „
S_6	0,002 „	0,02 „
SO_2	0,012 „	0,10 „
N_2	6,337 „	53,33 „
H_2O	1,000 „	8,42 „
	11,881 мо	100,00 %.

2. Температура генераторного газа.

В генераторе выделяется тепла:

При образовании	CH_4	$0{,}235 \times 20.870 =$	4.904 кал
„ „	CO_2	$0{,}746 \times 97.650 =$	72.847 „
„ „	CO	$2{,}549 \times 29.430 =$	75.017 „
„ „	SO_2	$0{,}012 \times 127.793 =$	1.534 „
			154.302 кал
На разложение	FeS_2	$0{,}012 \times 16.700 =$	— 200 кал
На испарение	H_2O	$1{,}000 \times 10.550 =$	— 10.550 „
На разложен.	$H_2O_{жид}$	$0{,}746 \times 68.360 =$	— 50.997 „
			92.555 кал.

Золы в угле 22% или 22 гр на 100 гр угля. Допустим, что шлака будет 30 гр. Теплоту плавления шлака примем 350 кал, тогда на 30 гр расход тепла будет

$$30 \times 350 = 10.500 \text{ кал.}$$

На нагрев газа остается

$$0{,}6\ (92.555 - 10.500) = 49.233 \text{ кал.}$$

Температура газа вычисляется:

$$t = 560°\text{C.}$$

3. Количество генераторного газа из 1 кг угля.

$$\frac{11{,}881 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 2{,}661 \text{ м}^3.$$

4. Теплотворная способность 1 м³ газа.

Горение	CH_4 дает	$0{,}235 \times 192.400 =$	45.214 кал
„	CO „	$2{,}549 \times 68.220 =$	173.893 „
„	H_2 „	$1{,}000 \times 57.810 =$	57.810 „
„	S_6 „	$6 \times 0{,}002 \times 69.800 =$	838 „
			277.755 кал

$$\frac{277{,}755 \times 1000}{100 \times 2{,}66} = 1044 \text{ Кал/м}^3.$$

5. Количество первичного воздуха.

N_2 . . . . . 6,337 — 0,071 = 6,266 мо
O_2 . . . . . 6,266 : 3,762 = 1,666 „

Воздуха 7,932 мо

$$\frac{7{,}932 \times 0{,}0224 \times 1000}{200} = 1{,}77 \text{ м}^3.$$

6. Количество вторичного воздуха.

Для горения	CH_4	нужно	0,235 × 2 = 0,470 мо	O_2
„ „	CO	„	2,549 : 2 = 1,274 „	„
„ „	H_2	„	1,000 : 2 = 0,500 „	„
„ „	S_6	„	6 × 0,002 × 1 = 0,012 „	„

2,256 мо O_2

2,256 × 3,762 = 8,487 „ N_2

10,743 мо воз.

$$\frac{10{,}743 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 2{,}406 \text{ м}^3.$$

7. Состав и количество продуктов горения.

CO_2	3,530 мо
H_2O	2,470 „
SO_2	0,024 „
N_2	14,824 „
	20,848 мо

$$\frac{20{,}848 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 4{,}670 \text{ м}^3.$$

8. Теоретическая температура горения при теоретическом расходе воздуха, холодном воздухе и газе нагретом до 550°C.

Количество тепла в продуктах горения

277.755 + 49.233 = 326.988 кал.

Теоретическая температура вычислится:

$t = 1818°C.$

Таким образом мы получили, что теоретическая температура горения газа при работе отдельных генераторов с использованием всей физической теплоты газа, но без осушки, всего на 1818—1740=78° выше температуры горения осушенного газа, полученного от центральной газовой станции.

Из этого следует:

Центральная обще-заводская генераторная станция с промывкой и осушкой генераторного бурогольного газа дает газ, очень мало отличающийся пирометрическим эффектом от газоустановки генератора с расплавлением золы у самой печи. А так как уход и содержание общей генераторной установки гораздо дешевле и технически проще установки отдельных генераторов, а последние выгоднее обыкновенных топок, то полная газификация заводов желательна и выгодна.

Расчет генераторного газа из генераторов с расплавлением золы [1].

Задача получения нормального паро-воздушного генераторного газа в генераторе с расплавлением золы, т.-е. температурой в горне 1350°, решается применением двойного ряда фурм. В нижние фурмы вдувается чистый воздух и температура в поясе их поднимается до 1350°, при которой шлак плавится. В верхние фурмы вдувается часть воздуха и все, требуемое по расчету, количество пара. Избыток тепла, уносимого газами из пояса нижних фурм, используется на разложение пара в поясе верхних фурм.

Таким образом состав генераторного газа может быть расчитан по предыдущему, считая на колосниках 1000°. Но, кроме того, здесь нужно будет обратить внимание на получение необходимой для расплавления шлака температуры в поясе нижних фурм генератора и расчитать распределение воздуха между верхним и нижним рядом фурм. Эта задача решается составлением теплового баланса нижней зоны и дает, что при холодном дутье, в данном случае, мы получили бы температуру в горне не выше 1250°. Поэтому мы, подобно M. Servais (см. ч. IV, стр. 7), примем для генератора дутье, нагретое до 200° C.

Наконец, третьей задачей, с которой мы и начнем расчет, явится расчет шихты генератора, т.-е. определение количества флюса, для ошлакования золы, и состава получаемых шлака и чугуна. Последнее вполне понятно, ибо условия горна генератора близки к условиям горна доменной печи.

РАСЧЕТ шихты генератора.

1 Количество флюса (мартеновского шлака)

Имеем:

Состав бурого угля.		Состав золы угля.		Состав флюса. (Мартеновский шлак).	
C . . .	42,36%	SiO_2 . .	48,98%	SiO_2 . .	20,80%
H_2 . . .	2,94 „	Al_2O_3 . .	25,20 „	Al_2O_3 . .	6,27 „
O_2 . . .	11,92 „	Fe_2O_3 .	13,58 „	FeO . .	10,76 „
N_2 . . .	2,00 „	CaO . .	4,50 „	MnO . .	15,05 „
S. . . .	0,78 „	MgO . .	6,03 „	CaO . .	37,52 „
H_2O . .	18,00 „	SO_3 . .	0,92 „	MgO . .	8,43 „
Зола . .	22,00 „		99,21%	P_2O_5 . .	0,73 „
	100,00%			CaS . .	0,33 „
					99,89%

[1] Расчет сделан С. В. Грум-Гржимайло и К. Ф. Оленевым.

Расчет шлака произведем по графическому способу Матезиуса, считая, что все железо, фосфор и половина марганца, содержащихся в золе и флюсе, перейдут в чугун.

Имеем шлакообразующие окислы:

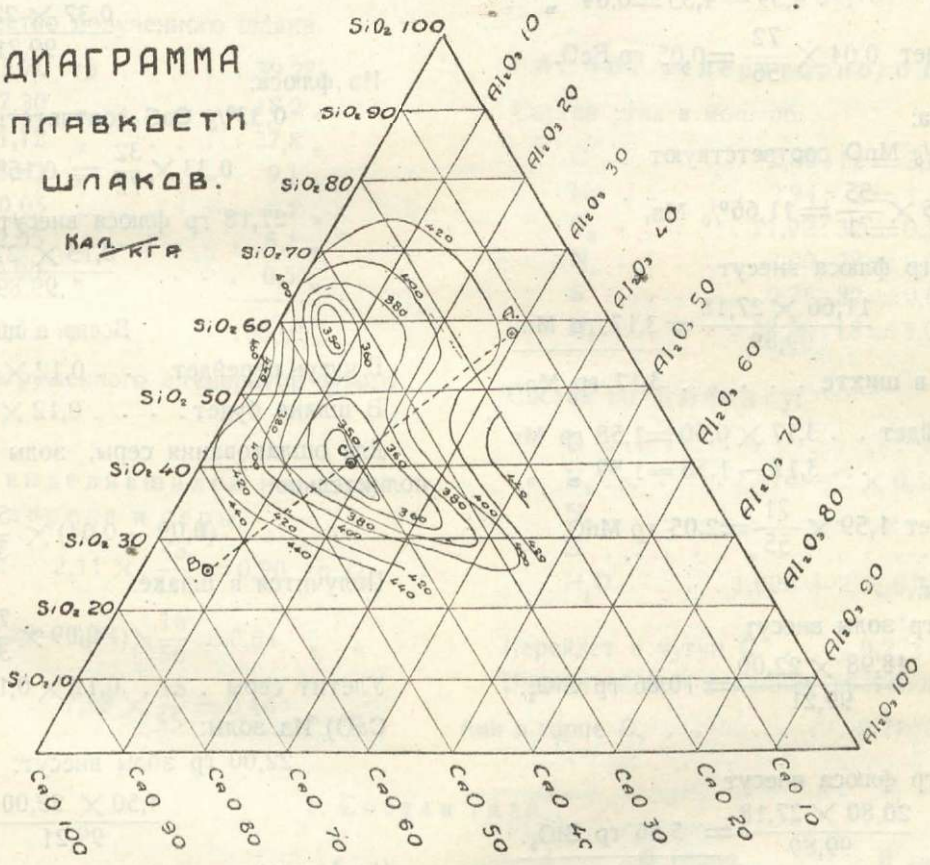
	Золы угля:		Флюса:	
SiO_2	48,98	57,8%	20,8	25,8%
Al_2O_3	25,20	29,8 „	6,27	7,8 „
CaO	4,50	12,4 „	37,52	66,4 „
MgO	6,03		8,43	
MnO	—		7,52	
	84,71	100,0%	80,54	100,0%

Наша цель получить наиболее легкоплавкий шлак и потому мы примем для шлака состав точки *C*. Для этого количества шлакообразующих частей золы и флюса должны быть обратно пропорциональны отрезкам *AC* и *CB*, т.-е. относиться как 6 : 7.

Таким образом находим, что на 100 гр бурого угля нужно будет ввести флюса:

$$\frac{22{,}0 \times 84{,}71 \times 99{,}89 \times 7}{99{,}21 \times 80{,}54 \times 6} = 27{,}18 \text{ гр}$$

или ~ 27,2% от веса загружаемого в генератор бурого угля.



Фиг. 19.

Наносим их на диаграмму плавкости шлаков Гау-Бабю (фиг. 19), при чем вместо CaO мы поставим нашу сумму окислов CaO, MgO и MnO. Это будет, строго говоря, неправильно, но за неимением соответствующей диаграммы, мы воспользуемся этой, тем более, что добавка новых окислов в действительности должна не повысить, а понизить температуру плавления нашего шлака.

Получаем точки *A* и *B* и соединяем их прямой. На этой прямой будут лежать точки составов всех возможных смесей из нашей золы и флюса и одна из них, соответствующая точке *C*, будет иметь, как видно из диаграммы, наименьшую теплоту плавления, около 350 кал.

2. Состав и количество чугуна и шлака.

Теперь расчитаем состав получаемого шлака и чугуна. Можно принять, что в чугун перейдет 99% общего количества железа в шихте, 50% марганца, 20% серы, весь фосфор и 5% кремния. Улетучится 10% серы, все остальное перейдет в шлак.

Расчет поведем на 100 гр угля, имея 22,00 гр золы и 27,18 гр мартеновского шлака.

Fe) Из золы:

13,58% Fe_2O_3 соответствуют

$$13{,}58 \times \frac{112}{160} = 9{,}51\% \text{ Fe},$$

22,00 гр золы внесут

$$\frac{9,51 \times 22,00}{99,21} = 2,11 \text{ гр Fe.}$$

Из флюса:

10,76% FeO соответствует

$$10,76 \times \frac{56}{72} = 8,37\% \text{ Fe,}$$

27,18 гр флюса внесут

$$\frac{8,37 \times 27,18}{99,89} = 2,28 \text{ гр Fe.}$$

Всего в шихте . . . . . 4,39 гр Fe.

В чугун перейдет . . $4,39 \times 0,99 = 4,35$ гр F

„ шлак „ . . $4,39 - 4,35 = 0,04$ „ „

В шлаке будет $0,04 \times \frac{72}{56} = 0,05$ гр FeO.

Mn) Из флюса:

15,05% MnO соответствуют

$$15,05 \times \frac{55}{71} = 11,66\% \text{ Mn,}$$

27,18 гр флюса внесут

$$\frac{11,66 \times 27,18}{99,89} = 3,17 \text{ гр Mn.}$$

Всего в шихте . . . . . 3,17 гр Mn.

В чугун перейдет . . $3,17 \times 0,50 = 1,58$ гр Mn

„ шлак „ . . $3,17 - 1,58 = 1,59$ „ „

В шлаке будет $1,59 \times \frac{71}{55} = 2,05$ гр MnO.

SiO_2) Из золы:

22,00 гр золы внесут

$$\frac{48,98 \times 22,00}{99,21} = 10,86 \text{ гр } SiO_2.$$

Из флюса:

27,18 гр флюса внесут

$$\frac{20,80 \times 27,18}{99,89} = 5,66 \text{ гр } SiO_2.$$

Всего в шихте . . . . 16,52 гр SiO_2.

В чугуне перейдет $16,52 \times 0,05 \times \frac{28}{60} = 0,39$ гр Si.

В шлаке будет . . . . $16,52 \times 0,95 = 15,70$ „ SiO_2

Al_2O_3) Из золы:

22,00 гр золы внесут

$$\frac{25,20 \times 22,00}{99,21} = 5,59 \text{ гр } Al_2O_3.$$

Из флюса:

27,18 гр флюса внесут

$$\frac{6,27 \times 27,18}{99,89} = 1,71 \text{ гр } Al_2O_3$$

Всего в шихте . . . . . 7,30 гр Al_2O_3.

В шлаке будет . . . . . 7,30 „ „

P) Из флюса:

0,73% P_2O_5 соответствуют

$$0,73 \times \frac{62}{142} = 0,32 \text{ гр P.}$$

27,18 гр флюса внесут

$$\frac{0,32 \times 27,18}{99,89} = 0,09 \text{ гр P.}$$

В чугун перейдет . . . . . 0,09 гр P.

S) Из золы:

0,92% SO_3 соответствуют

$$0,92 \times \frac{32}{80} = 0,37\% \text{ S,}$$

22,00 гр золы внесут:

$$\frac{0,37 \times 22,00}{99,21} = 0,08 \text{ гр S.}$$

Из флюса:

0,33% CaS соответствуют:

$$0,33 \times \frac{32}{72} = 0,15\% \text{ S,}$$

27,18 гр флюса внесут:

$$\frac{0,15 \times 27,18}{99,89} = 0,04 \text{ гр S.}$$

Всего в шихте 0,12 гр S.

В чугун перейдет . . $0,12 \times 0,20 = 0,02$ гр S.

В шлаке будет . . . $0,12 \times 0,70 = 0,09$ „ „

Для ошлакования серы, золы потребуется дополнительно:

$$(0,09 - 0,04) \times \frac{56}{32} = 0,09 \text{ гр Ca.}$$

Получится в шлаке:

$$0,09 \times \frac{72}{32} = 0,20 \text{ гр CaS.}$$

Улетит серы . . . $0,12 \times 0,10 = 0,01$ гр S.

CaO) Из золы:

22,00 гр золы внесут:

$$\frac{4,50 \times 22,00}{99,21} = 1,00 \text{ гр CaO.}$$

Из флюса:

27,18 гр флюса внесут:

$$\frac{37,52 \times 27,18}{99,89} = 10,21 \text{ „ „}$$

Всего в шихте. . . . . 11,21 гр CaO.

В шлаке будет: $11,21 - 0,09 = 11,12$ „ „

MgO) Из золы:

22,00 гр золы внесут.

$$\frac{6,03 \times 22,00}{99,21} = 1,34 \text{ гр MgO.}$$

Из флюса:

27,18 гр флюса внесут:

$$\frac{8,43 \times 27,18}{99,89} = 2,29 \text{ „ „}$$

Всего в шихте . . . . . 3,63 гр MgO.

В шлаке будет: . . . . 3,63 „ „

Состав и количество полученного чугуна:

Fe	4,35 гр	65,0%
Mn	1,58 „	23,6 „
Si	0,39 „	5,8 „
P	0,09 „	1,3 „
S	0,02 „	0,3 „
	6,43 гр	96,0%
C	$\frac{6,43 \times 4}{96} = 0,27$ „	4,0 „
	6,70 гр	100,0%

или 6,7% веса загруженного в генератор бурого угля.

Состав и количество полученного шлака.

SiO_2	15,70 гр	39,2%
Al_2O_3	7,30 „	18,2 „
CaO	11,12 „	27,8 „
MgO	3,63 „	9,1 „
FeO	0,05 „	0,1 „
MnO	2,05 „	5,1 „
CaS	0,20 „	0,5 „
	40,05 гр	100,0%.

или 40% от веса загруженного в генератор бурого угля.

3. Количество выделившихся из шихты кислорода и серы.

Из Fe_2O_3 выделится: $2,11 \times \frac{48}{112} = 0,90$ гр O_2

„ FeO „ $(2,28 - 0,04) \times \frac{16}{56} = 0,64$ „ „

„ MnO „ $1,58 \times \frac{16}{55} = 0,46$ „ „

Из SiO_2 выделится: $0,39 \times \frac{32}{28} = 0,44$ гр O_2

„ P_2O_5 „ $0,09 \times \frac{80}{62} = 0,12$ „ „

„ SO_3 „ $0,08 \times \frac{48}{32} = 0,12$ „ „

„ CaO „ $0,09 \times \frac{16}{56} = 0,03$ „ „

2,71 гр O_2

Улетит серы . . . . . 0,01 „ S

Всего . . . 2,72 гр.

РАСЧЕТ генераторного газа.

Состав угля в мол. об.

C	42,36 : 12 = 3,530 мо
H_2	2,94 : 2 = 1,470 „
O_2	11,92 : 32 = 0,373 „
N_2	2,00 : 28 = 0,071 „
S	0,78 : 32 = 0,024 „
H_2O	18,00 : 18 = 1,000 „

Состав по Дюлонгу:

C	3,530 мо
H_2	$1,470 - 2 \times 0,373 = 0,724$ „
N_2	0,071 „
S	0,024 „
H_2O	$1,000 + 2 \times 0,373 = 1,746$ „

Перейдет в чугун C. . . . 0,27 : 12 = 0,023 мо.

Выделится при реакциях востановления в горне O_2 . . . . . 2,71 : 32 = 0,085 мо.

1. Состав газа.

		В горне.	В газопроводе.
CH_4	$^1/_{15} \times 3,530 = 0,235$ мо	—	0,235 мо
CO_2	Принимаем, что на реакцию $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ идет вся конституционная вода т.-е. 0,746 мо . . .	—	0,746
CO	3,530 — 0,235 — 0,023 = 3,272 мо	3,272 мо	—
	3,272 — 0,746 = 2,526 мо	—	2,526
H_2	Образуется по реакциям:		
	1) $C + H_2O_{пар} = CO + H_2$. . . . . x мо	x	—
	2) $CO + H_2O_{пар} = CO_2 + H_2$. . . 0,746 „		
	3) Из каменного угля . . . . . 0,724 „		
	$1,470 + x$ мо		
	4) На образование CH_4 пойдет $2 \times 0,235 = 0,470$ „		
	$1,000 + x$ мо	—	$1,000 + x$

		В горне.	В газопроводе.
$S_б$	По реакции $FeS_2 = FeS + S$. 0,024 : 12 = 0,002 мо	—	0,002
SO_2	„ $FeS + 1{,}5\,O_2 + SiO_2 =$ $FeOSiO_2 + SO_2$ [1]) = 0,024 : 2 = 0,012 мо	0,012	0,012
N_2	Из воздуха по реакциям:		
	1) $C + \frac{1}{2}(O_2 + 3{,}762\ N_2) = CO + 1{,}881\ N_2$;		
	$(3{,}272 - x) \times 1{,}881 = 6{,}155 - 1{,}881\ x$ мо		
	2) $FeS + 1{,}5\,(O_2 + 3{,}762\ N_2) + SiO_2 =$ $= FeO\ SiO_2 + SO_2 + 1{,}5 \times 3{,}762\ N_2$		
	$0{,}012 \times 1{,}5 \times 3{,}762 = 0{,}068$ мо		
	$6{,}223 - 1{,}881\ x$ мо		
	Кислород, выделившийся при реакциях возстановления в шлаке, заменит собой часть воздуха [2]), а потому азота поступит менее на $0{,}085 \times 3{,}762 = 0{,}320$ мо		
	$5{,}903 - 1{,}881\ x$ мо	$5{,}903 - 1{,}881\ x$	-
	Из каменного угля 0,071		
	$5{,}974 - 1{,}881\ x$ мо	—	$5{,}974 - 1{,}881\ x$
H_2O	Пара разложится. . . . . x мо		
	„ пройдет, не разложившись . . . . . 0,5 x „		
	Должно быть доставлено . . . . . 1,5 x мо		
	В горне останется . . . . . 0,5 x „	0,5 x	
	Поступит из влаги угля . . . . . 1,000 „		
	Всего воды в газе будет. . . 1,000 + 0,5 x мо	—	1,000 + 0,5 x

Составление и решение уравнения.

Приход тепла в горне генератора составится из тепла, развиваемого реакциями горения, тепла, вносимого коксом, золой и флюсом, нагретыми до 1000°, и тепла воздуха нагретого до 200°. Тепло, вносимое паром, не считаем, ибо при расширении пара в соплах происходит затрата тепла и мы условились ранее считать работу расширения пара эквивалентной теплоте его нагрева.

Теплоту шлакообразования в горне генератора учесть довольно затруднительно, потому что поступают в горн не чистые окислы, а их соединения, как в золе, так и в мартеновском шлаке. Теплота дальнейших реакций шлакования в этом случае по всей вероятности не велика и мы ей пренебрежем.

Реакции развивают тепла:

1) $C + \frac{1}{2}O_2 = CO + 29.430$ кал,

$(3{,}272 - x) \times 29.430 = 96.295 - 29.430\ x$ кал,

2) $FeS + 1{,}5\,O_2 + SiO_2 = FeOSiO_2 + SO_2 +$ $+ 127.793$ кал,

$0{,}012 \times 127.793 = 1.534$

3) $C + H_2O_{пар} = CO + H_2 - 28.380$ кал,

$x \times 28.380 = 28.380\ x$

$97.829 - 57.810\ x$ кал.

Кокс, нагретый до 1000°, внесет тепла:

$$\frac{3{,}272 \times 12 \times 0{,}363 \times 1000}{1000} = 14.253 \text{ кал.}$$

[1]) Для большей точности эту серу следовало бы ввести и в расчет шихты, но тогда нужно учесть распределение всей серы угля на серу колчеданную и серу органической массы угля, чего мы точно не знаем и потому для упрощения расчетов упускаем из вида.

[2]) Наш подсчет количества кислорода, выделяющегося при восстановлении окислов золы, будет не совсем соответствовать действительности, ибо мы пользуемся анализом золы полученной при сжигании угля, т.-е. уже окисленной. Но указанное допущение даст нам возможность свести материальный баланс генератора, т.-е. бухгалтерски проконтролировать наши подсчеты.

Зола и флюс нагретые до 1000° внесут тепла:

$(22{,}00 + 27{,}18) \times 0{,}260$ [1]) $\times 1000 = 12.787$ кал.

Воздух, нагретый до 200°, внесет тепла:

$$\frac{(5{,}903 - 1{,}881\,x) \times 4{,}762 \times 1{,}363}{3{,}762} =$$

$$= 10.183 - 3.245\,x \text{ кал.}$$

Весь приход тепла в горне: $135.052 - 61.055\,x$ кал.

Расход тепла в горне генератора будет слагаться из тепла, идущего на нагрев газов до 1000°, тепла, поглощаемого реакциями восстановления в шлаке, тепла идущего на нагрев до 1350° получаемых шлака, и чугуна и, наконец, неизбежных потерь на лучеиспускание стенок горна генератора, которое мы примем в 20% от тепла выделяемого в горне реакциями горения.

Газы, нагретые до 1000°, унесут из горна:

$CO + H_2 + N_2$	$(9{,}175 - 0{,}881\,x) \times 7.135 =$	
	$= -6.286\,x + 65.464$	кал.
SO_2. . .	$0{,}012 \times 11.317 =$	136 „
H_2O . .	$0{,}500\,x \times 8.750 = +4.375\,x$	„
	$-1.911\,x + 65.600$	кал.

Реакции восстановления поглотят:

1) $Fe_2O_3 = 2\,Fe + 1{,}5\,O_2 - 200.307$ кал,
$2{,}11 \times 1.788$ [2]) $= 3.763$ кал
2) $FeO = Fe + 0{,}5\,O_2 - 66.713$ кал,
$(2{,}28 - 0{,}04) \times 1.191 = 2.668$ „
3) $MnO = Mn + 0{,}5\,O_2 - 90.760$ кал,
$1{,}58 \times 1.650 = 2.607$ „
4) $SiO_2 = Si + O_2 - 196.420$ кал,
$0{,}39 \times 7.015 = 2.736$ „
5) $(CaO)_4P_2O_5 = 4\,CaO + P_2 + 2{,}5\,O_2 -$
$- 530.100$ кал,
$0{,}09 \times 8.550 = 770$ „
6) $SO_3 = S + 1{,}5\,O_2 - 102.820$ кал,
$0{,}02 \times 3.213 = 64$ „
7) $CaO + S = CaS + 0{,}5\,O_2 - 41.340$ кал,
$0{,}09 \times 738 = 66$ „
12.674 кал. [3])

Чугун, нагреваемый до 1350°, унесет:

$6{,}70 \times 0{,}280 \times 1000 = 1.876$ кал

Шлак, нагреваемый до 1350°, унесет:

$40{,}05 \times 0{,}450 \times 1000 = 18.022$ „

Потери на лучеиспускание горна составят:

$(97.829 - 57.810\,x) \times 0{,}20 = -11.562\,x + 19.566$ кал

Весь расход тепла в горне: $-13.473\,x + 117.738$ кал.

Приравнивая приход тепла расходу, и решая полученное уравнение определяем x.

$$135.052 - 61.055\,x = 117.738 - 13.473\,x.$$

$$x = 0{,}364 \text{ мо.}$$

Состав полученного генераторного газа:

CH_4	0,235 мо	2,07%
CO_2	0,746 „ . . .	6,57 „
CO	2,526 „	22,24 „
H_2	1,364 „	12,01 „
S_6	0,002 „	0,02 „
SO_2	0,012 „	0,11 „
N_2	5,289 „	46,57 „
H_2O	1,182 „	10,41 „
	11,356 мо	100,00%

2. Расчет распределения воздуха между рядами фурм.

Как уже было сказано, мы должны иметь внизу горна генератора температуру 1350°. Регулировать эту температуру мы можем, меняя количество воздуха вдуваемого в нижние фурмы, т.-е. увеличивая или уменьшая количество углерода сжигаемого чистым воздухом внизу горна.

Действительно, пусть в поясе нижних фурм сгорит y мо углерода; тогда приход тепла в этом поясе составится из:

Тепла развиваемого реакциями горения:

$C + 0{,}5O_2 = CO + 29.430$ кал . . . . $29.430\,y$ кал,
$FeS + 1{,}5O_2 + SiO_2 = FeO\,SiO_2 + SO_2 + 127.793$ кал
. . . . $0{,}012 \times 127.793 = 1.534$ кал.

Тепла вносимого коксом, золой и флюсом, нагретыми до 1350°:

$$\frac{y \times 12 \times 0{,}385 \times 1350}{1000} = 6.237\,y \text{ кал,}$$

$$\frac{(22{,}00 + 27{,}18) \times 0{,}286 \times 1350}{1000} = 18.988 \text{ кал.}$$

Тепла, вносимого нагретым до 200° воздухом:

требуется для горения кислорода: $0{,}5y + 1{,}5 \times 0{,}012$	$= 0{,}5y + 0{,}018$ мо
имеется в шихте	$- 0{,}085$ „
Необходимо доставить кислорода	$0{,}5y - 0{,}067$ мо
„ „ воздуха	$(0{,}5y - 0{,}067) \times 4{,}762$ мо

Воздух при 200° внесет тепла:

$(0{,}5y - 0{,}067) \times 4{,}762 \times 1.363 = 3.245\,y - 435$ кал.

Весь приход тепла: $38.912\,y + 20.087$ кал.

---

[1]) Теплоемкость шлака при 1000° (см. табл. в приложениях к V части).

[2]) Тепло реакции на 1 гр восстановленного железа (см. табл. проф. М. А. Павлова).

[3]) Не учтена теплота разложения силикатов и $CaSO_4$, но эта неточность будет отчасти компенсировать, неучтенную нами выше, теплоту шлакообразования.

Расход тепла в поясе нижних фурм составится из:

Тепла идущего на нагрев газов до 1350°

$CO + N_2$ . . $[y + (0{,}5\,y - 0{,}067) \times 3{,}762] \times 9.846 =$
$= 28.366\,y - 2.481$ кал

SO_2 . . . . $0{,}012 \times 15.941 =$ $+ \quad 191$ „

$28.366\,y - 2.290$ кал.

Тепла идущего на реакции восстановления $- 12.674$ „

„ „ „ нагрев чугуна до 1350° $- 1.876$

„ „ „ „ шлака до 1350° $- 18.022$ „

Потерь на лучеиспускание, которое для нижнего пояса примем в $^2/_3$ лучеиспускания всего горна.

$$(19.566 - 11.562 \times 0{,}364) \times \frac{2}{3} = 10.238 \text{ кал}$$

Весь расход тепла: $28.366\,y + 40.520$ кал.

Составляем уравнение и находим y.

$$38.912\,y + 20.087 = 28.366\,y + 40.520$$
$$y = 1{,}938 \text{ мо.}$$

Общее количество воздуха вдуваемого в горн генератора будет:

$$\frac{(5{,}903 - 1{,}881 \times 0{,}364) \times 4{,}762}{3{,}762} = 6{,}605 \text{ мо/100 гр уг.}$$

или $6{,}605 \times 0{,}0224 \times 10 = \sim 1{,}48$ м³/кг угля при 0°.

Количество воздуха вдуваемого в нижние фурмы будет: $(0{,}5 \times 1{,}938 - 0{,}067) \times 4{,}762 =$
$= 4{,}295$ мо/100 гр угля

или $4{,}295 \times 0{,}0224 \times 10 = \sim 0{,}96$ м³/кг угля при 0°

т.-е. $\frac{0{,}96 \times 100}{1{,}48} = \sim 65\%$.

Количество пара вдуваемого в верхние фурмы будет:

$0{,}364 \times 1{,}5 = 0{,}546$ мо/100 гр

или $0{,}546 \times 0{,}0224 \times 10 = \sim 0{,}12$ м³/кг угля при 0°

или $\frac{0{,}546 \times 18 \times 100}{100} = 9{,}83\%$ от веса угля.

Таким образом мы нашли что, на каждый килограмм, загружаемого в генератор бурого угля, в генератор нужно вдувать, считая об'емы при 0°, 1,48 м³ воздуха и 0,12 м³ водяного пара. Из этого общего количества в нижние фурмы должно поступать 65% воздуха, т.-е. 0,96 м³ дутья; в верхние фурмы остальные 32% воздуха и все количество пара, т.-е., $1{,}48 - 0{,}96 + 0{,}12 = 0{,}64$ м³ дутья. Согласно с этими об'емами должны быть расчитаны сечения и число фурм верхнего и нижнего ряда. Кроме того из расчета видно, что количества тепла будут вполне достаточны для получения температуры в горне 1350°C.

3. Определение температуры газа на колошнике генератора.

Приход тепла в генераторе составится:

1) от реакций в горне
$97.829 - 57.810 \times 0{,}364 = 76.786$ кал

2) от нагретого воздуха:
$10.183 - 3.245 \times 0{,}364 = 9.002$ „

3) от реакции образования метана
$0{,}235 \times 20.870 = 4.904$ „

4) от реакции $CO + H_2O_{пар} =$
$= CO_2 + H_2 + 10.410$ кал.
$0{,}746 \times 10.410 = 7.766$ „

Всего: . . . 98.458 кал.

Расход тепла в генераторе составится:

1) от реакций восстановления в горне . . . . . 12.674 кал,

2) тепла уносимого чугуном. . . . 1.876 „

3) „ „ шлаком . . . . 18.022 „

4) лучеиспускания всего генератора, которое мы примем в полтора раза более лучеиспускания горна
$(19{,}566 - 11{,}562 \times 0{,}364) \times 1{,}5 = 23.035$ „

5) тепла поглощаемого реакцией
$FeS_2 = FeS + S - 16.700$ кал
$0{,}012 \times 16.700 = 200$ „

6) тепла идущего на испарение влаги угля . . . . . $1{,}746 \times 10.550 = 18.420$ „

7) тепла идущего на нагрев газа . . x „

Всего: . . . $74.227 + x$ кал.

$98.458 = 74.227 + x$; $x = 24.231$ кал.

Генераторный газ нагретый до 300° должен содержать:

CH_4	$0{,}235 \times 3.474 =$	816 кал
$CO_2 + SO_2$	$0{,}758 \times 2.926 =$	2.218 „
$CO + H_2 + N_2$	$9{,}179 \times 2.046 =$	18.779 „
H_2O	$1{,}182 \times 2.461 =$	2.909 „
		24.722 кал.

Генераторный газ нагретый до 200° должен содержать:

CH_4	$0{,}235 \times 2.196 =$	516 кал
$CO_2 + SO_2$	$0{,}758 \times 1.893 =$	1.435 „
$CO + H_2 + N_2$	$9{,}179 \times 1.355 =$	12.438 „
H_2O	$1{,}182 \times 1.630 =$	1 927 „
		16.316 кал.

$$\frac{24.722 \text{ кал} - 16.316 \text{ „}}{8.406 \text{ кал}} \quad \frac{24.231 \text{ кал} - 16.316 \text{ „}}{7.915 \text{ „}} \qquad \frac{x}{100} = \frac{7.915}{8.406};$$

$x = 94$; $t = 200 + 94 = 294$°C.

Таким образом температура газа на колошнике, при правильной работе генератора, должна быть близка к 300°. При недостатке вдуваемого пара, против теоретически расчитанного количества, температура на колошнике будет подниматься и дойдет, при полном отсутствии пара, до 550°.

4. Об'ем и вес генераторного газа.

Об'ем газа $11{,}356 \times 0{,}0224 \times 10 =$
$= \sim 2{,}544$ м³/кг бурого угля.

Вес газа:

CH_4	$0{,}235 \times 16 =$	3,760 гр
CO_2	$0{,}746 \times 44 =$	32,824 „
CO	$2{,}526 \times 28 =$	70,728 „
H_2	$1{,}364 \times 2 =$	2,728 „
S_6	$0{,}002 \times 192 =$	0,384 „
SO_2	$0{,}012 \times 64 =$	0,768 „
N_2	$5{,}289 \times 28 =$	148,092 „
H_2O	$1{,}182 \times 18 =$	21,276 „
		280,560 гр

$$\frac{280{,}560 \times 10}{2{,}544 \times 1000} = \sim 1{,}10 \text{ кг/м}^3.$$

5. Теплопроизводительная способность газа.

CH_4	сгорая выделит	$0{,}235 \times 192.400 =$	45.214	кал
CO	„ „	$2{,}526 \times 68.220 =$	172.324	„
H	„ „	$1{,}364 \times 57.810 =$	78.853	„
S_6	„ „	$0{,}002 \times 6 \times 69.800 =$	838	„
			297.229	кал

$297.229 \times 10 = \sim 2972$ Кал/кг угля,

$$\frac{297.229 \times 10}{2{,}544} = \sim 1168 \text{ Кал/м}^3 \text{ газа.}$$

6. Об'ем вторичного воздуха.

Для горения	CH_4	нужно	$0{,}235 \times 2 = 0{,}470$	мо O_2
„ „	CO	„	$2{,}526 : 2 = 1{,}263$	„ „
„ „	H_2	„	$1{,}364 : 2 = 0{,}682$	„ „
„ „	S_6	„	$0{,}002 \times 6 = 0{,}012$	„ „
			2,427	мо O_2
С воздухом поступит			$2{,}427 \times 3{,}762 =$ 9,130	„ N_2
			11,557	мо воз.

$11{,}557 \times 0{,}0224 \times 10 = \sim 2{,}59$ м³/кг угля.

7. Состав и количество продуктов горения.

CO_2	$0{,}235 + 0{,}746 + 2{,}526 =$	3,507 мо
H_2O	$0{,}235 \times 2 + 1{,}364 + 1{,}182 =$	3,016 „
SO_2	$0{,}002 \times 6 + 0{,}012 =$	0,024 „
N_2	$5{,}289 + 9{,}130 =$	14,419 „
		20,966 мо

$20{,}966 \times 0{,}0224 \times 10 = \sim 4{,}70$ м³/кг угля.

8. Материальный баланс генератора.

Приход:

Бурого угля	100,00 гр
Мартеновского шлака (флюс)	27,18 „
Воздуха $6{,}605 \times 28{,}84$ [1]) $=$	190,49 „
Пара	9,83 „
	327,50 гр.

Расход:

Генераторного газа	280,56 гр
Шлака	40,05 „
Чугуна	6,70 „
Неучтенный нами в шлаке кислород пошедший на окисление железа по реакции $FeS + 1{,}5O_2 + SiO_2 = FeO\,SiO_2 + SO_2$, и улетучившаяся сера: $0{,}012 \times 0{,}5 \times 32 + 0{,}01 =$	0,20 „
	327,51 гр.

9. Тепловой баланс генератора.

Приход:

Теплопроизводительная способность угля	370.310 [2]) кал	100,00%
Тепло вносимое нагретым воздухом	9.002 „	2,43 „
	379.312 кал.	102,43%

Расход:

Теплопроизводительная способность газа	297.229 кал	80,26%
Физическая теплота горячего газа	24.231 „	6,54 „
Тепло уносимое расплавленным чугуном	1.876 „	0,51 „
Тепло уносимое расплавленным шлаком	18.022 „	4,87 „
Тепло потраченное на реакции восстановления	12.674 „	3,42 „
Потери тепла на лучеиспускание генератора	23.035 „	6,22 „
Теплопроизводительная способность углерода перешедшего в чугун $0{,}023 \times 97.650 =$	2.246 „	0,61 „
	379.313 кал.	102,43%

[1]) 28,84 вес грамм-молекулярного об'ема воздуха.

[2]) См. предыдущий расчет генераторного газа из бурого угля.

Расчет генераторного газа из дров.

При расчете генераторного газа из дров нужно принимать во внимание, что:

1) из всей химически связанной воды клетчатки примерно одна треть реагирует в верхней части генератора с образующейся на колосниках окисью углерода и дает CO_2 и H_2, а два трети переходят в газ в виде влажности.

2) при разложении клетчатки выделяется тепло, которое согласно Менделееву, равно 18.400 кал на 1 мо химически связанной воды (Дюлонга)[1].

Расчет показывает, что за счет этого выделения во время сухой перегонки идет реакция:

$$C + H_2O_{пар} = CO + H_2 - 28.380 \text{ кал},$$

и потому ее надо считать осуществляющейся, как бы на колосниках, хотя, конечно, она идет в средней части генератора.

Особого рассмотрения потребуют вопросы:

а) об осушке генераторного газа из дров;

б) о работе дровяных генераторов на сушеных дровах;

в) о работе генератора на влажном и сухом воздухе т.-е. разумно ли лить в зольник генератора воду.

РАСЧЕТ газа при нормальной работе, т.-е. при условии введения под колосники столько паров воды, чтобы температура на колосниках была 1000°C.

1. Состав воздушно-сухих березовых дров.

	В %%	В молекулярных об'емах.	По Дюлонгу.
C	37,30%	: 12 = 3,108 мо	3,108 мо
H_2	4,54 „	: 2 = 2,270 „	0,106 „
O_2	34,62 „	: 32 = 1,082 „	—
N_2	0,23 „	: 28 = 0,008 „	0,008 „
H_2O	23,08 „	: 18 = 1,282 „	3,446 „
Золы	0,23 „		
	100,00%		

Следовательно, конституционный воды имеем:

$$2 \times 1,082 = 2,164 \text{ мо}.$$

2. Состав генераторного газа.

		На колосниках.	В газопроводе.
CH_4	$^1/_{15} \times 3,108 = 0,207$ мо	—	0,207 мо
CO_2	$^1/_3 \times 2,164 = 0,721$ мо (см. выше)	—	0,721
CO	$3,108 - 0,207 = 2,901$ мо.	2,901 мо	—
	$2,901 - 0,721 = 2,180$ мо.	—	2,180
H_2	По реакции $C + H_2O_{пар} = CO + H_2$ . . . . . x мо	x	—
	По реакции $CO + H_2O_{пар} = CO_2 + H_2$ 0,721 „		
	Из дров . . . . . 0,106 „		
	$0,827 + x$ мо		
	На образование CH_4 . . . . $2 \times 0,207 = 0,414$ „		
	$0,413 + x$ мо	—	$0,413 + x$
N_2	По реакции $C + {}^1/_2O_2 + \frac{3,762}{2} N_2 = CO + \frac{3,762}{2} N_2$		
	$(2,901 - x)\,1,881 = 5,457 - 1,881\,x$ мо	$5,457 - 1,881\,x$	—
	Из дров . . . . . 0,008 „		
	$5,465 - 1,881\,x$ мо	—	$5,465 - 1,881\,x$
H_2O	Влажность дров . . . . . 1,282 мо		
	$^2/_3$ конституционной воды . . . 1,443 „		
	Пройдет неразложенной через колосники . . . . . $0,250\,x$ „	$0,250\,x$	—
	$2,725 + 0,250\,x$ мо	—	$2,725 + 0,250\,x$
	(Необходимо доставить H_2O под колосники $1,250\,x$ мо).		

[1] См. ниже, расчет генераторного газа из дров, без подвода пара под колосники.

Количество тепла выделенного на колосниках.

По реакции $C + {}^1/_2 O_2 = CO + 29.430$ кал

$(2{,}901 - x)\ 29.430 = 85.376 - 29.430\,x$

По реакции $C + H_2O_{пар} = CO + H_2 - 28.380$ кал

$x \times 28.380 = -28.380\,x$

Поправка Менделеева 18.400 кал на 1 мо воды Дюлонга:

$18.400 \times 2{,}164 = 39.818$

$125.194 - 57.810\,x$

Уголь приносит тепла при 1000°C.

$2{,}901 \times 0{,}363 \times 1000 \times 12 = 12.637$

Всего тепла на колосниках . . . $137.831 - 57.810\,x$

Газ, нагретый до 1000°C уносит с колосников тепла:

$CO + H_2 + N_2$

$(8{,}358 - 0{,}881\,x) \times 7.135 = 59.634 - 6.286\,x$ кал

H_2O. . . . $0{,}250\,x \times 8.750 = + 2.188\,x$ „

$59.634 - 4.098\,x$ кал.

Принимая лучеиспускание колосниковой решетки 20%, получим уравнение:

$0{,}8\ (137.831 - 57.810\,x) = 59.634 - 4.098\,x$

откуда $x = 1{,}201$ мо.

Состав газа:

CH_4	0,207 мо	1,89%
CO_2	0,721 „	6,58 „
CO	2,180 „	19,90 „
H_2	1,614 „	14,74 „
N_2	3,206 „	29,27 „
H_2O	3,025 „	27,62 „
	10,953 мо	100,00%

3. Поверка состава генераторного газа.

		C	H_2	O_2	N_2
CH_4	1,89	1,89	3,78	—	—
CO_2	6,58	6,58	—	6,58	—
CO	19,90	19,90	—	9,95	—
H_2	14,74	—	14,74	—	—
N_2	29,27	—	—	—	29,27
H_2O	27,62	—	—	—	—
		28,37	18,52	16,53	29,27

Количество N_2 из дров

$x : 28{,}37 = 0{,}008 : 3{,}108;\ x = 0{,}07,$

N_2 воздуха $29{,}27 - 0{,}07 = 29{,}20,$

O_2 воздуха $29{,}20 : 3{,}762 = 7{,}76,$

O_2 воды $16{,}53 - 7{,}76 = 8{,}77,$

H_2 воды $8{,}77 \times 2 = 17{,}54,$

H_2 дров $18{,}52 - 17{,}54 = 0{,}98,$

Отношение H_2 дров к C в газе

$$\frac{0{,}98}{28{,}37} = 0{,}034,$$

Отношение H_2 к C в дровах

$$\frac{0{,}106}{3{,}108} = 0{,}034.$$

4. Температура генераторного газа.

Количество тепла выделенного в генераторе:

по реакции $C + H_4 = CH_4 + 20.870$ кал

$0{,}207 \times 20.870 = 4.320$ кал

по реакции $C + {}^1/_2 O_2 = CO + 29.430$ кал

$(2{,}901 - 1{,}201) \times 29.430 = 50.031$ „

по реакции

$CO + H_2O_{пар} = CO_2 + H_2 + 10.410$ кал

$0{,}721 \times 10.410 = 7.506$ „

поправка Менделеева . . . . . 39.818 „

101.675 кал

испарение воды дров

$3{,}446 \times 10.550 = -36.355$ кал

по реакции

$C + H_2O_{пар} = CO + H_2 - 28.380$ кал

$1{,}201 \times 28.380 = -34.084$ „

31.236 кал.

Полагая лучеиспускание генератора 40%, найдем, что количество теплоты заключающейся в газе:

$0{,}6 \times 31.236 = 18.742$ кал.

Температура газа определится

$t = 230°C.$

5. Количество первичного воздуха на 1 кг дров.

$5{,}457 - 1{,}881 \times 1{,}201 = 3{,}198$ мо N_2

$3{,}198 : 3{,}762 = 0{,}850$ „ O_2

4,048 мо воздуха

$$\frac{4{,}048 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 0{,}907\ м^3.$$

6. Количество пара в % веса дров.

$1{,}25 \times 1{,}201 = 1{,}501$ мо H_2O,

$$\frac{1{,}501 \times 18}{100} \times 100 = 27{,}02\%.$$

7. Количество генераторного газа на 1 кг дров.

$$\frac{10{,}953 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 2{,}453\ м^3.$$

8. Количество вторичного воздуха на 1 кг дров.

Для горения CH_4 нужно $0{,}207 \times 2 = 0{,}414$ мо O_2
„ „ CO „ $2{,}180 : 2 = 1{,}090$ „ „
„ „ H_2 „ $1{,}614 : 2 = 0{,}807$ „ „

2,311 мо O_2

$2{,}311 \times 3{,}762 = 8{,}694$ „ N_2

11,005 мо возд.

$$\frac{11{,}005 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 2{,}465 \text{ м}^3.$$

9. Поверка расхода первичного и вторичного воздуха.

Для горения в условиях простой топки нужно кислорода:

$3{,}108 + 0{,}106 : 2 = 3{,}161$ мо O_2,

азота

$3{,}161 \times 3{,}762 = 11{,}892$ „ N_2

15,053 мо возд.

Сумма первичного и вторичного воздуха

$4{,}048 + 11{,}005 = 15{,}053$ мо возд.

10. Вес 1 м³ генераторного газа.

CH_4	$0{,}207 \times 16 =$	3,312 гр
CO_2	$0{,}721 \times 44 =$	31,724 „
CO	$2{,}180 \times 28 =$	61,040 „
H_2	$1{,}614 \times 2 =$	3,228 „
N_2	$3{,}206 \times 28 =$	89,768 „
H_2O	$3{,}025 \times 18 =$	54,450 „
		243,522 гр

$$\frac{243{,}522 \times 1000}{100 \times 2{,}453 \times 1000} = 0{,}993 \text{ кг/м}^3.$$

11. Материальный баланс генератора.

Приход.

Дров поступило . . . . . 100,000 гр

Воздуха:

N_2	$3{,}198 \times 28 = 89{,}544$ гр	
O_2	$0{,}850 \times 32 = 27{,}200$ „	116,744 „
Пара	$1{,}501 \times 18 = 27{,}018$ „	
		243,762 гр.

Расход.

Газа получено	243,522 „
Золы	0,230 „
	243,752 гр.

12. Состав и количество продуктов горения.

CO_2	$0{,}207 + 0{,}721 + 2{,}180 =$	3,108 мо
H_2O . . .	$0{,}207 \times 2 + 1{,}614 + 3{,}025 =$	5,053 „
N_2	$3{,}206 + 8{,}694 =$	11,900 „
		20,061 мо

$$\frac{20{,}061 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 4{,}494 \text{ м}^3.$$

13. Вес 1 м³ продуктов горения.

CO_2	$3{,}108 \times 44 =$	136,752 гр
H_2O	$5{,}053 \times 18 =$	90,954 „
N_2	$11{,}900 \times 28 =$	333,200 „
		560,906 гр

$$\frac{560{,}906 \times 1000}{100 \times 4{,}494 \times 1000} = 1{,}25 \text{ кг/м}^3.$$

14. Теплотворная способность 1 м³ газа.

Горение CH_4 дает .	$0{,}207 \times 192.400 =$	39.827	кал
„ CO „ .	$2{,}180 \times 68.220 =$	148.720	„
„ H_2 „ .	$1{,}614 \times 57.810 =$	93.305	„
		281.852	кал

$$\frac{281{,}852 \times 1000}{100 \times 2{,}453} = 1149 \text{ Кал/м}^3.$$

15. Тепловой баланс генератора.

Приход.

Потенциальная энергия дров:

Горение C дает . .	$3{,}108 \times 97.650 =$	303.496 кал
„ H_2 „ . .	$0{,}106 \times 57.810 =$	6.128 „
Поправка Менделеева		39.818 „
		349.442 кал
Испарение воды . .	$3{,}446 \times 10.550 =$	36.355 „
		313.087 кал.

Расход.

Выделено в генераторе	31.236 кал
Потенциальная энергия газа	281.852 „
	313.088 кал.

16. Теоретическая температура горения.

Теоретическую температуру горения влажного холодного газа при теоретическом расходе холодного воздуха найдем аналогично предыдущим равной:

$t = 1614°$ C.

17. Горение влажного газа, нагретого до 230°C при $1^1/_2$ расходе воздуха, нагретого до 400°C.

Состав продуктов горения:

CO_2		3,108 мо
H_2O		5,053 „
N_2	$11,900 + {}^1/_2 \times 8,694 =$	16,247 „
O_2	${}^1/_2 \times 2,311 =$	1,155 „
		25,563 мо

Теоретическая температура горения.

Количество тепла в продуктах горения:

Физическая теплота газа	18.742 кал
Тепло, приносимое воздухом $1,5 \times 11,005 \times 2.763 =$	45.610 „
Тепло горения газа	281.852 „
	346.204 кал.

Температура горения вычислится

$$t = 1606°\ C.$$

Осушенный газ из сырых дров.

Осушка генераторного газа охлаждением до 20° C даст следующие результаты.

Об'ем абсолютно сухого газа

$$10,953 - 3,025 = 7,928 \text{ мо.}$$

Об'ем паров воды, насыщающих пространство при 20° C

$$x = 7,928 \frac{0,0238^1)}{1,0333 - 0,0238} = 0,187 \text{ мо.}$$

1. Состав осушенного генераторного газа.

CH_4	0,207 мо	2,55%
CO_2	0,721 „	8,89 „
CO	2,180 „	26,87 „
H_2	1,614 „	19,89 „
N_2	3,206 „	39,51 „
H_2O	0,187 „	2,29 „
	8,115 мо	100,00%.

2. Количество осушенного генераторного газа из 1 кг дров.

$$\frac{8,115 \times 0,0224 \times 1000}{100} = 1,818 \text{ м}^3.$$

3. Теплотворная способность 1 м³ газа.

$$\frac{281,852 \times 1000}{100 \times 1,818} = 1550 \text{ Кал/м}^3.$$

[1]) См. приложения к V части.

4. Состав и количество продуктов горения.

CO_2	3,108 мо
H_2O	2,214 „
N_2	11,900 „
	17,222 мо

$$\frac{17,222 \times 0,0224 \times 1000}{100} = 3,858 \text{ м}^3.$$

5. Теоретическая температура горения.

При теоретическом расходе воздуха и холодном газе и воздухе будет

$$t = 1871°\ C.$$

Мы получили, что теоретическая температура горения осушенного газа на 257° выше температуры горения влажного газа. Но осушивая дровяной газ, мы из него удаляем продукты сухой перегонки, из которых смола представляет большую пирометрическую ценность, и теряем его физическую теплоту. Потеря физической теплоты газа для печей Сименса и Мартена не представляет потери. Смолы при осушке генераторного газа могут быть собраны и возвращены в генератор: опыты показывают, что они быстро стекают в зольник и разлагаются там на CO и H_2.

Таким образом осушка дровяного газа должна быть признана рациональной.

Генераторный газ из сухих дров.

В конце XIX века Одельштерн в Швеции пропагандировал генераторы на сухих дровах. Выгоды такой работы могут быть легко оценены.

1. Состав генераторного газа из абсолютно сухих дров.

CH_4	0,207 мо	2,14%
CO_2	0,721 „	7,46 „
CO	2,180 „	22,54 „
H_2	1,614 „	16,69 „
N_2	3,206 „	33,15 „
H_2O $2,270 - 2 \times 0,207 - 1,614 + 1,25x = 1,743$	„	18,02 „
	9,671 мо	100,00%

Следовательно этим путем можно понизить влажность газа только до 18%, но зато мы не потеряем физической теплоты газа.

2. Температура генераторного газа.

Приход тепла (см. стр. 67) . . . . + 101.675 кал

Расход:

испарение воды $2{,}164 \times 10.550 =$ — 22.830 „

По реакции

$C + H_2O_{пар} = CO + H_2 - 28.380$ кал — 34.084 „

44.761 кал

Отчисляя на лучеиспускание 40%, получим теплоту газа

$$0{,}6 \times 44.761 = 26.857 \text{ кал.}$$

Температура газа вычислится

$$t = 373^\circ \text{ C.}$$

3. Количество генераторного газа из 1 кг дров.

$$\frac{9{,}671 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 2{,}166 \text{ м}^3.$$

4. Теплотворная способность 1 м³ газа.

$$\frac{281{,}852 \times 1000}{100 \times 2{,}166} = 1301 \text{ Кал/м}^3.$$

5. Состав и количество продуктов горения.

CO_2	3,108 мо
H_2O	3,771 „
N_2	11,900 „
	18,779 мо

$$\frac{18{,}779 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 4{,}206 \text{ м}^3.$$

6. Теоретическая температура горения.

Количество тепла в продуктах горения газа нагретого до 373° С при холодном воздухе

$$281.852 + 26.857 = 308.709 \text{ кал.}$$

Температура горения

$$t = 1856^\circ \text{ C.}$$

Таким образом температура горения осушенного газа будет выше температуры горения газа, полученного из сушеных дров и несущего в себе все физическое тепло из генератора, а обе температуры значительно выше температуры горения влажного газа из самосохлых дров. Так как печи для сушки дров представляют устройства более дорогие и производство более хлопотливое, чем устройство для осушки генераторного газа, то очевидно осушка газа выгоднее всего, и потому ей должно быть отдано предпочтение.

Газ из генераторов без подвода пара под колосники.

В зольник дровяных генераторов и топок полугазовых печей очень часто, совсем не льют воды и температура на колосниках подымается выше 1000° С. Если дрова сухие и мелкие, то реакция разложения воды углеродом совсем не имеет места.

Определим состав газа, его температуру и вычисленную температуру горения при теоретически необходимом количестве воздуха и при $1^1/_2$ расходе в этих условиях.

1. Состав генераторного газа.

		В газопроводе.
CH_4	$^1/_{15} \times 3{,}108 = 0{,}207$ мо	0,207 мо
CO_2	Полагаем, что на образование CO_2 идет одна треть конституционной воды, т.-е. $2{,}164 : 3 = 0{,}721$ мо	0,721
CO	$3{,}108 - 0{,}207 - 0{,}721 = 2{,}180$ мо	2,180
H_2	$0{,}721 + 0{,}106 - 2 \times 0{,}207 = 0{,}413$мо	0,413
H_2O	Влажность дров $+ ^2/_3$ конституционной воды, т.-е. $1{,}282 + ^2/_3 \times 2{,}164 = 2{,}725$ мо	2,725
N_2	$\frac{3{,}762}{2}(2{,}180 + 0{,}721) = 5{,}457$ мо	
	Азот дров . . . . 0,008 „	
	5,465 мо	5,465

Состав газа[1]).

			По Орса.
CH_4	0,207 мо	1,77%	2,30%
CO_2	0,721 „	6,15 „	8,02 „
CO	2,180 „	18,62 „	24,26 „
H_2	0,413 „	3,53 „	4,60 „
H_2O	2,725 „	23,27 „	—
N_2	5,465 „	46,66 „	60,82 „
	11,711 мо	100,00%	100,00%

2. Поверка состава генераторного газа.

		C	H_2	O_2	N_2
CH_4 . . .	1,77	1,77	3,54	—	—
CO_2 . . .	6,15	6,15	—	6,15	—
CO . . .	18,62	18,62	—	9,31	—
H_2 . . .	3,53	—	3,53	—	—
H_2O . . .	23,27	—	23,27	11,63	—
N_2 . . .	46,66	—	—	—	46,66
		26,54	30,34	27,09	46,66

Количество азота в газе из дров

$$x : 26{,}54 = 0{,}008 : 3{,}108$$
$$x = 0{,}07,$$

азот воздуха	46,66 — 0,07 = 46,59,
кислород воздуха	46,59 : 3,762 = 12,38,
кислород воды	27,09 — 12,38 = 14,71,
водород воды	14,71 × 2 = 29,42,
водород дров	30,34 — 29,42 = 0,92.

Отношение $H_{2\ дров}$ к C в газе

$$0{,}92 : 26{,}54 = 0{,}034.$$

Отношение $H_{2\ дров}$ к C в дровах

$$0{,}106 : 3{,}108 = 0{,}034.$$

3. Количество генераторного газа.

$$\frac{11{,}711 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 2{,}623 \text{ м}^3.$$

4. Температура генераторного газа.

Количество тепла, выделенного в генераторе:

При образовании CH_4:
$$+ 0{,}207 \times 20.870 = + \quad 4.320 \text{ кал}$$
При образовании CO_2
$$+ 0{,}721 \times 97.650 = + \quad 70.406 \quad „$$
При образовании CO
$$+ 2{,}180 \times 29.430 = + \quad 64.157 \quad „$$
При испарении H_2O поглощено
$$- 3{,}446 \times 10.550 = - \quad 36.355 \quad „$$
При разложении H_2O
$$- 0{,}721 \times 57.810 = - \quad 41.681 \text{ кал}$$
Поправка Менделеева $+ \quad 39.818 \quad „$

100.665 кал.

Полагая лучеиспускание генератора 40%, найдем количество теплоты в газе.

$$0{,}6 \times 100.665 = 60.399 \text{ кал.}$$

Температура генераторного газа

$$t = 672° \text{ C.}$$

5. Теплотворная способность 1 м³ газа.

Горение CH_4 дает	0,207 × 192.400 =	39.827	кал
„ CO „	2,180 × 68.220 =	148.720	„
„ H_2 „	0,413 × 57.810 =	23.876	„
		212.423	кал

$$\frac{212{,}423 \times 1000}{100 \times 2{,}623} = 810 \text{ Кал/м}^3.$$

6. Тепловой баланс генератора.

Приход:

Потенциальная энергия дров . . . . 313.087 кал

313.087 кал.

Расход:

Потенциальная энергия газа . . . . . 212.423 кал
Физическая теплота газа . . . . . 100.665 „

313.088 кал.

7. Количество первичного воздуха.

5,457 мо N_2
5,457 : 3,762 = 1,451 „ O_2

6,908 мо возд.

$$\frac{6{,}908 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 1{,}547 \text{ м}^3.$$

8. Количество вторичного воздуха.

Для горения CH_4 нужно	0,207 × 2 =	0,414	мо	O_2
„ „ CO „	2,180 : 2 =	1,090	„	„
„ „ H_2 „	0,413 : 2 =	0,206	„	„
		1,710	мо	O_2
	1,710 × 3,762 =	6,433	„	N_2
		8,143	мо	воз.

$$\frac{8{,}143 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 1{,}824 \text{ м}^3.$$

[1]) Газ очень плохой по качеству. На практике обычно получаются лучшие результаты. См. стр. 72.

9. Поверка расхода первичного и вторичного воздуха.

Сумма первичного и вторичного воздуха

$$6{,}908 + 8{,}143 = 15{,}051 \text{ мо.}$$

Расход воздуха при горении в условиях простой топки . . . . . 15,053 мо.

10. Состав и количество продуктов горения.

CO_2	3,108 мо
H_2O	3,552 „
N_2	11,898 „
	18,558 мо

$$\frac{18{,}558 \times 0{,}0224 \times 1000}{100} = 4{,}157 \text{ м}^3.$$

11. Теоретическая температура горения.

Теоретическую температуру горения при теоретическом расходе холодного воздуха найдем равной

$$t = 1359°\text{C}.$$

12. Теоретическая температура горения газа, нагретого до 672°C при $1^1/_2$ расходе воздуха, нагретого до 400°C.

Количество и состав продуктов горения.

CO_2	3,108 мо
H_2O	3,552 „
N_2 . . . . 11,898 + 3,216 =	15,114 мо
O_2	0,855 „
	22,629 мо.

Количество тепла в продуктах горения:

физическая теплота газа	60.399 кал.
тепло, приносимое воздухом, нагретым до 400°C $12{,}215 \times 2.763 =$	33.750 „
тепло горения газа	212.423 „
	306.572 кал.

Температура горения:

$$t = 1610°\text{C}.$$

В результате нашего предположения, что до колосников доходит совершенно разложившаяся древесина и в реакциях на колосниках участия пары воды не принимают, мы получили состав генераторного газа, приводимый выше. На самом деле при употреблении толстых сырых дров до колосников генератора доходит клетчатка, т.-е. вода Дюлонга и пары конституционной воды принимают участие в реакциях на колосниках, что существенно меняет состав газа, что видно из нижеследующего расчета. Допустим, что до колосников доходит $^2/_3$ неразрушенной клетчатки, которая примет участие в газообразовании. Тогда:

1. Состав газа.

CH_4	$^1/_{15} \times 3{,}108 = 0{,}207$ мо	0,207 мо
CO_2	По предыдущему предположим	0,721 „
CO	$3{,}108 - 0{,}207 - 0{,}721 = 2{,}180$ мо	2,180 „
H_2	Получается по реакции $CO + H_2O_{пар} = CO_2 + H_2$ . . . . 0,721 мо	
	Из дров . . . . . $2{,}270 - {}^2/_3 \times 2 \times 1{,}082 =$ 0,827 „	
	1,548 мо	
	На образование CH_4 . . . . . $2 \times 0{,}207 =$ 0,414 „	
	1,134 мо . .	1,134 „
H_2O	Влажность дров, ... 1,282 „	
	Вода Дюлонга . . . . . ${}^2/_3 \times 2 \times 1{,}082 =$ 1,443 „	
	2,725 мо	
	На образование CO_2 по реакции $CO_2 + H_2O_{пар} = CO_2 + H_2$ . . . . 0,721 „	
	2,004 мо . .	2,004 „
N_2	С воздухом, идущим на образование CO поступает $\frac{3{,}762}{2}\{(2{,}180 + 0{,}721) - {}^2/_3 \times 1{,}082\} = 4{,}100$ „	
	Из дров . . . . . 0,008 „	
	3,108 мо . .	4,108 „

Итак, состав газа по Орса будет:

CH_4	0,207 мо	2,48%
CO_2	0,721 „	8,63 „
CO	2,180 „	26,11 „
H_2	1,134 „	13,58 „
H_2O	2,004 „	—
N_2	4,108 „	49,20 „
	10,354 мо	100,00%.

2. Теплотворная способность 1 м³ газа.

Теплотворная способность вычислится равной

1090 Кал/м³.

Таким образом мы в том же генераторе, из того же горючего получаем совершенно другой газ. Все зависит от метода ведения генератора.

Для правильного ведения генератора необходимо иметь в его очаге только 1000°С. Это достигается двумя методами:

1) работой на толстых сырых дровах, часть которых приходит на колосники не обугленными—быстрым ходом генератора, или

2) подачей под колосники нужного количества водяных паров, для понижения температуры очага до 1000°С.

Если работают на сухих мелкоколотых дровах, в генераторе идущем очень тихо, то можно получить генераторный газ состава несравненно худшего, чем при умелом управлении генератором.

Сравнивая работу генератора без введения воды в зольник с нормальной работой, собрав все полученные данные в нижеприведенную таблицу, необходимо отметить важность правильного ухода за генератором и правильной дозировки количества воды, вводимой в зольник.

	С введением в зольник воды.	Без введения в зольник воды.
Температура на колосниках	1000°С	выше 1000°С
Температура на колошнике	230°С	672°С
Теплотворная способность влажного газа	1149 Кал/м³	810 Кал/м³
Вычисленная температура горения холодного газа и холодного воздуха при теоретически необходимом количестве воздуха.	1614°С [1])	1359°С [1])
Количество теплоты, поступающей в печь в виде химической теплоты газа, по отношению к теплопроизводительной способности топлива, в %	90%	68%

Расчет полугенераторного газа.

(Генераторный газ высокой температуры).

В виду того, что получающийся в генераторе газ должен быть гораздо сильнее нагрет, чем в предыдущих случаях в генератор не приходится вдувать пар, но наоборот, является необходимость сжечь часть угля в угольную кислоту на колосниках. Обозначая через z неизвестное количество углерода, сгоревшее на колосниках в углекислоту, можно составить одно уравнение с одним неизвестным. Уравнение это получается, если приравнять количество тепла, полученное вследствие реакций и уменьшенное на величину лучеиспускания (30% всего выделенного в генераторе тепла),—количеству тепла, заключающегося в полугенераторном газе, нагретом до желаемой температуры. В нижеследуемом примерном расчете, температура выбрана 1100°С.

При решении этой задачи нужно иметь в виду, что метан в генераторе не образуется, но зато на колосниках имеет место реакция

$$C + O_2 = CO_2 + 97.650 \text{ кал},$$

которой в предыдущих случаях небыло.

Возьмем каменный уголь состава (см. стр. 47).

	В %%.	В молекулярных об'емах по Дюлонгу.
C	72,49%	6,041 мо
H_2	6,39 „	2,649 „
O_2	8,72 „	—
H_2O	6,00 „	0,879 „
N_2	1,69 „	0,060 „
S	1,15 „	0,036 „
Зола	6,16 „	
	102,60%	

[1]) Обе эти цифры надо считать условными, т. к. они просчитаны на „влажный холодный газ". Очевидно, что холодный газ будет в то же время и осушенным газом, но для сравнения двух газов эта неточность значения не имеет.

1. Состав газа.

		На колосниках.	В топке.
CO	В CO горит весь углерод кроме z мо горящих в CO_2, т.-е. . . . . $6{,}041 - z$ мо	$6{,}041 - z$ мо	—
	По реакции $CO + H_2O = CO + H_2$. $-0{,}879$ [1]) „		
		—	$5{,}162 - z$ мо
CO_2	По реакции $C + O_2 = CO_2$ . . . . . $+z$ мо	z	—
	„ „ $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ . . . $0{,}879$ „		
		—	$0{,}879 + z$
H_2	Из угля и при получении CO_2 $0{,}879 + 2{,}649 = 3{,}528$ мо	—	3,528
S_6	$0{,}036 : (2 \times 6) = 0{,}003$ мо.	—	0,003
SO_2	$0{,}036 : 2 = 0{,}018$ мо.	—	0,018
N_2	При образовании CO: $(6{,}041 - z)\ \frac{3{,}762}{2} = 11{,}363 - 1{,}881\,z$ мо		
	При образовании CO_2 . . . . . $+3{,}762\,z$ „		
	„ „ SO_2: $0{,}018 \times 1{,}5 \times 3{,}762 = 0{,}102$ „		
		$11{,}465 + 1{,}881\,z$	—
	Из каменного угля . . . . . 0,060 „		
		—	$11{,}525 + 1{,}81\,z$

Составление и решение уравнения:

Газ нагретый до 1100°C содержит тепла

$CO + N_2 + H_2$

$(20{,}215 + 0{,}881\,z) \times 7.898 = 159.658 + 6.958\,z$ кал

$CO_2 + SO_2$

$(0{,}897 + z) \times 12.625 = 11.325 + 12.625\,z$ „

$170.983 + 19.583\,z$ кал.

Реакции выделяют тепла:

Горение C в CO_2

$(0{,}879 + z) \times 97.650 = +\ 85.834 + 97\,650\,z$ кал

Горение C в CO

$(5{,}162 - z) \times 29.430 = +\ 151.918 - 29.430\,z$ „

Горение S в SO_2

$0{,}018 \times 127.793 = +\ 2.300$ „

Разложение FeS_2

$-6 \times 0{,}003 \times 16.700 = -\ 301$ „

Разложение $H_2O_{жид}$

$-0{,}879 \times 68.360 = -\ 60.088$ „

$179.663 + 68.220\,z$ кал.

$0{,}7\ (179.663 + 68.220\,z) = 170.983 + 19.583\,z$

$z = 1{,}605$ мо.

Состав полугенераторного газа.

CO	3,557 мо	14,74%
CO_2	2,484 „	10,29 „
H_2	3,528 „	14,62 „
S_6	0,003 „	0,01 „
SO_2	0,018 „	0,07 „
N_2	14,544 „	60,27 „
	24,134 мо	100,00%.

2. Поверка состава полугенераторного газа.

		C	O_2	H_2	N_2
CO .	14,74	14,74	7,37	—	—
CO_2 .	10,29	10,29	10,29	—	—
H_2 . .	14,62	—	—	14,62	—
S_6 . .	0,01	—	—	—	—
SO_2 .	0,07	—	0,07	—	—
N_2 . .	60,27	—	—	—	60,27
		25,03	17,73	14,62	60,27

Количество N_2 из воздуха:

$$60{,}27 - 0{,}060\,\frac{25{,}03}{6{,}041} = 60{,}02,$$

O_2 воздуха $60{,}02 : 3{,}762 = 15{,}95$;

O_2 воды $17{,}73 - 15{,}95 = 1{,}78$,

H_2 воды $1{,}78 \times 2 = 3{,}56$,

H_2 угля $14{,}62 - 3{,}56 = 11{,}06$.

Отношение H_2 угля к C в газе = 0,44,

„ H_2 „ к C в угле = 0,44.

[1]) Предполагается, что все количество водяного пара разложится по реакции $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$. Такое допущение может иметь место при полной невыясненности реакций газообразования при сухой перегонке. Условия равновесия в газовой среде дали бы иные результаты.

3. Количество полугенераторного газа из 1 кг угля.

$$\frac{24{,}134 \times 0{,}0224 \times 1000}{102{,}6} = 5{,}27 \text{ м}^3.$$

4. Количество первичного воздуха на 1 кг кам. угля.

$11{,}465 + 1{,}881 \times 1{,}605 = 14{,}484$ мо N_2
$14{,}484 : 3{,}762 = 3{,}850$ „ O_2
18,334 мо возд.

$$\frac{18{,}334 \times 0{,}0224 \times 1000}{102{,}6} = 4{,}00 \text{ м}^3.$$

5. Количество вторичного воздуха на 1 кг кам. угля.

Для горения CO нужно . . . . 1,778 мо O_2
„ „ H_2 „ . . . . 1,764 „ „
„ „ S_6 „ . . . . 0,018 „ „
3,560 мо O_2

$3{,}560 \times 3{,}762 = 13{,}393$ „ N_2
16,953 мо возд.

$$\frac{16{,}953 \times 0{,}0224 \times 1000}{102{,}6} = 3{,}70 \text{ м}^3.$$

6. Поверка расхода первичного и вторичного воздуха.

Сумма первичного и вторичного воздуха
$18{,}334 + 16{,}953 = 35{,}287$ мо.

В условиях простой топки необходимо воздуха 35,286 мо.

7. Вес 1 м³ полугенераторного газа.

CO	3,557 ×	28 =	99,596 гр
CO_2	2,484 ×	44 =	109,296 „
H_2	3,528 ×	2 =	7,056 „
S_6	0,003 ×	192 =	0,576 „
SO_2	0,018 ×	64 =	1,152 „
N_2	14,544 ×	28 =	407,232 „
			624,908 гр

$$\frac{624{,}908 \times 1000}{102{,}6 \times 5{,}27 \times 1000} = 1{,}16 \text{ кг/м}^3.$$

8. Материальный баланс генератора.

Приход.

Угля поступило . . . . . 102,600 гр.

Воздуха
N_2...$14{,}484 \times 28 = 405{,}552$ гр
O_2... $3{,}850 \times 32 = 123{,}200$ „ 528,752 гр.
631,352 гр.

Расход.

Газа получено . . . . . 624,908 гр
Золы . . . . . 6,448 „
631,356 гр.

9. Состав и количество продуктов горения.

CO_2	6,041 мо
H_2O	3,528 „
SO_2	0,036 „
N_2	27,937 „
	37,542 мо

$$\frac{37{,}542 \times 0{,}0224 \times 1000}{102{,}6} = 8{,}20 \text{ м}^3.$$

10. Вес 1 м³ продуктов горения.

CO_2	6,041 × 44 =	265,804 гр
H_2O	3,528 × 18 =	63,504 „
SO_2	0,036 × 64 =	2,304 „
N_2	27,937 × 28 =	782,236 „
		1113,848 гр.

$$\frac{1113{,}848 \times 1000}{8{,}20 \times 102{,}6 \times 1000} = 1{,}32 \text{ кг/м}^3.$$

11. Теплотворная способность 1 м³ газа.

Горение CO дает	3,557 ×	68.220 =	242.658 кал
„ H_2 „	3,528 ×	57.810 =	203.954 „
„ S_6 „	6 × 0,003 ×	69.800 =	1.256 „
			447.868 кал

$$\frac{447{,}868 \times 1000}{102{,}6 \times 5{,}27} = 828 \text{ Кал/м}^3.$$

12. Тепловой баланс генератора.

Приход:

Потенциальная энергия угля . . . 737.025 кал
737.025 кал.

Расход:

Потенциальная энергия газа . . . 447.868 кал

Тепло выделенное в генераторе
$179.663 + 68.220 \times 1{,}605 = 289.156$ „
737.024 кал.

РАСЧЕТ горения полугенераторного газа при расходе воздуха в 1,5 раза больше теоретического, при подогреве вторичного воздуха до 200° С, а газа до 1100° С.

1. Количество вторичного воздуха.

$3{,}560 \times 1{,}5 = 5{,}340$ мо O_2
$13{,}393 \times 1{,}5 = 20{,}090$ „ N_2

25,430 мо возд.

$$\frac{25{,}430 \times 0{,}0224 \times 1000}{102{,}6} = 5{,}55 \text{ м}^3.$$

2. Состав и количество продуктов горения.

CO_2	6,041 мо
H_2O	3,528 „
SO_2	0,036 мо
N_2	34,634 „
O_2	1,780 „
	46,019 мо

$$\frac{46{,}019 \times 0{,}0224 \times 1000}{102{,}6} = 10{,}05 \text{ м}^3.$$

3. Теоретическая температура горения.

Количество тепла в продуктах горения.

оступает с газом $289.156 \times 0{,}7 = 202.409$ кал
„ „ воздух. $25.430 \times 1{,}363 = 34.661$ „
Тепло горения газа . . . . . 447.868 „
684.938 кал.

Теоретическая температура горения $t = 1788°$ С.

ГЛАВА VII.

Зависимость работы мартеновской печи от рода топлива.

Работа мартеновской печи зависит от ее способности греть ванну. Последняя же может быть определена тем количеством тепла, которое 1 м³ продуктов горения оставляет в печи. В самом деле. Реакция горения в мартеновской печи требует для своего окончания времени около 2—2½ секунд. Если мы пустим в печь слишком много газа и воздуха, так что время на пребывание в полости печи будет меньше этого промежутка времени, то реакция горения будет заканчиваться только в противоположных пролетах и хвосты пламени их сожгут.

Отсюда следует, что об'ем продуктов горения, проходящих через полость печи в единицу времени будет для данной печи величиной определенной и постоянной. А количество тепла, получаемое печью, пропорционально теплоотдаче одного кубического метра продуктов горения. Последнее определяется как разность между теплом, вносимым нагретыми в регенераторах до 1100° и сгорающими газом и воздухом, и тем теплом, которое продукты горения, уходящие при 1600°, унесут из печи.

Расход воздуха примем полуторный, против теоретически необходимого.

Определим количество тепла, получаемого печью при образовании 1 м³ продуктов горения (при 0°С). **для всевозможного топлива.**

Хороший каменноугольный генераторный газ.

Газ нагретый до 1100° внесет тепла 165.358 кал[1])
Воздух „ „ 1100° „ „ 280.082 „
Горение газа даст тепла . . . . . 606.626 „

Всего поступит тепла: . . . 1052.066 кал.

Продукты горения нагретые до 1600° унесут тепла:

$CO_2 + SO_2$ . . .	$6{,}077 \times 19.269$	$= 117.098$ кал
H_2O	$5{,}154 \times 15.470$	$= 79.732$ „
O_2	$2{,}468 \times 12.168$	$= 30.031$ „
N_2	$37{,}222 \times 11.848$	$= 441.006$ „
	50,921 мо	667.867 кал.

Отдается газами в печи:

$1052.066 - 667.867 = 384.199$ кал.

Полная теплоотдача на 1 м³ продуктов горения составит:

$$\frac{384.199 \times 44{,}64}{50{,}921} = 336.800 \text{ кал},$$

а на 1 м³ генераторного газа

$$\frac{384.199 \times 1000}{102{,}6 \times 4{,}318} = 867.200 \text{ кал}.$$

[1]) См. выше, расчеты генераторного газа.

Теплопроизводительная способность 1 м³ газа $Q = 1369$ Кал.

Количество продуктов горения на 1 м³ генераторного газа:

$$\frac{11{,}117}{4{,}318} = 2{,}57 \text{ м}^3.$$

Генераторный газ из Челябинского бурого угля.

(Неосушенный)

Газ нагретый до 1100° внесет тепла:

CH_4	0,235 × 18.018 =	4.234	кал
$CO_2 + SO_2$ . .	0,758 × 12.625 =	9·570	„
$CO + H_2 + N_2$.	9,450 × 7.898 =	74.636	„
H_2O	1,247 × 9.753 =	12.162	„
	11,690 мо	100.602	кал.

Воздух для горения, нагретый до 1100° вносит тепла

$11{,}924 \times 1{,}5 = 17{,}886$ мо

$17{,}886 \times 7.944 = 142.086$ „

Горение генераторного газа даст . 306.371 „

Всего поступит тепла . . . . 549.059 кал.

Продукты горения, нагретые до 1600° унесут тепла:

$CO_2 + SO_2$ . . .	3,554 × 19.269 =	68.482	кал
H_2O	3,212 × 15.470 =	49.690	„
N_2	14,826 × 11.848 =	175.658	„
Воздух	5,962 × 11.915 =	71.037	„
	27,554 мо	364.867	кал.

Отдается газами в печи:

$549.059 - 364.867 = 184.192$ кал.

Полная теплоотдача на 1 м³ продуктов горения составит:

$$\frac{184.192 \times 44{,}64}{27{,}554} = 298.400 \text{ кал},$$

а на 1 м³ генераторного газа

$$\frac{184{,}192 \times 10}{2{,}619} = 703.300 \text{ кал.}$$

Теплопроизводительная способность 1 м³ генераторного газа $Q = 1170$ Кал.

Количество продуктов горения на 1 м³ газа:

$$\frac{27{,}554 \times 0{,}0224 \times 10}{2{,}619} = 2{,}36 \text{ м}^3.$$

Генераторный газ из воздушно-сухих дров.

Газ нагретый до 1100° внесет тепла:

CH_4	0,207 × 18.018 =	3.730	кал
CO_2	0,721 × 12.625 =	9.103	„
$CO + H_2 + N_2$ . .	7,000 × 7.898 =	55.286	„
H_2O	3,025 × 9.753 =	29.503	„
		97.622	кал.

Воздух для горения, нагретый до 1100° внесет: $11{,}005 \times 1{,}5 = 16{,}507$ мо

$16{,}507 \times 7.944 = 131.132$ „

Горение газа даст . . . . . 281.852 „

Всего поступит тепла: 510.606 кал.

Продукты горения, нагретые до 1600° унесут тепла:

CO_2	3,108 × 19.269 =	59.888	кал
H_2O	5,053 × 15.470 =	78.170	„
N_2	11,900 × 11.848 =	140.991	„
Воздух	5,502 × 11.915 =	65.556	„
	25,563 мо	344.605	кал.

Отдается газами в печи:

$510.606 - 344.605 = 166.001$ кал.

Полная теплоотдача на 1 м³ продуктов горения составит:

$$\frac{166{,}001 \times 44{,}64}{25{,}563} = 289.900 \text{ кал},$$

а на 1 м³ генераторного газа

$$\frac{166.001 \times 10}{2{,}453} = 676.700 \text{ кал.}$$

Теплопроизводительная способность 1 м³ генераторного газа $Q = 1149$ Кал.

Количество продуктов горения на 1 м³ генераторного газа:

$$\frac{25{,}563 \times 10 \times 0{,}0224}{2{,}453} = 2{,}33 \text{ м}^3.$$

Осушенный охлаждением до 20°С дровяной генераторный газ.

Газ нагретый до 1100° внесет тепла:

CH_4	0,207 × 18.018 =	3.730	кал
CO_2	0,721 × 12.625 =	9.103	„
$CO + H_2 + N_2$ . . .	7,000 × 7.898 =	55.286	„
H_2O	0,186 × 9,753 =	1.814	„
		69.933	кал.

Воздух, нагретый до 1100° внесет тепла . . . . . 131.132 кал
Горение газа даст . . . . . 281.852 „
Всего поступит тепла . . 482.917 кал.

Продукты горения, нагретые до 1600° унесут тепла:

CO_2	3,108 × 19.269 =	59.888	кал
H_2O	2,214 × 15.470 =	34.251	„
N_2	11,900 × 11.848 =	140.991	„
Воздух	5,502 × 11.915 =	65.556	„
	22,724 мо	300.686	кал.

Отдается газами в печи:

$$482.917 - 300.686 = 182.231 \text{ кал.}$$

Полная теплоотдача на 1 м³ продуктов горения:

$$\frac{182.231 \times 44.64}{22,724} = 358.000 \text{ кал,}$$

или на 1 м³ генераторного газа:

$$\frac{182.231 \times 10}{1,818} = 1.002.400 \text{ кал.}$$

Теплопроизводительная способность 1 м³ генераторного газа $Q = 1550$ Кал.

Количество продуктов горения на 1 м³ осушенного дровяного генераторного газа:

$$\frac{22,724}{8,114} = 2,80 \text{ м}^3.$$

Доменный газ древесноугольной печи.

(Надеждинский зав.).

Эта печь служит для плавки красных желязняков, с затратой на 1 кг чугуна—1,0 кг древесного угля.

Количество доменного газа на 1 кг древесного угля—3,6 м³.

Состав доменного газа при температуре его 25°С у мартеновской печи:

CH_4	1,3 %	по об'ему
CO_2	11,4 „	„ „
CO	27,0 „	„ „
H_2	7,9 „	„ „
N_2	49,3 „	„ „
H_2O	3,1 „	„ „
	100,0 %	по об'ему.

Необходимое количество воздуха для горения 100 мо газа:

Для горения CO . . .	27,0 : 2 =	13,5	мо O_2
„ „ H_2 . . .	7,9 : 2 =	3,9	„ „
„ „ CH_4 . . .	1,3 × 2 =	2,6	„ „
		20,0	мо O_2
	20,00 × 3,762 =	75,2	„ N_2
		95,2	мо возд.

Доменный газ, нагретый в регенераторах до 1100° внесет тепла:

CH_4	1,3 × 18.018 =	23.423	кал
CO_2	11,4 × 12.625 =	143.925	„
$CO + H_2 + N_2$ . . .	84,2 × 7.898 =	665.012	„
H_2O	3,1 × 9.753 =	30.234	„
		862.594	кал.

Воздух, нагретый в регенераторах, при полуторном его расходе, внесет тепла:

$$95,2 \times 1,5 \times 7.944 = 1.134.403 \text{ кал.}$$

Горение доменного газа внесет тепла:

Горение CO . .	27,0 × 68.220 =	1.841.940	кал
„ H_2 . . .	7,9 × 57.810 =	456 699	„
„ CH_4 . .	1,3 × 192.200 =	250.120	„
		2.548.759	кал.

Всего поступает тепла. . 4.545.756 кал.

Продукты горения нагретые до 1600° уносят:

CO_2	11,4 + 27,0 + 1,3 =	39,7 мо
H_2O	3,1 + 7,9 + 2,6 =	13,6 „
N_2	49,3 + 75,2 =	124,5 „
Воздух		47,6 „
		225,4 мо.

CO_2	39,7 × 19.269 =	764.979	кал
H_2O	13,6 × 15.470 =	210.392	„
N_2	124,5 × 11.848 =	1.475.076	„
Воздух	47,6 × 11.915 =	567.154	„
		3.017.601	кал.

Отдается газами в печи:

$$4.545.756 - 3.017.601 = 1.528.155 \text{ кал.}$$

Полная теплоотдача на 1 м³ продуктов горения

$$\frac{1.528.155 \times 44,64}{225,4} = 302.600 \text{ кал,}$$

или на 1 м³ доменного газа:

$$\frac{1.528.155 \times 44,64}{100} = 682.200 \text{ кал,}$$

Теплопроизводительная способность 1 м³ доменного газа.

$$Q = \frac{2.548.759 \times 44,64}{100} = 1138 \text{ Кал/м}^3$$

Количество продуктов горения на 1 м³ доменного газа.

$$\frac{225,4}{100} = 2,25 \text{ м}^3.$$

Доменный газ древесноугольной печи.

(Юж.-Уральский зав.).

Эта печь служит при плавке Бакальских руд с затратой 0,9 кг древесного угля на 1 кг чугуна.

Состав доменного газа при температуре его 25° С у мартеновской печи:

CO_2	15,8%
CO	22,7 „
CH_4	1,4 „
H_2	8,6 „
N_2	48,4 „
H_2O	3,1 „
	100,0%

Аналогично предыдущему находим:

Полная теплоотдача на 1 м³ продуктов горения . . . . . 275.700 кал.

Полная теплоотдача на 1 м³ доменного газа . . . . . 595.700 „

Теплопроизводительная способность 1 м³ газа . . . . . $Q = 1033$ Кал.

Количество продуктов горения на 1 м³ газа . . . . . 2,16 м³.

Коксовальный газ.

Коксовальный газ, во избежание его разложения, вводят в печь холодным, а воздух для горения подогревают в регенераторах до 1200°. Эти условия мы и примем для расчета.

Состав коксовального газа при температуре 25° С.

C_2H_4	1,8%
CH_4	28,5 „
H_2	52,1 „
CO_2	2,4 „
CO	2,5 „
O_2	1,4 „
N_2	8,2 „
H_2O	3,1 „
	100,0 %

Необходимое количество воздуха для горения 100 мо коксовального газа:

Для горения	C_2H_4	$1,8 \times 3 =$	5,40 мо O_2
„ „	CH_4	$28,5 \times 2 =$	57,00 „ „
„ „	H_2	$52,1 : 2 =$	26,05 „ „
„ „	CO	$2,5 : 2 =$	1,25 „ „
			89,70 мо O_2
Имеется в газе			1,40 „ „
			88,30 мо O_2
		$88,30 \times 3,762 =$	332,18 мо N_2
			420,48 мо возд.

При полуторном его расходе, воздух, нагретый в регенераторах до 1200°, внесет:

$$420,48 \times 1,5 \times 8.720 = 5.499.900 \text{ кал}$$

Тепло, вносимое газом нагретым до 25°С будет невелико, по приблизительному подсчету около 18.400 кал

Горение газа даст тепла

C_2H_4	$1,8 \times 320.000 =$	576.000 кал	
CH_4	$28,5 \times 192.400 =$	5.483.400 „	
H_2	$52,1 \times 57.810 =$	3.011.900 „	
CO	$2,5 \times 68.220 =$	170.500 „	9.241.800 кал.

Всего поступит тепла 14.760.100 кал.

Продукты горения при 1600° уносят тепла:

CO_2	$2,40 + 3,60 + 28,50 + 2,50 = 37,00$	
	$37,00 \times 19.269 =$	712.900 кал.
H_2O	$3,60 + 57,00 + 52,10 + 3,10 = 115,80$	
	$115,80 \times 15.470 =$	1.791.400 „
N_2	$8,20 + 332,18 = 340,38$	
	$340,38 \times 11.848 =$	4.032.800 „
Воздух	$210,24 \times 11.915 =$	2.505.000 „
		9.042.100 кал.

Общее количество продуктов горения:

$37,00 + 115,80 + 340,38 + 210,24 = 703,42$ мо.

Отдается газами в печи:

$$14.760.100 - 9.042.100 = 5.718.000 \text{ кал.}$$

Полная теплоотдача на 1 м³ продуктов горения:

$$\frac{5.718.000 \times 44,64}{703,42} = 362.900 \text{ кал,}$$

или на 1 м³ коксовального газа

$$\frac{5.718.000 \times 44,64}{100} = 2.552.500 \text{ кал.}$$

Теплопроизводительная способность 1 м³ коксовального газа:

$$Q = \frac{9.241,800 \times 44,64}{100} = 4125 \text{ Кал/м}^3$$

Количество продуктов горения на 1 м³ коксовального газа:

$$\frac{703,42}{100} = 7,03 \text{ м}^3.$$

Нефть.

Нефть распыливается воздухом, на что идет 9% от теоретически необходимого для сожигания нефти количества воздуха. Остальной воздух может быть нагрет в регенераторах до 1200°

Количество воздуха, нагреваемого в регенераторах, при полуторном расходе будет:

$$48{,}387\ ^{1}) \times 0{,}91 + 48{,}387 \times 0{,}50 =$$
$$= 44{,}032 + 24{,}194 = 68{,}226 \text{ мо.}$$

Воздух нагретый до 1200° внесет тепла:

$$68{,}226 \times 8.720 = 594.931 \text{ кал}$$

Горение нефти даст тепла . . . 1.044.295 „

Всего поступает тепла: . . 1.639.226 кал.

Продукты горения при 1600° унесут тепла:

CO_2 . . . $7{,}208 \times 19.269 = 138.891$ кал

H_2O . . . $6{,}000 \times 15.470 = 92.820$ „

N_2 . . . $57{,}339 \times 11.848 = 679.352$ „

O_2 . . . $5{,}081 \times 11.915 = 60.540$ „

75,628 мо 971.603 кал.

Отдается газами в печи:

$$1639.226 - 971.603 = 667.623 \text{ кал.}$$

Полная теплоотдача на 1 м³ продуктов горения:

$$\frac{667{,}623 \times 44{,}64}{75{,}628} = 394.100 \text{ кал,}$$

или на 1 кг нефти $667{,}623 \times 10 = 6676$ Кал.

Количество продуктов горения на 1 кг нефти:

$$75{,}628 \times 0{,}0224 \times 10 = 16{,}94 \text{ м}^3.$$

Теплопроизводительная способность 1 кг нефти 10443 Кал.

Полученные цифры сведем в таблицу.

ТОПЛИВО.	Теплопроизводительн. способность топлива на 1 кг в Кал.	Теплопроизводительн. способность газа на 1 м³, при 0° С, в Кал.	Количество генераторного газа, получающегося из 1 кг топлива в м³, при 0°С.	Количество продуктов гор. из 1 м³ газа в м³ (при 0°С.)	Полная теплоотдача в рабоч. простр. мартеновской печи на 1 кг топлива в Кал.	Эквиваленты топлива по сравнению с хорошим каменным углем.	Полная теплоотдача в раб. простр. мартеновской печи на 1 м³, при 0°С, газа в Кал.	Полная теплоотдача в раб. простр мартеновской печи на 1 м³ продуктов горения в Кал.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Генераторный газ из хорошего каменного угля	7185	1369	4,32	2,57	3746	1,00 кг	867,2	336,8
Генераторный газ из Челябинского бурого угля	3703	1170	2,62	2,36	1843	2,03 „	703,3	298,4
Генераторный газ из воздушно-сухих дров.	3131	1149	2,45	2,33	1658	2,26 „	676,7	289,9
Осушенный (охлаждением до 20°С) дровяной генераторный газ	3131	1550	1,82	2,80	1824	2,05 „	1002,4	358,0
Доменный газ богатый	—	1138	—	2,25	—	5,49 м³	682,2	302,6
„ „ бедный	—	1033	—	2,16	—	6,29 „	595,7	275,7
Коксовальный газ	—	4125	—	7,03	—	1,47 „	2552,5	362,9
Нефть	10443	—	—	на 1 кг 16,94	6676	0,56 кг	—	394,1

ЗАДАЧА: Расчитать смесь доменного и коксовального газов, которая бы отвечала по тепловому действию хорошему каменноугольному генераторному газу.

Обозначим количество коксовального газа в смеси через x%, тогда доменного должно быть $(100 - x)$%.

Разность между теплоотдачей, на 1 м³ продуктов горения коксовального и каменноугольного газов будет:

$$362.900 - 336.800 = 26.100 \text{ кал.}$$

Разность между теплоотдачей на 1 м³ продуктов горения каменноугольного генераторного и доменного газов будет:

$$336.800 - 302.600 = 34.200 \text{ кал.}$$

Количество продуктов горения коксового газа у нас

$$7{,}03 \times x \text{ м}^3.$$

Количество продуктов горения доменного газа

$$2{,}25 \times (100 - x) \text{ м}^3.$$

Очевидно, что количества продуктов горения того и другого газа в печи должны быть обратно пропорциональны разности теплоотдач этих газов по отношению к нужной нам теплоотдаче, т.-е.

$$\frac{x \times 7{,}03}{(100 - x) \times 2{,}25} = \frac{34.200}{26.100}$$

Откуда x, количество коксовального газа в смеси будет равно 29,5%, а доменного газа 70,5%.

[1]) См. выше, расчет горения нефти.

ЗАДАЧА: Расчитать количество нефти, нужное для обогащения доменного газа до теплового действия хорошего каменноугольного генераторного газа.

Обозначим нужное количество нефти на 1 м³ доменного газа через x.

Разность между теплоотдачей на 1 м³ продуктов горения нефти и каменноугольного газа.

$$394.100 - 336.800 = 57.300 \text{ кал.}$$

Разность между теплоотдачей на 1 м³ продуктов горения каменноугольного генераторного и доменного газов:

$$336.800 - 302.600 = 34.200 \text{ кал.}$$

Количество продуктов горения нефти у нас $16{,}94\,x$ м³.

Количество продуктов горения 1 м³ доменного газа богатого 2,25 м³.

По предыдущему должно быть:

$$\frac{16{,}94 \times x}{2{,}25} = \frac{34.200}{57.300}$$

Откуда x—количество нефти нужное на 1 м³ богатого доменного газа будет равно 0,0793 кг.

Если мы обозначим через y количество м³ доменного газа обогащенного нефтью и эквивалентное 1 кг хорошего каменного угля, то:

$$\frac{y}{5{,}49} + \frac{0{,}0793 \times y}{0{,}56} = 1, \text{ откуда } y = 3{,}0886.$$

Значит, количество доменного газа в смеси, нужное для замены 1 кг каменного угля, будет 3,09 м³, а количество нефти: $3{,}0886 \times 0{,}0793 = 0{,}245$ кг.

Для бедного доменного газа аналогично получим: количество сдабривающей нефти 0,136 кг на 1 м³ доменного газа, а эквивалентное количество газа в смеси 2,49 м³ и нефти 0,338 кг.

Заключение.

Рассмотрение таблицы стр. 80 указывает нам на то, что высокий нагрев газа и воздуха в регенераторах сильно смягчает разницу между родами топлива. Например, богатейший коксовальный газ с теплотворной способностью в 4125 Кал даст печи на 1 м³ продуктов горения всего 362.900 кал против бедного доменного, дающего 275.700 кал. Что эта разница невелика по сравнению с тем, что дает нагрев воздуха, видно из следующего расчета.

Допустим, что мы увлеклись американской модой и поставили к мартеновской печи на коксовальном газе паровой котел, соответственно уменьшив об'ем регенераторов, и понизили нагрев воздуха. Воздух, нагретый до 1200°, вносил 5.499.900 кал, нагретый же до 1000° внесет:

$$630{,}72 \times 7.177 = 4.526.700 \text{ кал,}$$

т.-е. меньше на $5.499.900 - 4.526.700 = 973.200$ кал.

Будет отдаваться газами в печи:

$$5.718.000 - 973.200 = 4.744.800 \text{ кал.}$$

Полная теплоотдача на 1 м³ продуктов горения теперь составит:

$$\frac{4.744.800 \times 44{,}64}{703{,}42} = 301.100 \text{ кал.}$$

Подсчитывая также результаты понижения температуры нагретого воздуха и для нефти, получим нижеследующую таблицу.

Температура подогрева воздуха в регенераторах.	Полная теплоотдача на 1 м³ продуктов горения в Кал.	
	Коксовальный газ.	Нефть.
1200°	362,9	394,1
1000°	301,1	331,9
800°	240,8	271,2

Что же оказывается? Понизив температуру воздуха всего до 800°, мы потеряли уже все преимущества такого благородного топлива, как коксовальный газ и нефть и спустились до уровня бедного доменного газа. А ведь нагретый до 800° воздух это почти нормальное явление. Вышеизложенное арифметическое изучение мартеновского процесса дает нам чрезвычайно важные следствия:

1) Погоня за очень хорошим топливом для мартеновских печей не обоснована. 2) Хорошо спропорционированная мартеновская печь может прекрасно работать и на бедном доменном газе. 3) Вся теряющаяся теплота дымовых газов в мартеновской печи должна утилизироваться в регенераторах достаточной емкости и уменьшение их об'ема, с целью утилизации тепла в паровом котле, не может быть признано разумным. 4) Сдабривание плохого топлива нефтью или коксовальным газом мало приносит пользы по сравнению с тем, что можно достигнуть увеличением нагрева воздуха и газа в регенераторах. 5) Осушка дровяного газа делает его первоклассным топливом, а потому должна применяться в случаях работы на плохих мартеновских печах. Потери смолы газа должна компенсироваться возвращением смолы из холодильника в генератор.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Часть I. Теория горения.

Стр.

Глава I. Явления горения в простой топке . . . . . 3—4

Глава II. Физическая природа пламени 5—11

Глава III. Химическая природа пламени 11—24

Зависимость скорости горения от температуры (15). Зависимость скорости реакции горения от избытка реагирующих газов (18). Влияние на реакцию горения катализаторов и охлаждающих поверхностей (20). О скорости горения взрывчатых смесей (23).

Глава IV. Классификация печей . . . . 25—27

Время выдерживания пламени в рабочем пространстве различных печей (26).

Глава V. Решение задач на вычисление проектных данных для печей с простой топкой. . . 28—44

Пояснения к расчетам топлив (28). Расчет горения каменного угля (29). Расчет горения кокса (36). Расчет горения воздушно-сухих дров (38). Расчет горения сушеных дров с 6% влаги (40). Расчет горения нефти (42).

Стр.

Глава VI. Расчеты генераторного газа. 44—76

Пояснения к расчетам генераторного газа (44). Расчет генераторного газа из каменного угля (47). Расчет генераторного газа из Челябинского бурого угля (52). Сравнение работы центральной генераторной станции с работой отдельно стоящих генераторов (56). Расчет генераторного газа из генераторов с расплавлением золы (58). Расчет генераторного газа из дров (66). Осушенный газ из сырых дров (69). Генераторный газ из сухих дров (69). Газ из генераторов без подвода пара под колосники (70). Расчет полугенераторного газа (73).

Глава VII. Зависимость работы мартеновской печи от рода топлива . . . . . 76—81

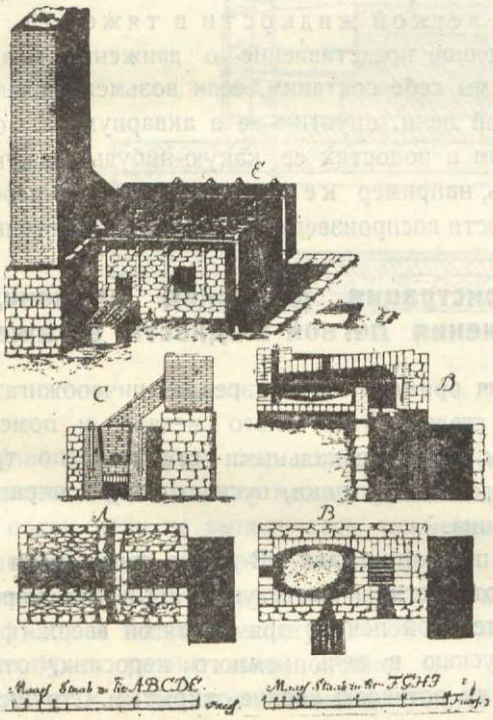
ЧАСТЬ II.

ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ДВИЖЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ПЕЧАХ.

ГЛАВА I.

Законы движения печных газов.

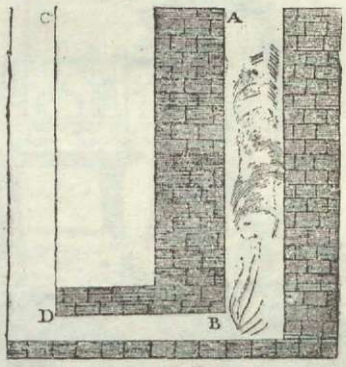
Первая пламенная отражательная печь с дымовой трубой, так называемая Cupolo, была изобретена в Англии, в Уэльсе, для плавки свинцовых руд на каменном угле в 1698 году. Печь эта изображена на фиг. 1 [1]).



Фиг. 1.

Теория тяги дымовой трубы была дана нашим знаменитым поэтом и ученым Михаилом Васильевичем Ломоносовым, в его диссертации на латинском и русском языках (1742 г.): «О вольном движении воздуха, в рудниках примеченном». На фиг. 2 помещается иллюстрация из его «Первых оснований металлургии» — «действие огня в самодуях». Ломоносов видел причину движения воздуха в рудниках и в самодуях в нарушении равновесия в сообщающихся сосудах CD и AB, наполненных жидкостями разных удельных весов: CD — тяжелый холодный воздух, AB — теплый, легкий дым. Столб тяжелого воздуха «опустясь, выгонит» соответствующий об'ем легкого, теплого дыма.

Замечательно, что слово «тяга» ни разу не было употреблено Ломоносовым; очевидно, это слово тогда не употреблялось. Ложность, с механической точки зрения, общераспространенного представления, что «дымовая труба тянет», «пламенные печи работают тягой дымовой трубы», надолго задержала развитие теории и расчета пламенных печей. Что слово «тяга» неприложимо



Фиг. 2.

к явлению движения пламени в печах и дымовых трубах, ясно из сопоставления его с другими случаями употребления этого слова: напр., бурлаки тянут барку; паровоз тянет поезд, откуда произошло выражение: служба «тяги». Слово «тяга» подразумевает непосредственную связь между тянущей силой и сопротивлением, газы же могут передать давление, но «тяги» передать не могут, ибо частицы их взаимно отталкиваются. Благодаря введению в употребление такого ложного, с механической стороны, представления, как «тяга дымовой трубы», вопрос о теории работы печей затемнился на целых полтораста лет.

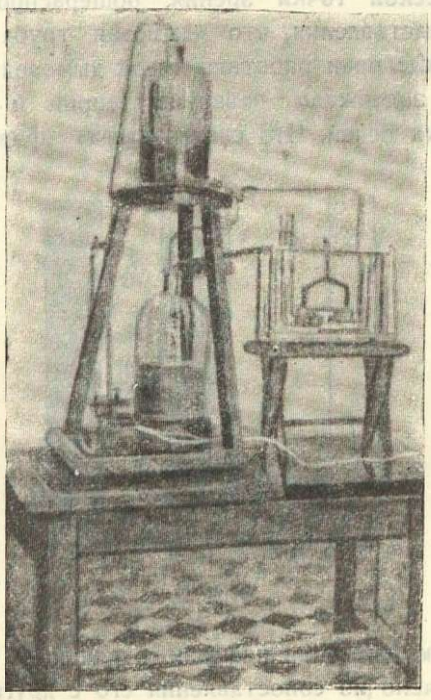
Теория работы печей делается совершенно ясной, расчет их делается простым и доступным, если мы усвоим себе нижеследующую точку зрения; мы сами и все предметы, среди которых мы живем, окружены океаном жидкости, именуемой воздухом; таким образом, наблюдаемые нами пламенные печи плавают в воздухе. Так как жидкость эта в 770 раз

[1]) Чертеж взят из металлургии Schlüter'a 1738 года.

легче воды, то мы ее почти не замечаем; мы не считаемся с ней и привыкли думать, что вокруг нас пустота.

В этом-то пренебрежении к роли воздуха и лежит наша ошибка; это и есть причина того, что мы не даем себе ясного отчета в движении пламени в пламенных печах. В тот момент, когда мы учтем наличность воздуха, мы раз'ясним себе механизм движения пламени.

Что такое пламя? Это — смесь раскаленных газов, вступающих между собой в реакцию горения, следствием которого является выделение тепла и накаливание продуктов горения. Твердые частицы пылеобразного углерода, раскаливаясь, дают пламени вид какой-то особой стихии, в действительности же понятие «пламя» может быть совершенно



Фиг. 3.

точно заменено, с механической точки зрения, понятием «поток раскаленных газов».

Итак, в жидкости, именуемой воздухом, 1 м³ которого весит около 1,29 кг, находится пламенная печь, а в ней движется поток раскаленных газов, т.-е. жидкости, в несколько раз легче, чем воздух.

Припомним, что коэффициент расширения газов равен $^1/_{273}$; а потому, если удельный вес воздуха при 0° принять за единицу, то удельный вес воздуха, нагретого до 273°, будет равен половине, при 546°—трети, при 819°—четверти, при 1092°—пятой части, при 1365°—шестой части, при 1638°—седьмой, при 1911°—восьмой части веса воздуха при 0°. А так как вес 1 м³ воздуха при 0°—1,29 кг., то вес его

при	273°	0,645	кг
„	546°	0,430	„
„	819°	0,322	„
„	1092°	0,258	„
„	1365°	0,215	„
„	1638°	0,184	„
„	1911°	0,161	„ и т. д.

Реальное представление о разнице между воздухом при 0° и 1638° мы составим себе, если мысленно приравняем воздух при температуре мартеновской печи—воде; тогда холодный воздух придется приравнять жидкому чугуну.

Итак, пламенная печь, работающая на наших глазах, должна быть нами представлена погруженной в аквариум с очень тяжелой жидкостью; в полостях же ее движется очень легкая жидкость и движение пламени в печи есть движение легкой жидкости в тяжелой.

Полное представление о движении пламени в печи мы себе составим, если возьмем модель пламенной печи, опустим ее в аквариум с водой и пустим в полостях ее какую-нибудь легкую жидкость, например керосин. Движение керосина в точности воспроизведет нам движение пламени в печи.

Демонстрация движения пламени, как движения легкой жидкости в тяжелой [1]).

Для примера беру разрез кирпичеобжигательной печи, сделанной из белого металла и помещенной между двумя зеркальными стеклами; по трубкам, проведенным в топки, пускаю струю окрашенного керосина.

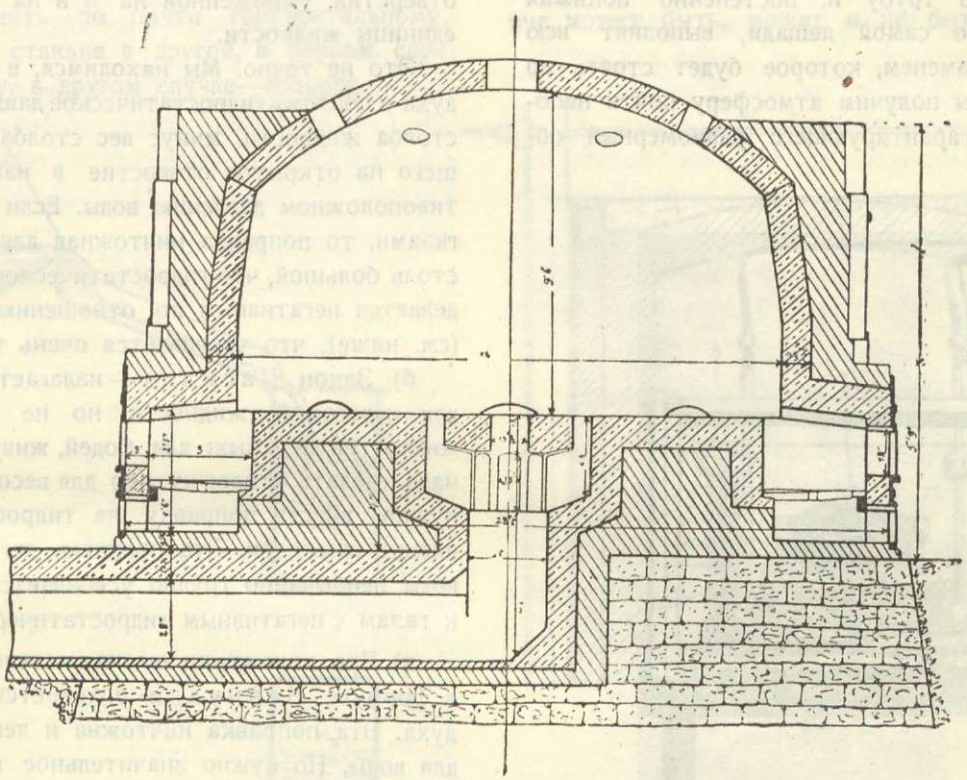
Опыт первый. В замке свода печи открываю отверстие и исследую старый тип кирпичеобжигательной печи с прямой тягой вверх (фиг. 5).

Пускаю в печь немного керосина, отверстие наверху оставляю вполне открытым. Струйка керосина поднимается вверх и полость печи не выполняется керосином. Прибавляю керосина, т.-е. усиливаю топку; результат такой же. Очевидно обжиг кирпича будет неудовлетворительный. Чтобы сделать его возможным, нам придется несколько

---

[1]) На фотографии фиг. 3 показана общая установка для демонстрации движения пламени на моих лекциях в Пол. Инст. Как видно на фотографии, модель кирпичеобжигательной печи Мотовилихинского завода (чертеж этой печи см. фиг. 4) опущена в аквариум с водой. По трубкам с кранами в топки модели пускается керосин из стеклянной бутыли, расположенной выше аквариума. Керосин, пройдя по полостям модели печи, всплывает на поверхность аквариума и по желобу стекает в нижнюю бутыль, оттуда при помощи насосика и мотора в $^1/_{40}$ лош. силы перекачивается в верхнюю бутыль. Таким образом устанавливается круговорот керосина и модель демонстрируется сколько угодно времени.

прикрыть дымовое окно наверху. Делаю это (фиг 3). Суживая отверстие, мы заставляем скапливать керосин, он все более и более выполняет полость печи, пока, наконец, не установится равновесие между приходом и расходом и уровень керосина не сделается постоянным.



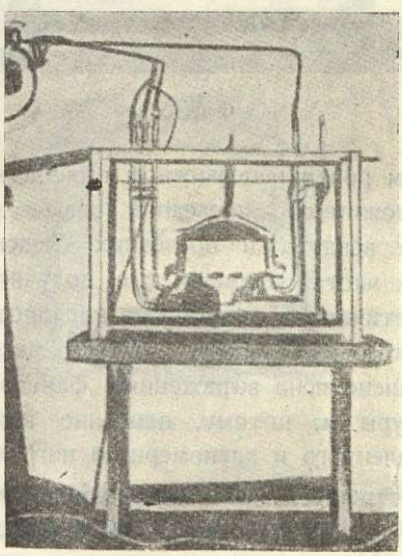
Фиг. 4.

На фиг. 3 видно, что печь выполнена пламенем до половины. Пространство между уровнем керосина и подом печи не выполняется пламенем; это пространство будет прогреваться вихрями, порождаемыми разностью уд. веса пламени и холодных печных газов и только в подкупольном пространстве оно будет сравнительно покойно.

Но так как обжиг кирпича не допускает резкого под'ема температуры—кирпич в этом случае выходит весь в трещинах—то обжигать кирпич в управляемой так печи нельзя.

Надо еще с'узить отверстие в замке купола и добиться того, чтобы уровень пламени совместился бы с подом печи. Это—максимум того, чего можно добиться при этой системе кирпичеобжигательных печей с прямой тягой.

Кирпич выйдет удовлетворительным, но, все-таки, неважных качеств, ибо все-таки горячие струйки пламени проберутся в отверстие в замке, выравнивание же температуры печи пойдет исключительно за счет вихревого движения. Энергия этого вихревого движения будет слабее, чем в случае фиг. 3, но все же оно будет существовать, так как температура на поду будет ниже, чем под куполом. Кирпичеобжигательные печи с прямой тягой имели лет двадцать назад всеобщее распространение. Зачастую их можно видеть на фарфоровых заводах (Ленингр. завод б. бр. Корниловых). Недавно еще такая печь работала в Путиловском заводе. Но это—последние могикане. Они заменяются печами «с обращенной тягой».

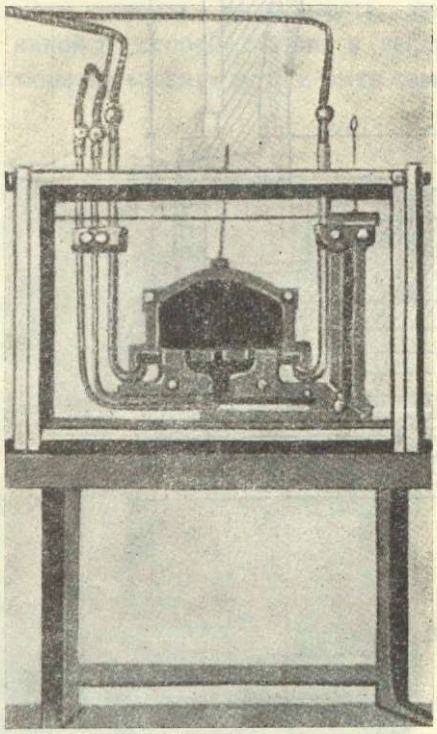


Фиг. 5.

Опыт второй. Чтобы демонстрировать работу такой печи, плотно закроем отверстие в ключе свода крышечкой. Заполним дымовую трубу на нашей модели керосином, пустим керосин в топки нашей модели, откроем немного дымовую

трубу и мы получим в работе кирпичеобжигательную печь «с обращенной тягой» (фиг. 6).

В печи с обращенной тягой, очевидно, наиболее горячие газы будут собираться у замка купола; но там они остановятся; скопляясь, они будут выдавливать через дымовые отверстия в поду холодные газы в дымовую трубу и, постепенно понижая свой уровень до самой лещади, выполнят всю лечь горячим пламенем, которое будет стоять во всей полости. Мы получим атмосферу почти неподвижного пыла, гарантирующего равномерный обжиг кирпича.



Фиг. 6.

В этом почти неподвижном пыле легко развить реакции дожигания последних следов свободного кислорода воздуха и последних следов горючих составных частей пламени, т.-е. получить горение при теоретическом количестве кислорода воздуха; пламя такого горения идет во всей массе печных газов, лишено ясно выраженных факелов высокой температуры и, потому, особенно пригодно для целей медленного и равномерного нагревания.

Демонстрация модели, погруженной в воду, достаточно ясно подтверждает то основное положение, что движение пламени в печах должно рассматриваться как движение легкой жидкости в среде, заполненной тяжелой жидкостью.

Здесь уместно раз'яснить, каким образом человечество целых сто пятьдесят лет не могло усвоить этой простой аксиомы и считало вопрос о движении печных газов в полостях печи недоступным человеческому пониманию. Причина этому в неточностях при изложении в учебниках физики основных законов гидравлики. Перечислю их.

а) Гидростатическое давление измеряется весом столба жидкости над центром тяжести отверстия.

Рисуется сосуд, отверстие и ставится размер: h—есть напор; давление равно площади сечения отверстия, умноженной на h и на вес кубической единицы жидкости.

Это не точно. Мы находимся, в атмосфере воздуха и поэтому гидростатическое давление равно весу столба жидкости, минус вес столба воздуха, давящего на открытое отверстие в направлении, противоположном давлению воды. Если сосуд заполнен газами, то поправка ничтожная для воды, делается столь большой, что гидростатическое давление газов делается негативным по отношению к жидкостям (см. ниже), что усвоивается очень трудно.

б) Закон Паскаля — излагается в учебниках для невесомой жидкости, но не излагается для жидкостей весомых; для людей, живущих на земле, надо сделать оговорку, что для весомых жидкостей нужно внести поправку на гидростатическое давление жидкости. Эта поправка, легко усвоимая для воды, необычайно трудно усвоивается в приложении к газам с негативным гидростатическим давлением.

в) При изложении явления истечение жидкостей в формуле Бернулли опускается давление воздуха. Эта поправка ничтожна и легко усвоивается для воды. Но нужно значительное напряжение умственных сил, чтобы усвоить явление истечения газов в атмосферу.

г) Наконец, неверное слово «тяга» дымовой трубы, о чем сказано выше, настолько затемнило вопрос о движении пламени в печах, что мне лично понадобилось пятнадцать лет, чтобы забыть чему меня учили в школе, забыть это несчастное изложение закона Паскаля в элементарных учебниках физики, внести нужные поправки и разобраться в явлениях, происходящих в полостях печи. Я советовал бы прежде, чем читать дальнейшее изложение гидравлической теории, взять элементарный учебник физики, внести поправку на окружающий воздух, сделать жидкости тяжелыми и продумать самостоятельно эти несколько страниц учебника.

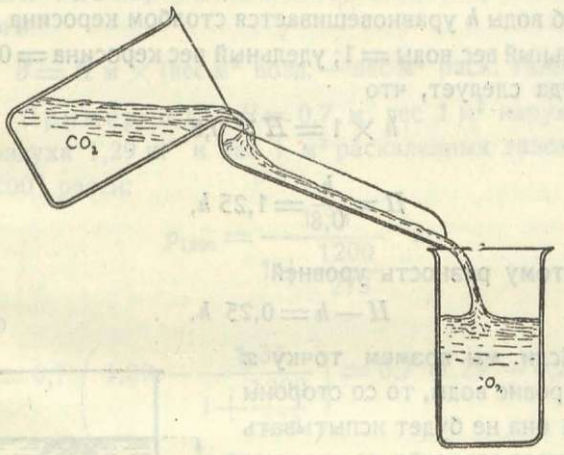
Тогда дальнейшее изложение будет читателю чрезвычайно легко и не представит никакой трудности.

Пламенный поток есть обращенная река.

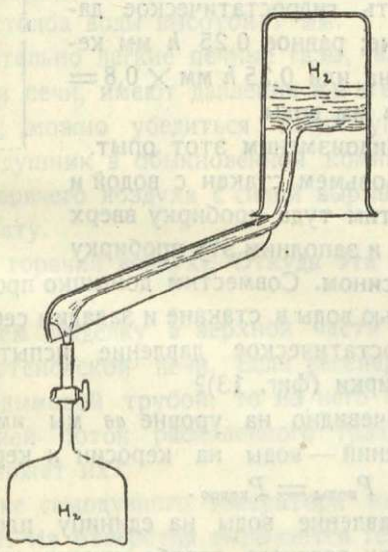
Случаи движения потоков тяжелой жидкости в легкой мы наблюдаем повседневно. Все наши реки есть движение тяжелой жидкости—воды, в легкой—воздухе. Мы знаем, что в таком случае русло потока должно состоять из ограждения снизу и с боков.

Если-бы пламя и печные газы были бы жидкостью, более тяжелою, чем воздух, то нам их тоже пришлось бы оградить снизу и с боков. Но они не тяжелее, а во много раз легче воздуха и потому их приходится ограждать сверху и с боков.

Это нам станет ясным из решения такой задачи: требуется перелить по почти горизонтальному руслу из одного стакана в другой, в первом случае – углекислоту, в другом случае—водород.



Фиг. 7.

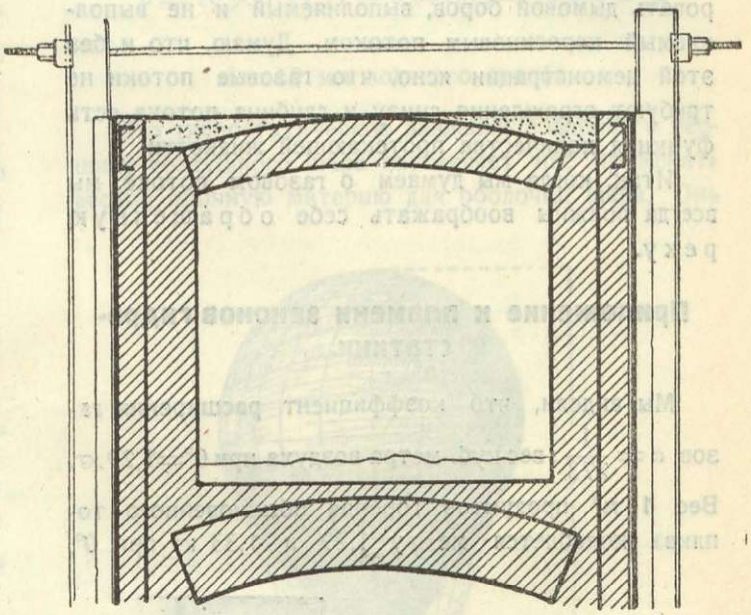


Фиг. 8.

Как это сделать? При переливании CO_2 поток должен быть ограждён снизу и с боков (фиг. 7). При переливании H_2 поток должен быть ограждён сверху и с боков (фиг. 8).

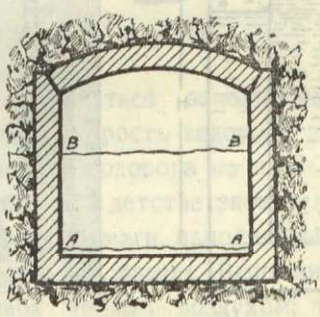
Нужно ли ограждать поток угольной кислоты сверху, а поток водорода снизу? Конечно, нет. Если окружающий воздух безусловно покоен и весь опыт будет проведен очень аккуратно [1]), то никакой нужды в этом нет. Газы перельются, в отсутствии ограждения с четвертой стороны, так же совершенно, как и в его присутствии.

Из этого мы делаем нижеследующий вывод: потоки раскаленных газов должны быть ограждены только сверху и с боков. И действительно, все пламенные печи представляют ограждение: сверху (свод) и боковые стенки (фиг. 9). Снизу ограждение может быть, может и не быть. Так же как



Фиг. 9.

водяная река ограждена снизу и с боков, сверху же ее ограничивает зеркало ее поверхности, так и газовая река должна быть ограждена сверху и с боков, низ же ее есть зеркало ее поверхности.



Фиг. 10.

Поэтому в высшей степени будет ошибочно думать, что дымовой боров от четырех паровых котлов всегда выполняется дымом, работают ли четыре котла или один, безразлично. Такое представление будет неправильно. Если на фиг. 10 представлено сечение борова, то при правильно спроектированном борове (см. ниже) нижнее зеркало газового потока должно коснуться дна боровка *AA*. Если же количество дыма уменьшится в четыре раза, то глубина газового потока умень-

[1]) В данном случае мы пренебрегаем стремлением газов образовать равномерную смесь.

шится в 2,5 раза[2]) и зеркало газового потока поднимется до уровня BB, во всем же пространстве борова $ABBA$ движение газов наблюдаться не будет.

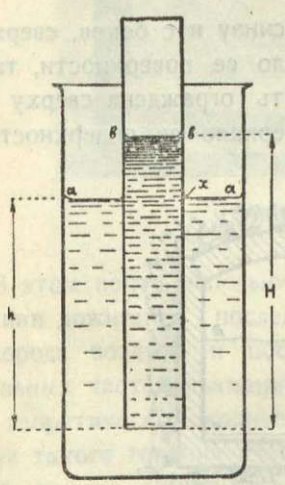
Очевидно, что как глубина реки есть функция от расхода воды, так и глубина газового потока есть функция от количества протекающих газов.

Если опять приравнять холодный воздух воде, а печные газы керосину, то не трудно демонстрировать дымовой боров, выполняемый и не выполняемый керосиновым потоком. Думаю, что и без этой демонстрации ясно, что газовые потоки не требуют ограждения снизу и глубина потока есть функция количества протекающей жидкости.

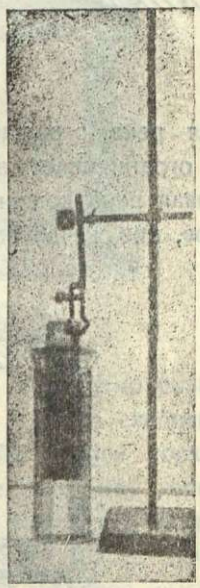
Итак, когда мы думаем о газовом потоке, мы всегда должны воображать себе обращенную реку.

Приложение к пламени законов гидростатики.

Мы видели, что коэффициент расширения газов $\alpha = \frac{1}{273}$; вес куб. метра воздуха при 0°=1,29 кг. Вес 1 м³ продуктов горения обыкновенного топлива колеблется между 1,29 и 1,33 кг при 0°.



Фиг. 11.



Фиг. 12.

При температуре t вес 1 м³ печных газов будем считать для простоты $\left(\frac{1,29}{1+\alpha t}\right)$ кг.

Благодаря такому большому коэффициенту расширения газов, как мы видели, разность веса 1 м³ окружающего нас воздуха (1,29 кг) и веса 1 м³ печных газов мартеновской печи (0,17 кг) весьма значительна и равна 1,29 — 0,17 = 1,12 кг.

[2]) или $\sqrt[3]{(4)^2}$ (см. ниже)

Эта разность в весе воздуха и пламени есть причина гидростатического давления пламени.

Для выяснения этого явления сделаем такой опыт (фиг. 11 и 12). Пусть aa — уровень воды в стакане, b — ламповое цилиндрическое стекло. В него нальем керосин. Окажется, что уровень керосина в стекле bb будет стоять выше уровня воды в стакане aa, как это подтверждается фотографией фиг. 12.

Разность уровней bb и aa может быть вычислена на основании таких соображений: очевидно столб воды h уравновешивается столбом керосина H. Удельный вес воды = 1; удельный вес керосина = 0,8, откуда следует, что

$$h \times 1 = H \times 0{,}8$$

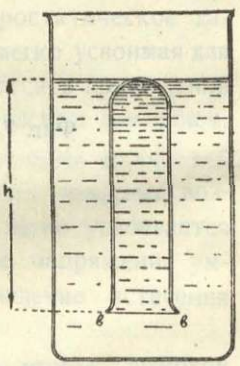
или

$$H = \frac{h}{0{,}8} = 1{,}25\,h,$$

а потому разность уровней

$$H - h = 0{,}25\,h.$$

Если мы возмем точку x на уровне воды, то со стороны воды она не будет испытывать никакого давления; со стороны же керосина она будет испытывать гидростатическое давление; равное 0,25 h мм керосина или 0,25 h мм × 0,8 = 0,2 h мм воды.



Фиг. 13.

Видоизменим этот опыт.

Возьмем стакан с водой и опустим туда пробирку вверх дном и заполним эту пробирку керосином. Совместим донышко пробирки с поверхностью воды в стакане и зададим себе вопрос какое гидростатическое давление испытывает донышко пробирки (фиг. 13)?

Очевидно на уровне $вв$ мы имеем равновесие давлений — воды на керосин и керосина на воду, т.-е., $P_{воды} = P_{керос}$.

Давление воды на единицу площади в миллиметрах водяного столба измеряется столбом воды высотой h, т.-е.

$P_{воды} = h \times$ уд. вес воды $= 1 \times h$ мм воды.

Давление, в тех же единицах, керосина измеряется:

1) весом столба керосина и 2) некоторым гидростатическим давлением δ, которое мы хотим определить. Откуда

$P_{керос.} = (h \times$ уд. вес керосина$) + \delta = (0{,}8h + \delta)$ мм воды.

Вставив эти величины в уравнение, получим:

$$h = 0{,}8\ h + \delta;$$

откуда

$$\delta = h\ (1 - 0{,}8) = +0{,}2\ h \text{ мм воды.}$$

Если мы воду заменим холодным воздухом, керосин — раскаленными печными газами, то нами может быть установлен следующий закон гидростатического давления в полостях, заполненных раскаленными газами:

Гидростатическое давление в кг на квадр. метр в полости раскаленных газов на высоте H от зеркала их, равно разности веса в кг одного м³ наружного воздуха и веса одного м³ раскаленных газов, умноженной на эту высоту, или

$$\delta = H \text{ м} \times (\text{вес м}^3 \text{ возд.} - \text{вес м}^3 \text{ раск. газов}).$$

Пример: если $H = 0{,}7$ м, вес 1 м³ наружного воздуха 1,29 кг и вес 1 м³ раскаленных газов при 1200° равен:

$$p_{1200} = \frac{1{,}33}{1 + \frac{1200}{273}} \text{ кг},$$

то

$$\delta = 0{,}7 \left(1{,}29 - \frac{1{,}33}{1 + \frac{1200}{273}} \right) = 0{,}7 \ (1{,}29 - 0{,}25) =$$

$$= 0{,}728 \text{ кг на } 1 \text{ м}^2,$$

или 0,728 мм воды, ибо давление в 1 кг на м² есть давление столба воды высотой 1 мм.

Что действительно легкие печные газы, выполняющие полости печи, имеют давление выше атмосферного, можно убедиться когда угодно. Мы открываем душник в обыкновенной комнатной печи и струя горячего воздуха с силой вырывается из него в комнату.

Что движет горячий воздух? Откуда эта энергия движения?

Мы открываем гляделку в верхной части регенератора в мартеновской печи. Если регенератор не соединен с дымовой трубой, то из него вырывается с энергией поток раскаленного газа или воздуха. Что движет их?

На колошнике самодувного генератора мы открываем пробку. Из отверстия вырывается генераторный газ. Какая сила заставила воздух пройти через слой дров или каменного угля, обратиться в газ и все-таки сохранить достаточно упругости, чтобы дать струю газа?

Что дело не в температуре газов, а в их легкости, видно из того, что полости, выполненные холодными, но легкими газами, всегда имеют давление выше атмосферного.

Например, возьмем аэростат в 10 м высоты, заполненный водородом (фиг. 14). Определим гидростатическое давление водорода в вершине шара Так как шар открыт снизу, то на горизонте *аа* газы находятся в равновесии и общее их давление равно атмосферному.

Следовательно, вес столба холодного воздуха в 10 м высотой, (равный 1,29 кг × 10 м), уравновешивается весом столба водорода в 10 м высоты + некоторое искомое гидростатическое давление δ.

Вес 1 м³ водорода равен $1{,}29 \times 0{,}06927$, откуда получим такое ур-ние:

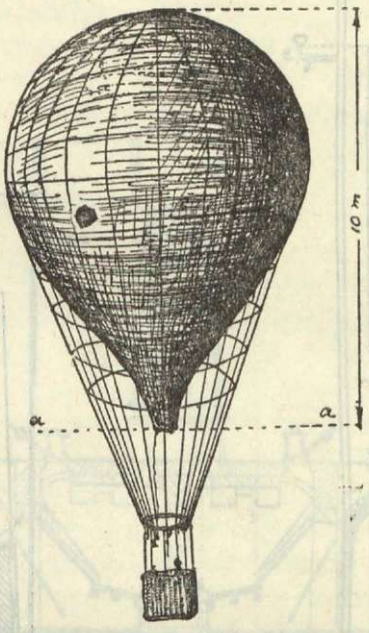
$$1{,}29 \times 10 = 1{,}29 \times 0{,}06927 \times 10 + \delta$$

$$\delta = 10 \times 1{,}29 \ (1 - 0{,}06927) = 12{,}006 \text{ кг/м}^2$$

или

$$\delta = 12 \text{ мм водяного столба.}$$

Это гидростатическое давление водорода в вершине воздушного шара заставляет нас применять весьма прочную материю для оболочки шара. Оно



Фиг. 14.

заставляет раздуваться заполняемый водородом шар; оно родит скорость водорода в верхнем клапане при выпуске водорода из шара.

Многие из нас в детстве забавлялись пусканием монгольфьеров из бумаги, наполняемых теплым воздухом самовара или лампы. Вспомните момент наполнения шара теплым воздухом; теплый воздух, входя в шар, раздувает его, расправляет все складки и морщинки оболочки. Этого не было бы, если бы давление теплого воздуха в шаре не было бы выше атмосферного.

Так как вопрос о гидростатическом давлении в полостях, заполненных теплыми газами, есть основание всей гидравлической теории расчета пламенных печей, то позволю себе остановиться на одном частном примере, взятом из обиходной нашей жизни.

Имеем городское здание снабженное газом и водой. Для нас совершенно очевидно, что гидроста-

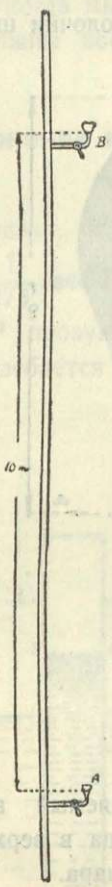
тическое давление воды в нижнем этаже будет выше, чем в верхнем этаже. Положение это ясно и доказательств не требует.

Но зададим себе вопрос, каково будет гидростатическое давление газа в верхнем этаже, ниже или выше, чем в нижнем?

Если в нижнем этаже мы имеем давление газа в 25 мм воды, спрашивается, какое давление будет на 10 м выше?

Допустим, что у рожка A давление атмосферное (фиг. 15).

Тогда давление столба воздуха на единицу площади, равное 1,29 кг $\times$ 10, должно будет уравновеситься весом столба газа в 10 м высотой $+\delta$,



Фиг. 15.

— гидростическое давление газа. Вес 1 м³ газа равен (1,29 кг $\times$ 0,4), откуда получим ур-ние:

$$1{,}29 \times 10 = 1{,}29 \times 0{,}4 \times 10 + \delta;$$

откуда:

$$\delta = 1{,}29 \times 10 \times (1 - 0{,}4) = 7{,}74 \text{ кг/м}^2,$$

но давление газа у нас в точке A не атмосферное, а выше атмосферного на 25 мм воды.

Придадим поэтому обеим частям ур-ния $+25$ мм воды, помня при этом, что 1 кг на м² есть давление 1 мм воды. Тогда получим, что давление точке B будет:

$$\delta + 25 \text{ мм} = 25 + 7{,}74 = 32{,}74 \text{ мм}$$

т. - е. давление газа в верхних этажах всегда выше, чем в нижних. Зависимость обратная, чем для воды.

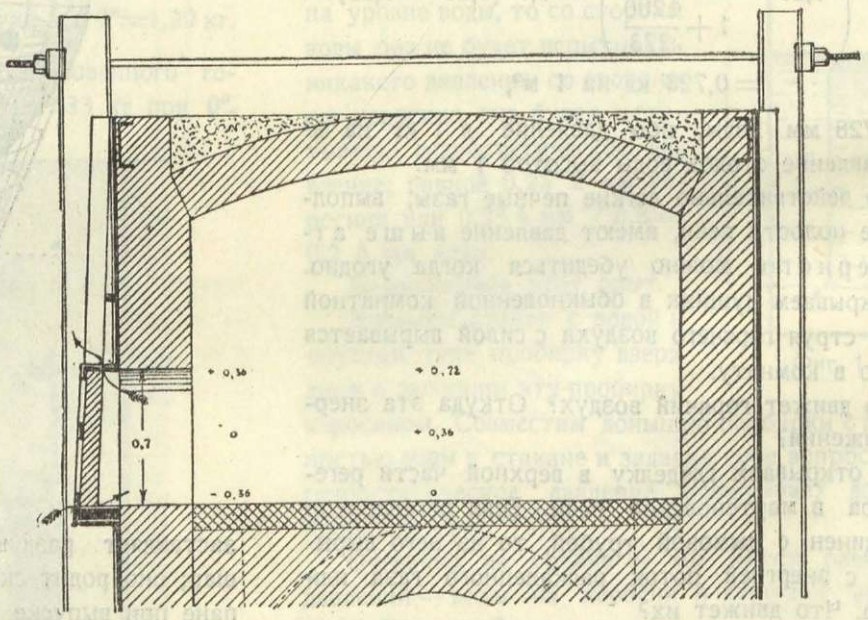
Раскрывая Hütte, мы читаем в главе о светильном газе: «Под'ем газопровода на 10 м увеличивает давление на 7 мм воды».

Отсюда следует нижеследующее правило расположения газовых заводов, заинтересованных в равномерном давлении газа во всей городской сети:

«Завод надо располагать в самой низкой части города так, чтобы самые высокие участки города находились дальше от завода, а низкие — ближе к заводу; тогда потеря давления газа от трения в трубопроводах будет компенсироваться увеличением давления в трубах, вследствие под'ема местности по мере удаления от завода».

Теперь, когда мы познакомились с гидростатическим давлением, нам станет ясно явление ореола у заслонок пламенных печей.

Так как всякая пламенная печь представляет полость известной высоты, заполненную раскаленными газами, то в ней по высоте всегда оказываются различные давления. Например, в сварочной печи при высоте заслонки в 700 мм и при наличии давления на поду, равного атмосферному, согласно стр. 9, на уровне верхнего края заслонки будет давление равное $+0{,}728$ мм воды (фиг. 16). Следствием давления выше атмосферного явится большой ореол пламени, прорывающегося через верхний зазор между заслонкой и наличником печи.



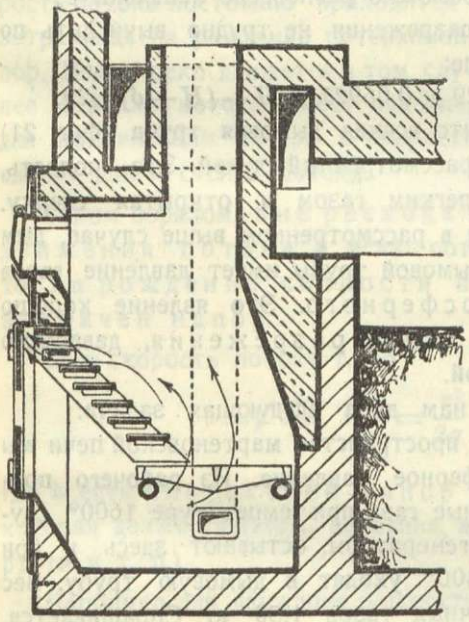
Фиг. 16.

Чтобы уменьшить потерю пламени через этот зазор, часто, прибавляя тягу, устанавливают атмосферное давление не на поду печи, а по середине ее высоты; тогда мы наблюдаем такое явление:

давление на поду делается меньше атмосферного (— 0,36 мм) и наружный воздух засасывается под заслонку, а давление у верха заслонки ослабляется в два раза (+ 0,36 мм) и потеря пламени уменьшается.

Гидростатическим давлением легко об'ясняется неправильная работа ступенчатой решетки в дровяных генераторах, в которых мы часто замечаем поток газов, указанный стрелкой на фиг. 17. Отрицательное давление на уровне горизонтальных колосников сменяется положительным у верхней ступеньки, из-под которой внаружу начинает выбиваться газ, сгорающий совершенно напрасно.

Гидростатическим давлением легко об'яснить и так-называемую «тягу» самодувных генераторов или сифон бр. Сименс (фиг. 18).



Фиг. 17.

Генераторный газ поступает в кирпичную башню при средней температуре 600° С; затем он вступает в длинный горизонтальный железный газопровод, где температура его падает, допустим, — до 300°. Около печи газ спускается в подземный боров при помощи вертикальной трубы при температуре около 200°. Если высота башни 9 метров, вес одного м³ газа при 0° С равен 1,07 кг, то гидростатическое давление газа вверху башни будет:

$$\delta_{600} = 9 \cdot \left(1{,}29 - \frac{1{,}07}{1 + \frac{600}{273}}\right) = 9 \times 0{,}96 =$$

$$= 8{,}64 \text{ мм вод. столба.}$$

Для того, чтобы опустить теплый газ в вертикальном колене, придется преодолеть в этом колене гидростатическое давление этого газа при температуре 250° С.

Сопротивление, равное гидростатическому давлению этой вертикальной трубы, будет равно:

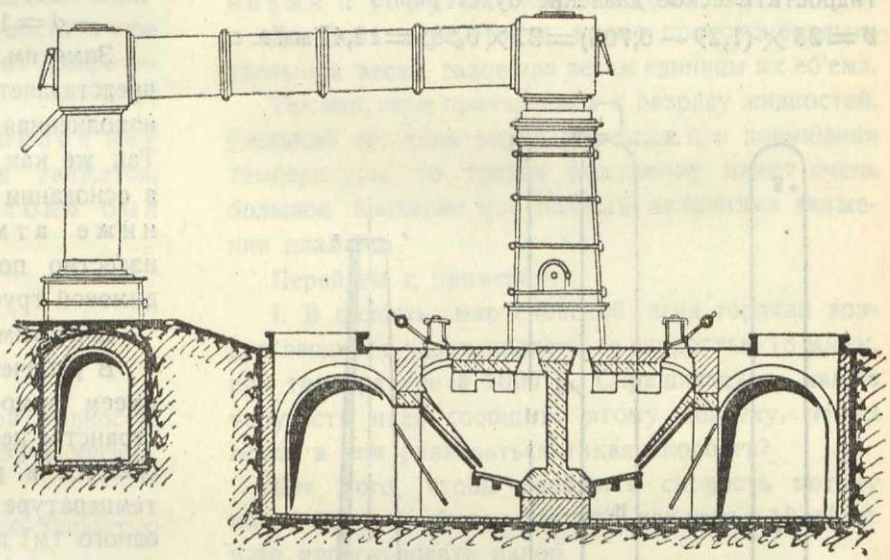
$$\delta_{250} = 9 \cdot \left(1{,}29 - \frac{1{,}07}{1 + \frac{250}{273}}\right) = 9 \cdot 0{,}73 =$$

$$= 6{,}57 \text{ мм воды.}$$

А посему гидростатическое давление газа по достижении им подземного боровка окажется равным:

$$\Delta = \delta_{600} - \delta_{250} = 8{,}64 - 6{,}57 = + 2{,}07 \text{ мм воды.}$$

Так как сопротивление газопровода движению газа обыкновенно меньше 2,07 мм воды, то «сифон» бр. Сименс способствует «тяге» генераторов. Очевидно, что тяга генераторов будет тем сильнее, чем газопровод длинее и чем ниже падает температура газа в горизонтальной части трубы.



Фиг. 18.

Под'ем горизонтальной трубы на большую высоту над подом генератора обеспечивает значительный избыток давления газа сверх атмосферного, что является лучшей гарантией генераторов от взрывов.

Напротив того, устройства, где газ из генератора непосредственно поступает в подземный боровок, плохо обеспечены от возможности взрывов, ибо давление газа в них весьма слабое и часто такие генераторы работают с отрицательным давлением в боровке.

Применим наши расчеты гидростатического давления к доменным газопроводам. При широких колошниках древесноугольных доменных печей, при сравнительно небольшом количестве доменных газов, потери в % отношении через колошник бывают значительны и, конечно, тем больше, чем давление доменных газов в газопроводах больше. Поэтому

чрезвычайно важно иметь метод расчета неизбежного давления газа в газопроводах и этим путем определить избыток давления, явившийся следствием несовершенств устройства газопровода, т.-е. узости труб, крутых переломов и т. п.

Имеем доменную печь 20 м высотой, вес 1 м³ доменного газа равен 1,22 кг, средняя температура 200°С.

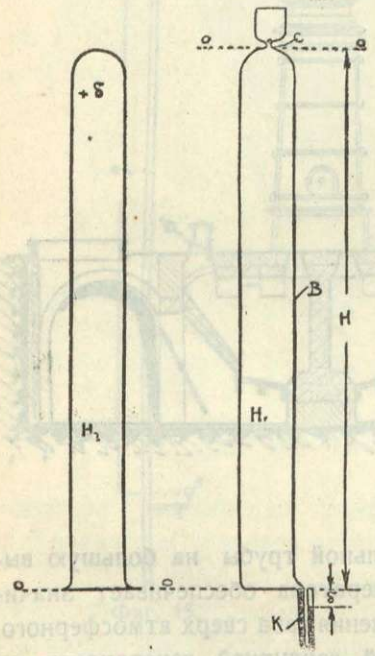
Нужно определить гидростатическое давление под крышкой доменной печи, если газ проведен к паровым котлам, расположенным на 3 м ниже лещади печи, а давление в газопроводе у котлов по закону не может быть ниже атмосферного?

Газопровод представляет полость в 23 метра высотой, заполненную легким газом, вес 1 м³ которого равен

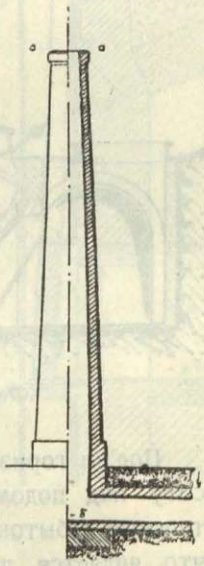
$$p_{200} = \frac{1,22}{1+\frac{200}{273}} = 0,705 \text{ кг.}$$

гидростатическое давление будет равно

$$\delta = 23 \times (1,29 - 0,705) = 23 \times 0,585 = 13,45 \text{ мм в. с.}$$



Фиг. 19.



Фиг. 20.

Фиг. 21.

Это давление в 13,45 мм воды неизбежно, все же давление сверх того (в древесноугольных домнах это давление при узких газопроводах доходит до 35 мм воды), есть следствие плохо устроенного газопровода и может быть уменьшено его перестройкой. Как рассчитать сопротивление газопровода трению будет сказано ниже.

Если мы имеем (фиг. 19) пробирку, опрокинутую дном кверху и заполненную водородом, то при атмосферном давлении на уровне *oo*, мы получим в верхней части пробирки положительное давление $+\delta$.

Видоизменим опыт. Возьмем сосуд с водородом B, имеющий в верхней своей части волосную трубку и в ней капельку воды. (Фиг. 20).

Эта капелька воды может выпустить из сосуда весь избыточный против давления атмосферы водород, не сообщив сосуда с воздухом, так что на уровне *oo* очевидно имеет место давление атмосферы. Спрашивается, какое давление покажет манометр K, поставленный у дна этого сосуда? Очевидно на уровень жидкости манометра в правом колене будет давить столб воздуха $H+\delta$ весом: 1,29 $(H+\delta)$ кг.

Этот столб воздуха должен будет уравновеситься столбом H водорода, который легче воздуха, и столбиком воды δ, который укажет на необходимость, неизбежность разрежения водорода на дне сосуда B, так как только при наличности такого разрежения возможно равновесие капельки C.

Величину разрежения не трудно вычислить по общей формуле:

$$-\delta = 1,29 \times 0,06927 \times H - (H+\delta)\,1,29.$$

Заметим, что всякая дымовая труба (фиг. 21) представляет рассмотренный случай. Это—полость, наполненная легким газом и открытая сверху. Так же как и в рассмотренном выше случае, дым в основании дымовой трубы имеет давление газов ниже атмосферного. Это явление хорошо известно под именем разрежения, даваемого дымовой трубой.

Допустим, нам дана следующая задача:

В рабочем пространстве мартеновской печи мы имеем атмосферное давление. Из рабочего пространства печные газы при температуре 1600° спускаются в регенераторы, остывают здесь и при температуре 400° уходят в дымовую трубу. Вес одного 1м³ печных газов 1,30 кг. Спрашивается, какое гидростатическое давление должны мы иметь на уровне пода регенераторов, если расстояние его от рабочего пространства печи равно шести метрам? (Сопротивлением печи пока пренебрегаем).

Из предыдущего очевидно, что у пода регенераторов давление должно быть отрицательным. Для движения теплых легких газов вниз, дымовая труба должна будет высасывать печные газы и должна будет возбудить разрежение у пода регенераторов, равное

$$-\delta = -6 \times \left(1,29 - \frac{1,30}{1+\frac{(1600+400):2}{273}}\right) =$$

$$= -6 \cdot \left(1,29 - \frac{1,30}{4,66}\right) = -6,06 \text{ мм в. с.}$$

Итак, если полость выполнена легким газом и линия атмосферного давления проходит у пода полости, то вверху полости получается давление выше атмосферного. Если линия атмосферного

давления проходит по верху полости, то у пода полости мы имеем отрицательное давление.

Проще говоря, когда легкий газ имеет возможность подниматься вверх, то он так сказать набирает гидростатическое давление. Напротив того, когда легкий газ нужно спустить вниз, то приходится создать разрежение для того, чтобы осуществить такое движение.

Связь между напором, давлением и скоростью в потоках капельных жидкостей и газов.

Если мы имеем какой-нибудь поток, канал, реку, то скорость воды в нем есть следствие затраченного напора.

Так как дно потока всегда шероховато, то скорость потока постоянно приходится поддерживать, затрачивая на рождение потерянной скорости напор. Вода в реке движется в том случае, если верхнее зеркало потока имеет падение, достаточное для компенсации потерь в скорости от сопротивления дна и стенок потока.

Таким образом, вне расхода напора нет движения потока и если поток движется, то на рождение скорости потока был затрачен напор.

Если скорость потока v, то

$$v=\sqrt{2gh} \quad \text{и} \quad h=\frac{v^2}{2g}$$

где h есть скоростной напор той жидкости, которая движется (воды, керосина, мазута, чугуна, ртути и т. п.).

Например, для движения жидкости со скоростью 4,43 м/сек. нужно по формуле $v=\sqrt{2gh}$ израсходовать напор h, равный 1 метру. Это будет метр: воды, керосина, мазута, чугуна, стали, ртути, вообще жидкости, которая движется.

Если выразить этот метр напора в кг на квадратный метр, то для разных жидкостей мы найдем различное давление, вызывающее скорость в 4,43 м/сек.

для воды это будет . .	1.000	кг/м²	(0,1	атм.)
керосина	800	„	(0,08	„)
мазута	900	„	(0,09	„)
чугуна	6.900	„	(0,69	„)
ртути	13.595	„	(1,395	„)

Если давление выразим в миллиметрах воды, то получим: для воды 1000 мм, для керосина 800 мм, мазута 900 воды, ртути 13595 мм воды.

Таким образом, какова бы ни была природа движущейся жидкости, определенной ее скорости соответствует совершенно определенный скоростный напор, находимый из ур-ния:

$$v=\sqrt{2gh}.$$

Что же касается давления, необходимого для сообщения движения жидкости, то для разных жидкостей это давление различно и прямо пропорционально уд. весу жидкости.

Если мы перейдем к движению газов, то мы должны будем принять те же основные положения.

1. Вне затраты напора нет скорости ибо затрата напора и скорость связаны между собой, как причина и следствие.

2. Данной скорости соответствует определяемый из выражения $v=\sqrt{2gh}$ напор того газа, который находится в движении.

3. Одна и та же скорость газов различных плотностей порождается одним и тем же напором, но разными давлениями и упругостями газов.

Давления и упругости прямо пропорциональны удельным весам газов или весам единицы их об'ема.

Так как, газы принадлежат к разряду жидкостей, удельный вес коих резко меняется при повышении температуры, то третье положение имеет очень большое значение при расчете механизма движения пламени.

Перейдем к примерам.

I. В полость мартеновской печи горячий воздух вводится через пролеты со скоростью 18 м/сек. при температуре в 1000° С. Спрашивается, какую упругость надо сообщить этому воздуху, чтобы могла в нем развиваться такая скорость?

Для того, чтобы сообщить скорость потоку какой бы то ни было жидкости или газа в 18 м/сек. надо израсходовать напор

$$h=16{,}51 \text{ м}^{1}).$$

В данном случае движется воздух, нагретый до 1000° С, вес 1 м³ его будет

$$B_{1000}=\frac{1{,}29}{1+\frac{1000}{273}}=\frac{1{,}29}{4{,}66}=0{,}277 \text{ кг.}$$

Столб горячего воздуха при 1000° С, в 16,51 метра высоты окажет давление на 1 м²

$$\delta=0{,}277\times 16{,}51=4{,}57 \text{ кг/м}^2$$

или $\delta=4{,}57$ мм вод. столба.

Следовательно, для того, чтобы обеспечить горячему воздуху скорость в пролетах в 18 м/сек[1]) необходимо располагать давлением в 4,57 мм воды.

Откуда берется это давление? Кто его создает? Это давление есть гидростатическое давление, которое создается полостью регенераторов и вертикальных каналов, заполненных горячим воздухом.

[1]) См. приложения к V части.

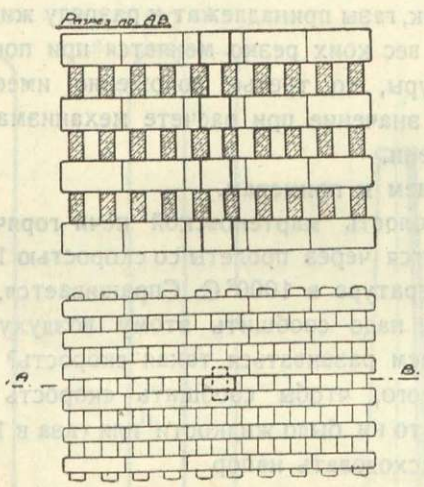
Если допустить, что при проходе воздуха через насадку регенераторов и по каналам потерь нет, то можно высчитать высоту регенераторов, необходимую для того, чтобы создать это гидростатическое давление. Допущение, что в регенераторах нет потерь, конечно неправильно, оно всегда есть, а потому в приведенном ниже расчете мы получим высоту преуменьшенную.

Приняв температуру воздуха внизу регенераторов в 50° С, в головках 1000° С, получим среднюю температуру 525° С. Гидростатическое давление получит величину:

$$\delta = 4{,}57 = H\left(1{,}29 - \frac{1{,}29}{1+\frac{525}{273}}\right)$$

$$H = \frac{4{,}57}{1{,}29\,(1-0{,}34)} = 5{,}37 \text{ м.}$$

Итак, глубина регенераторов и каналов не может быть меньше $5^1/_2$ м. Только регенераторы глубины большей $5^1/_2$ м способны дать скорость воздуху в головках в 18 м/сек.



Фиг. 22.

В настоящую минуту мы подошли к самой сущности механизма движения печных газов. Резюмируем ее так:

Полости печи, заполненные горячими газами, создают в верхних своих частях положительное гидростатическое давление, которое расходуется на сообщение пламени скоростей при движении его в печи.

Приобретенная скорость при движении теряется пламенем от двух причин:

1) Трения потока о стенки; его мы до сих пор учитывать не можем за отсутствием наблюдений.

2) Потери скорости от изменения направления струи.

При расчете вентиляционных каналов считают, что при повороте струи на 90° вся скорость теряется, примем эту норму и мы. Поворот на 180° будем считать как два поворота на 90°, т.-е. потерю будем считать равной двум скоростным напорам. Поворот на 45°, как потерю 0,6 скоростного напора.

Изменение скорости потока условимся считать так: если газ из узкого пролета вступает в широкую полость и v_{max} меняется на v_{min}, то потери нет, но на рождение скорости в следующем узком месте придется затратить опять скоростный напор.

Вот, например, метод расчета сопротивления решетки регенераторов: решетка состоит из вертикальных каналов $4^1/_2'' \times 2^1/_4''$, суживающихся при переходе из ряда в ряд до $2^1/_4'' \times 2^1/_4''$, т.-е. в два раза (фиг. 22).

Скорость газа в узком месте v_{max}, *в широком* $v_{min} = v_{max}$: 2. При переходе газа из узкого места в широкое затраты скоростного напора нет.

Но при переходе из широкого в узкое надо из скорости v_{min} создать скорость v_{max}. Если скорости v_{min} соответствует напор h_{min}, а v_{max} соответствует h_{max}, то очевидно на рождение скорости v_{max} из v_{min} придется затратить

$$(h_{max} - h_{min}).$$

Эта величина и будет сопротивлением одного ряда регенеративной решетки.

Если рядов N, то сопротивление их будет равно

$$\delta_{per} = N\,(h_{max} - h_{min}) \cdot p_t,$$

где p_t есть вес 1 м³ движущегося при температуре t газа.

II. Определить сопротивление решетки регенератора проходу воздуха высотою 6 м (52 ряда); средняя температура воздуха $\frac{50° + 1050°}{2} = 550°$ С; скорость $v_{min} = {}^1/_2$ м/сек, $v_{max} = 1$ м/сек?

Получим вес м³ воздуха при 550°:

$$p_{550} = \frac{1{,}29}{1+\frac{550}{273}} = 0{,}43 \text{ кг.}$$

Скорости $v_{min} = {}^1/_2$ м/сек. соответствует . . . . . $h_{min} = 0{,}013$ м

Скорости $v_{max} = 1$ м/сек. соответствует . . . . . $h_{max} = 0{,}051$ м

$(h_{max} - h_{min}) = 0{,}038$ м

$$\delta_{per} = 52 \times 0{,}038 \times 0{,}43 = 0{,}85 \text{ мм воды.}$$

Итак, сопротивление решетки 0,85 мм воды, а дает эта решетка при высоте 6 м гидростатическое давление:

$$\Delta = 6\,(1{,}29 - 0{,}43) = 5{,}16 \text{ мм. воды.}$$

Следовательно, в конце-концов, в регенераторе давление воздуха получит приращение

$$5{,}16 - 0{,}85 = 4{,}31 \text{ мм воды.}$$

Руководствуясь изложенными соображениями, мы можем рассмотреть гидравлические условия работы мартеновской печи.

Фигура 23 представляет модель разреза печи Мартена между двумя зеркальными стеклами, опущенную в аквариум; по полостям печи движется, керосин. Механизм движения ясен: регенераторы нагревая воздух и газ, создают положительное гидростатическое давление. Это давление расходуется на придание движущимся газам скоростей и сполна расходуется на все скорости газов вплоть до рабочего пространства.

В рабочем пространстве газы имеют незначительные скорости и давление газов равно атмосферному, ибо при обилии окон и заслонок другого давления в рабочей полости иметь невозможно.

Начиная от рабочего пространства, где царствует атмосферное давление, начинается опускание легких газов вниз в регенараторы, перекидные клапаны и дымовую трубу. Для того, чтобы опустить легкие печные газы вниз, на поду регенераторов необходимо установить отрицательное давление, разрежение, в чем и состоит задача дымовой трубы.

Итак, роль дымовой трубы двоякая:

1. Опустить горячие газы на уровень пода регенераторов.

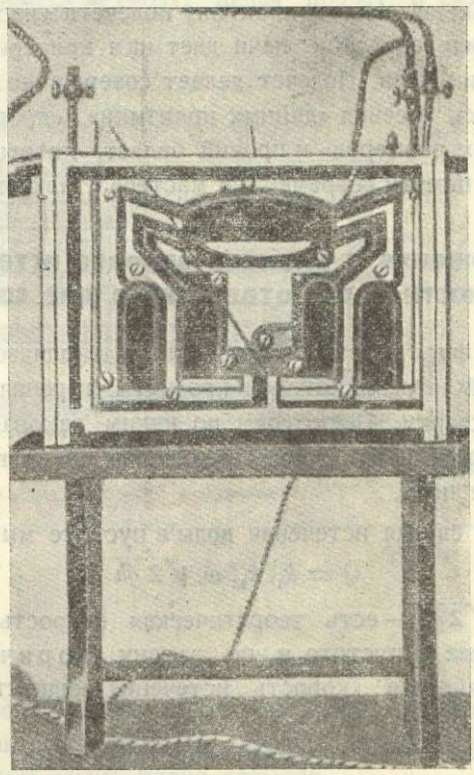
2. Создать во всех полостях печи скорости печных газов, которые эти последние теряют, меняя свое направление и двигаясь вдоль негладких стен печи.

Расчет гидравлики пламенной печи введен в цикл обязательных упражнений для студентов; этим методом расчитаны очень многие печи русских заводов и вот те общие выводы, к которым я пришел, контролируя эти расчеты.

Подсчитывались обыкновенно действующие в заводах печи. Брался суточный расход горючего. Подсчитывалось количество генераторного газа, при чем руководством служил предложенный мною алгебраический метод (см. ч. I). Вычислялось количество печных газов при полуторном расходе вторичного воздуха. Проверка действующих печей показала следующее:

1. При дурно конструированных печах Мартена, страдающих быстрым засариванием регенераторов и потому имеющих краткие кампании, скорости оказывались очень большия и гидростатического давления горячего воздуха и газа в регенераторах и вертикальных каналах доставало только в обрез на рождение их скоростей; иногда же мы получали отрицательный результат, т.-е. приходили к выводу, что по расчету печь следовало бы пустить на дутье; но так как печь, хотя и не важно, работала как самодувная, то логический вывод, сделанный мною, был тот, что предложенный метод расчета—есть расчет с запасом.

2. Газовый и воздушный регенератор требуют для своего питания различное количество печных газов. Определяя расчетом количество газов которые должны пройти через газовый и воздушный регенераторы по отдельности, и сосчитывая тягу дымовой трубы, необходимую для того, чтобы протащить нужное количество газов через тот и другой регенератор для некоторых печей, мы находим почти одинаковую степень разрежения дымовой трубы. Напротив того, для печей американских, где воздух поступает со скоростью в пролетах 8—10 м/сек., а газ со скоростью в головках до 58 м/сек., (искусственное дутье), тяга дымовой трубы для газовых и воздушных регенераторов



Фиг. 23.

резко разнится. Вот тут то и выясняется роль отдельных заслонок для газовых и воздушных регенераторов.

Общее же впечатление всех расчетов таково, что отдельные заслонки для газовых и воздушных регенераторов обязательны.

3. Наконец, хотя редко, но встречаются мартеновския печи, которые сообщают горячему воздуху и газу гидростатическое давление гораздо большее, чем надо (Лысьвенский завод),

Об'ясняется это тем, что скорости в печи небольшие, перекидные клапаны большого размера [1]).

[1]) Узость перекидных клапанов один из главных недостатков современных печей.

На таких печах приходится работать, прикрывая газовый и воздушный клапан, пока печь новая. Когда печь состарится, регенераторы засорятся пылью, сопротивление, искусственно введенное пережимом струи вступающего газа и воздуха, постепенно уменьшается и печь оказывается способной работать и при засоренных регенераторах.

Запас гидростатического давления газов дает возможность при начале работы печи ввести в воздушном и газовом клапане реостат, выключая который, мы удлиняем кампанию печи. Вот разгадка, почему в одних заводах насадку регенераторов выкидывают каждые 100—250 плавок, в других же печах регенераторы выдерживают по полгода и больше.

Итак, введение в практику подсчета гидравлики газов мартеновской печи дает нам критерий конструкции печи. Подсчет делает совершенно излишним весь арсенал «данных практики», «пропорциональных размеров» и прочий баласт, который держат в памяти современные мастера стального дела.

Приложение к пламени законов истечения жидкости через отверстие в дне сосуда.

На фиг. 5 изображена модель кирпичеобжигательной печи, в которой продукты горения отводятся сверху. Посмотрим по каким законам происходит в этом случае истечение из отверстия в своде печи.

Для случая истечения воды в пустоте мы имеем:

$$Q = k_1 . k_2 . \omega . \sqrt{2gh}$$

где $\sqrt{2gh}$ — есть теоретическая скорость падения тела в пустоте и, по закону Торичелли, теоретическая скорость истечения жидкости при напоре ее h;

ω — площадь сечения отверстия,

Q — расход жидкости в секунду,

k_1 — коэффициент сжатия струи, т.-е. отношение площади сжатой струи к ω (обыкновенно 0,64),

k_2 — коэффициент скорости, т.-е. отношение действительной скорости к теоретической (обыкновенно 0,97).

Оставляя в стороне коэффициенты сжатия и скорости (k_1 и k_2) рассмотрим случай истечения керосина в воду (фиг. 24).

Гидростатическое давление в отверстии ω будет равно весу столба воды высотою H — минус вес такого же столба керосина т.-е.:

$$\delta = H\ (1-0{,}8)$$

или в общем виде

$$\delta = H\ (B_{\text{воды}} - B_{\text{керос.}})$$

где $B_{\text{воды}}$ и $B_{\text{керос.}}$ — удельные веса воды и керосина или, что все равно, веса кубической единицы.

Напор должен быть выражен в метрах столба той жидкости, которая вытекает, поэтому для h получим:

$$h = H \frac{B_{\text{воды}} - B_{\text{керос.}}}{B_{\text{керос.}}}$$

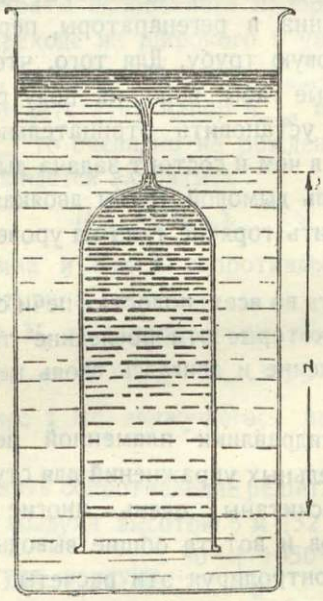
Вставив это в уравнение для расхода, получим для расхода легкой жидкости (керосина), вытекающей через отверстие в тяжелую, такое выражение:

$$Q = k_1 . k_2 . \omega . \sqrt{2gH \frac{B_{\text{воды}} - B_{\text{керос.}}}{B_{\text{керос.}}}} \quad \ldots . \quad (A)$$

Если мы перейдем от воды и керосина к воздуху и печным газам, то для расчета печей получим такую формулу:

$$Q = k_1 . k_2 . \omega . \sqrt{2gH \frac{B_{\text{воз.}} - B_{\text{печн. газ}}}{B_{\text{печн. газ}}}} . \quad (B)$$

где H высота уровня нижнего зеркала печных газов под отверстием в своде печи.



Фиг. 24.

На фиг. 5 (стр. 5) отверстию в куполе придана такая площадь ω, что нижнее зеркало керосина установилось на расстоянии H от отверстия. Очевидно, вставив в ур-ние (А) величины, которые можно определить из этого опыта — Q, ω и H, мы можем определить и коэффициенты k_1 k_2, но до сих пор этого не сделано.

Для газов и больших отверстий эти коэффициенты вероятно близки к единице и таковыми мною при решении задач пока принимаются. Что фиг. 5 имеет место и при управлении пламенными печами, я имел случай наблюдать в заводе б. бр. Корниловых в Ленинграде вместе с И. Г. Есьманом. Во втором этаже печи для обжига фарфоровых изделий, пламя которой удаляется через купол, ясно было видно нижнее зеркало печных газов на высоте 1—1½ метра от пода печи.

Очевидно, это зеркало можно было бы опустить на под верхней камеры, если бы уменьшить отвер-

стие в куполе печи, т.-е. сделать то же, что мы сделали на модели, стеснив выход керосина через отверстие в куполе.

Совместив нижнее зеркало печных газов с подом камеры, мы достигаем возможного максимума в равномерности обжига при этой устарелой и нерациональной системе печи. Полная равномерность обжига возможна, как мы видели, при работе на печах с обращенной тягой (фиг. 6, стр. 6).

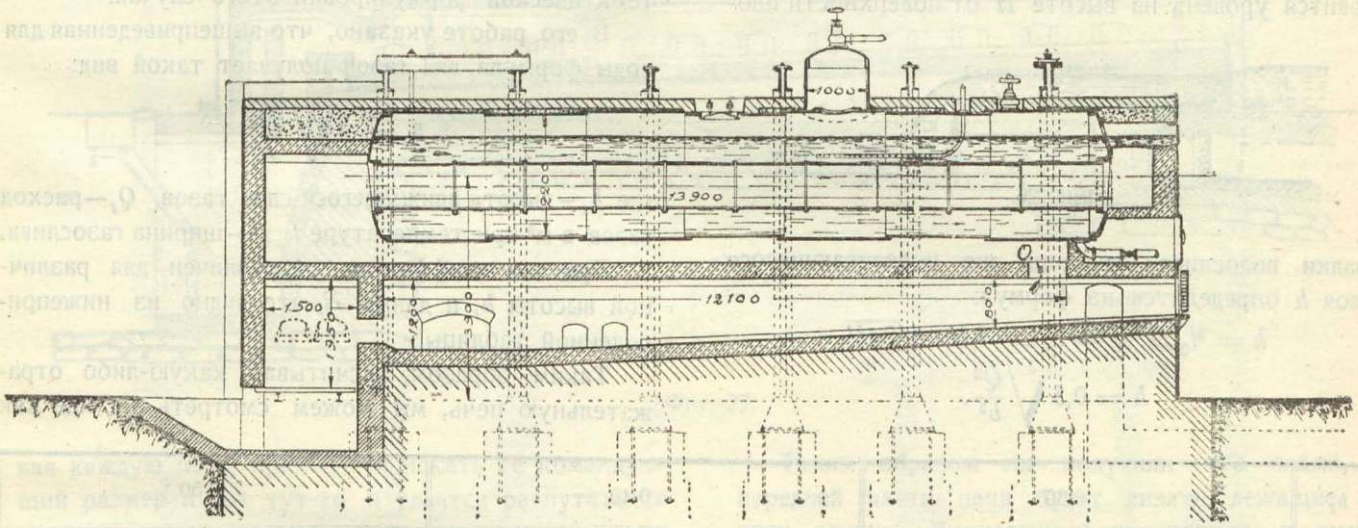
Удаление дыма через отверстие в своде было излюбленной системой печей в старое время[1]) и, хотя в новейших печах эта система отвергается самым решительным образом, однако я приведу, все же, пример расчета величины отверстия в своде печи.

Дана печь для подогрева слитков Луганского завода (фиг. 25).

Итак, по вычислению, расстояние от отверстия в ключе свода до нижнего зеркала, при выпуске газов в атмосферу, будет 803 мм. Сделано в действительности 800 мм (см. фиг. 25), что свидетельствует о том, что в этой печи соблюдено очень старое правило, говорящее:

«Чтобы пламенная печь работала хорошо, пламя должно лизать подину печи».

Приведя пример расчета размеров дымового пролета в своде отражательной печи, я должен оговориться, что делать пролет в своде печи никогда не следует. Это устарелая и очень плохая система и вот почему: пламя не однородно; в нем есть холодные, тяжелые струи, в данном случае омывающие холодные слитки, и горячие, легкие струи, стремящиеся к своду. Делая пролет в своду, мы



Фиг. 25.

Продукты горения при температуре в 600° удаляются под котел через отверстие O. Количество печных газов по действительному секундному расходу каменного угля при полуторном расходе воздуха определено $Q_{600} = 8{,}58$ м³/сек. Отверстие в своде имеет площадь $\omega = 2{,}5$ м $\times 0{,}6$ м $= 1{,}5$ м².

Вопрос: на каком расстоянии от свода находится нижнее зеркало печных газов?

$$Q = k_1 k_2 \omega \sqrt{2gH \frac{B_{\text{воз.}} - B_{\text{печ. газ.}}}{B_{\text{печ. газ.}}}}$$

Приняв $k_1 k_2 = 1$; $\sqrt{2g} = 4{,}43$ получим

$$8{,}58 = 1{,}5 \cdot 4{,}43 \sqrt{H \cdot \frac{1{,}29 - 0{,}42}{0{,}42}}$$

$$8{,}58 = 1{,}5 \cdot 4{,}43 \sqrt{H \cdot 2{,}07}.$$

$$\sqrt{H} = \frac{8{,}58}{1{,}5 \times 4{,}43 \times 1{,}44} = \frac{8{,}58}{9{,}57} = 0{,}896$$

$$H = 0{,}803 \text{ м}.$$

[1]) Особенно часто употребляются такие печи при получении меди, свинца и др. металлов.

даем возможность горячим струям покинуть печь, холодные же, тяжелые струи облегают слитки и последние очень плохо греются.

Дым всегда надо отводить с пода печи; тогда холодные струи покидают печь, горячие же заступают их место и слитки энергично греются. Это относится к печам всяких назначений и отвод продуктов горения с уровня пода вниз — должно почитать общим правилом для правильной конструкции печи.

Уравнение (B) может быть весьма упрощено, если считать вес 1м³ дыма равным весу воздуха (1,29 кг), что почти верно. Тогда

$$\frac{B_{\text{воз.}} - B_{\text{печ. газ.}}}{B_{\text{печ. газ.}}} = \frac{1{,}29 - \frac{1{,}29}{1+at}}{\frac{1{,}29}{1+at}} = \frac{1 - \frac{1}{1+at}}{\frac{1}{1+at}} = at$$

и $$Q = k_1 k_2 \omega \sqrt{2gHat} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (C)$$

Выражение Hat есть скоростный напор h, ибо $v=\sqrt{2gh}$, а потому

$$h = Hat \text{ или}$$
$$h : H = at,$$

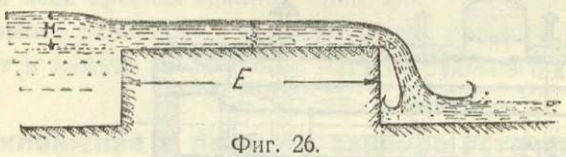
а так как $a = \frac{1}{273}$, то получаем

$$h : H = t : 273 \ldots\ldots (D)$$

скоростный напор во столько раз больше высоты H, во сколько t больше 273. Как мы увидим ниже, это выражение нам еще встретится при расчете газовых фонтанов.

Приложение теории водосливов к расчету отражательных печей.

Если мы имеем обширный водоем, через который протекает (фиг. 26) Q м³/сек, то в нем установится уровень на высоте H от поверхности пло-



Фиг. 26.

щадки водослива, толщина же переливающегося слоя h определится из формул:

$$h = {}^2/_3 H;\ Q = 0{,}35 \cdot bH \cdot \sqrt{2gH}.$$

$$h = 0{,}5 \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2}}.$$

как все нагреваемые в печи предметы расположены на поду печи, так как под печи теряет много тепла на лучеиспускание и нагревание посаженных в печь предметов, то под хорошо работающей отражательной печи должен энергично подогреваться пламенем, что возможно только в том случае, если нижнее зеркало пламенного потока будет касаться пода печи, или если, как говорят на заводах, «пламя будет лизать подину».

Это соображение дает нам метод расчета отражательных печей. Очевидно, в хорошо работающей печи глубина обращенной газовой реки должна равняться высоте свода над подом. Если вернуться к фиг. 25, то h и будет это расстояние.

Задачу вывода формулы для глубины газовой реки блестяще разрешил И. Г. Есьман [1]), к которому я обратился за помощью для правильной математической формулировки этого случая.

В его работе указано, что вышеприведенная для воды формула, для газов получает такой вид:

$$h_t = A \sqrt[3]{\frac{Q_t^2}{B^2 t}}$$

где h_t — высота движущегося слоя газов, Q_t — расход газов в м³ при температуре t, B — ширина газослива.

При чем коэффициент A различен для различной высоты h_t и длины E, что видно из нижеприведенной таблицы.

Таким образом, расчитывая какую-либо отражательную печь, мы можем смотреть на нее как

h_t	0,30					0,40					0,50				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
A	3,20	3,41	3,52	3,62	3,67	3,07	3,34	3,51	3,61	3,69	2,95	3,27	3,48	3,59	3,69

h_t	0,60					0,75					1,00				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
A	2,75	3,20	3,45	3,59	3,69	2,71	3,06	3,36	3,56	3,69	2,43	2,95	3,28	3,52	3,75

На основании этой формулы можно составить себе понятие о глубине протока, соединяющего два водоема, и о глубине всякой реки с дном, имеющим уклон, достаточный для покрытия неизбежных потерь на трение.

Всякая пламенная отражательная печь с горизонтальным сводом представляет русло обращенной реки, в котором течет не вода, а раскаленные газы.

Хорошо работающая отражательная печь должна удовлетворять нижеследующему условию: так

на газослив, глубина которого определяется по формуле И. Г. Есьмана. При движении газов по горизонтальным боровкам и по горизонтальным сводам методических печей формула эта должна дать очень близкие к практике результаты.

При сводах восстающих действительная толщина струи h будет меньше вычисленной по формуле И. Есьмана, при сводах понурых — больше вычисленной по этой формуле.

---

[1]) Журн. Рус. Мет. О-ва, 1914, I, стр. 725—770.

В своей работе И. Г. Есьман дает математические выражения и для первого случая, но вводить в них коэффициент трения, о котором мы пока ничего не знаем.

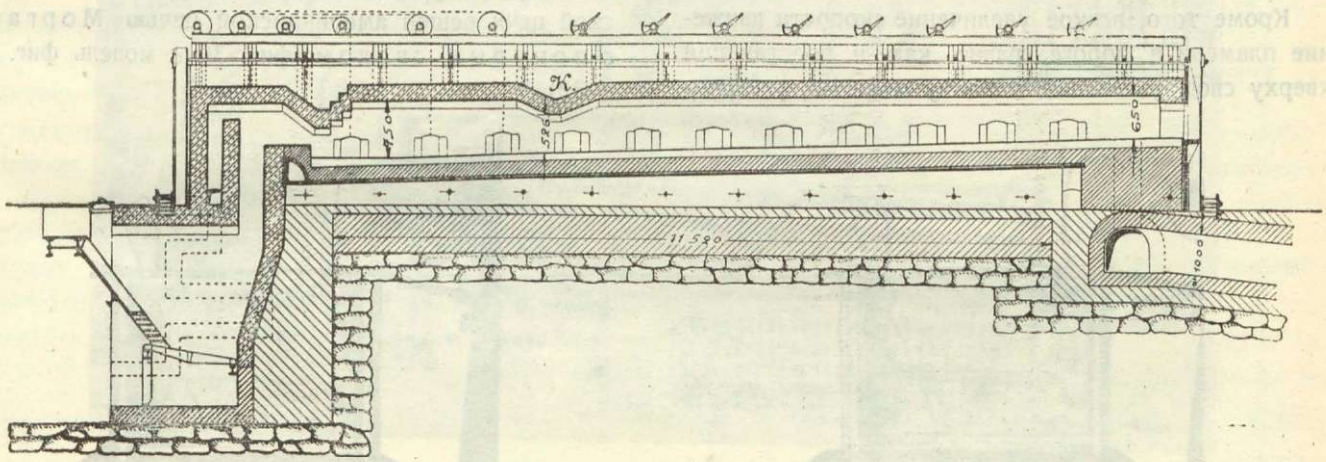
В какой же мере согласна практика с формулой Есьмана?

Для того, чтобы проверить формулу И. Г. Есьмана, я попробовал применять ее для действующих печей, при чем мне пришлось основываться на следующем положении: раз печь работает и завод ею довольствуется, то пламя газослива должно быть на поду печи.

Сама металлургическая печь представляет из себя весьма редко идеальный газослив[1]). Рассматривая каждую печь, приходится искать ее командующий размер и вот тут-то и удается распутать те гордиевы узлы, которые ставили в тупик весьма многих инженеров. Оказывается, что во многих печах решающую роль играют размеры, которыми мы пренебрегали, и, напротив того, те размеры, которым мы придавали весьма серьезное значение, его вовсе не имеют.

Как пример расчета и его значения приведу данные расчета методической печи Лысьвенского завода (фиг. 27), работающей на каменном угле Кизелевских копей на Урале с 25% золы и свыше 3% серы. Недостатки печи и меры к улучшению ее работы определяются расчетом сами собой.

Размеры пода	$13 \times 2 = 26$ м²
Выделка в 24 часа	2900 пуд.
На 1 м²	1,83 тн
Расход к. у./24 часа	$409\frac{1}{2}$ пуд.=6170 кг
В секунду	0,078 кг
На пуд слитков к. у.	14,1 %
При полуторном расходе воздуха на 1 кг к. у. приходится печных газов при 0°C . .	9,89 м³
Секундное количество печных газов при 0°C	$Q_0 = 0{,}77$ м³/сек
при 1200°C	$Q_{1200} = 4{,}2$ м³/сек
Высота свода над подом в пережиме K, при $t = 1200°$ по формуле И. Г. Есьмана .	$h_{1200} = 455$ мм
Сделано	526 мм
Секундное количество газов при $t = 700°$	$Q_{700} = 2{,}74$ м³/сек
Высота свода над подом у дымового пролета при $t = 700°$ по формуле И. Г. Есьмана	$k_{700} = 510$ мм
Сделано	650 мм



Фиг. 27.

Таким образом мы получили что пламя, в передней части печи будет лизать лежащие на поду слитки. Вычисленный же размер у дымового пролета оказался меньше, чем сделано в натуре. Получив такие результаты подсчета, я запросил письмом управляющего Лысьвенским округом, А. И. Онуфровича, о работе этой печи, поставив два вопроса.

1) Прижимают ли печные газы пережимом свода к поду печи?

2) Не отстают ли они от пода в заднем конце печи?

На это я получил ответ, излагавший историю этой печи: печь была построена без пережима (Жур. Русск. Мет. О-ва, 1910—I статья Н. Толстова, Табл. XXXI); работала отвратительно; тогда был сделан пережим такого размера, чтоб прижать пламя к поду. Оказалось, что слою пламени в печи со слитками пришлось дать высоту 526 мм (черт. 27).

На второй мой вопрос я получил ответ, что задняя часть печи работает не важно. Пламя летит под сводом. В ближайший ремонт А. А. Онуфрович предполагает свод сломать и сделать его

[1]) Подробнее см. Ж. Р. М. О. 1925, ч. I, стр. 38.

горизонтальным, при чем свод опустится на 150 мм и h_{700} будет равно—500 мм.

Итак, мы видим, что формула И. Г. Есьмана получила полное подтверждение при расчете этой печи.

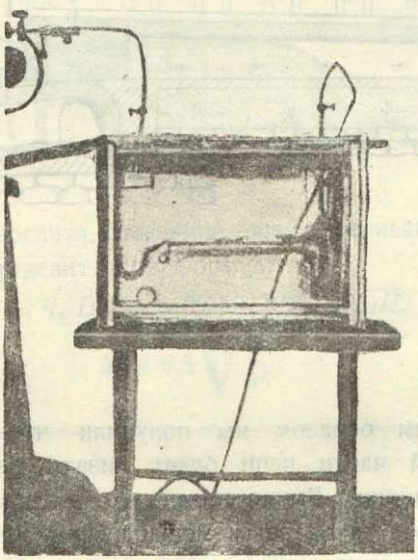
Мы видим, что реакция горения идет очень неполно в непосредственном соседстве с холодными слитками, поэтому в интересах полноты горения методические печи, с одной стороны не допускают низких сводов, с другой стороны,—расход горючего в них быстро увеличивается с поднятием свода, т. к. из формулы Есьмана следует, что

$$Q_t = B\sqrt{\left(\frac{h_t}{A}\right)^3 . t}$$

Кроме того, всякое увеличение скорости движение пламени в пороге, равно как и восстающий кверху свод, уменьшая толщину пламени, увеличивают расход горючего, ибо в конце-концов пламя в отражательных печах должно лизать под.

Все это приводит нас к выводу, что современные методические печи не могут работать удовлетворительно.

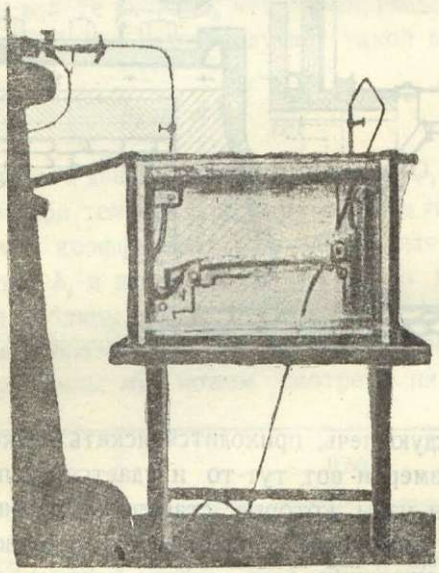
На фиг. 28 и 29 изображена модель печи Путиловского завода, опущенная в воду, по полостям которой пущен окрашенный керосин. Обе фотографии демонстрируют отвод дыма через отверстие в поду, при чем на фиг. 28 видно, что на поду печи остается, даже при таком способе отводить дым из печи, слой холодного воздуха. Восстающая кверху подина образует мешок, из которого тяжелый холодный воздух не имеет выхода. Это — капитальнейший недостаток методических печей с восстающим сводом и подом: расположенные на поду слитки студят печные газы и остуженные печные газы не имеют возможности удалиться в дымовую трубу, ибо они тяжелее пламени.



Фиг. 28.

На фиг. 29 был усилен приток керосина, но воду удалось удалить с пода модели не раньше, чем давление было поднято так сказать выше атмосферного, так что часть керосина выдавило даже под подину модели. Очевидно так работать на печи нельзя. Нельзя выдавливать остывшие на подине газы через заслонки в атмосферу. Следовательно, на практике мы имеем всегда работу печи согласно фиг. 28, при чем слитки энергично греются только сверху, на поду же лежит слой остывших печных газов и засасываемого холодного воздуха. Это задерживает их нагревание, увеличивает угар железа и делает обязательным кантование слитков.

Вопрос о рациональной конструкции методической печи решен американской печью Моргана с понурым сводом (фиг. 30 и модель фиг. 31 и 32).



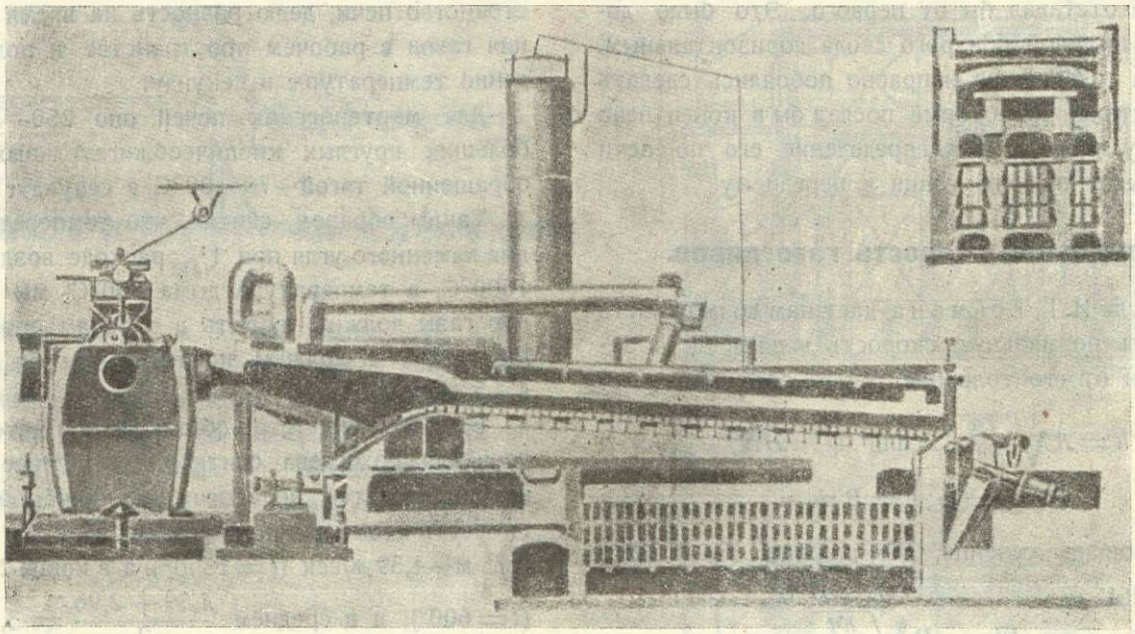
Фиг. 29.

Курьезно, что Морган был приведен к этой печи совсем не соображениями о движении пламени, а, просто, удобством двигать толкателем нагреваемые болванки вверх, при чем подогреваемые болванки не выскакивали из ряда, как при толкании их вниз или по горизонтальным трубам. Однако оказалось, что приданная им печам с понурым сводом, конструкция решает вопрос о методических печах наилучшим образом.

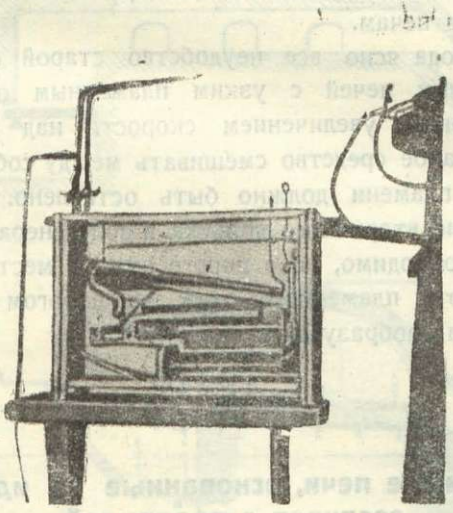
Из фиг. 30 видно, что генераторый газ высокой температуры (около 1000°) и подогретый в рекуператоре воздух вводится в сожигательную камеру; здесь происходит горение смеси, а затем печные газы по мере их охлаждения, спускаются по понурому своду, проходят между слитками, лежащими на трубах, и опускаются в трубчатый рекуператор.

В этой печи слитки, буквально, купаются в пламени и на модели видно, что ни малейшее за-

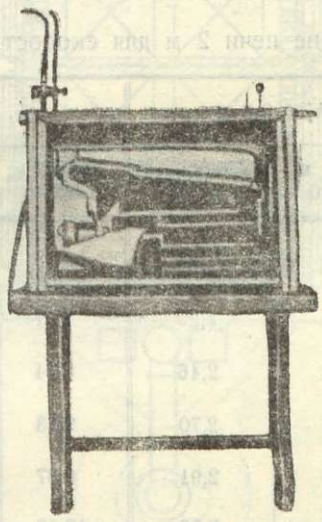
сасывание холодного воздуха в этой печи невозможно, как невозможно и застаивание остывших печных газов. Напротив того, в этой печи остывшие струи падают на очень низко расположенный под и по нем спускаются в рекуператор. На фотографии фиг. 31 уловлен момент заполнения модели керосином; она прекрасно демонстрирует, что раскаленные газы пламени спускаются по понурому



Фиг. 30.



Фиг. 31.



Фиг. 32.

своду горизонтальными слоями и горизонтальными же слоями, омывая слитки, спускаются по мере своего охлаждения в рекуператор.

Идея делать методические печи с понурым сводом сильно распространяется по заводам и на юге России можно видеть несколько старых печей с восстающим сводом, переломанных по середине.

Какой свод выбрать для печи,—восстающий, горизонтальный или понурый, зависит от цели, которая преследуется печью:

1) свод горизонтальный гарантирует не очень высокую температуру в начале печи и не очень низкую в конце;

2) если мы хотим усилить жар в передней части печи и понизить в конце, мы делаем свод понурый; тогда впереди печи получается высокая камера, где пламя задерживается некоторое время; там кончаются реакции горения; горячие продукты горения по мере остывания спускаются вниз параллельными слоями вдоль свода и уходят в дымовое отверстие в поду печи;

3) однако бывают случаи, когда мы заинтересованы в том, чтобы во всей печи был бы равно-

мерный жар, тогда необходимо применить свод восстающий.

В моей личной практике был такой случай: на поду печи нагревались два больших стальных ящика для отжига жести; при чем первый нагревался гораздо скорее, чем второй, и отжиг жести в первом ящике был сильнее, чем во втором. Такая работа была для завода крайне убыточна и надо было добиться, чтобы отжиг во втором ящике не отставал бы от первого. Это было достигнуто заменой понурого свода горизонтальным. Мы тогда совершенно напрасно побоялись сделать свод восстающий, который послал бы в конец печи всю массу пламени и распределение его по печи пошло бы от заднего конца к переднему.

Нормальная скорость газосливов.

Формула И. Г. Есьмана дает нам возможность определить нормальную скорость v пламени, в зависимости от его толщины.

Имеем $h = A\sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 t}}$ или $Q = B\sqrt{\frac{h^3 t}{A^3}}$

Но $Q = \omega . v = B . h . v$

где ω площадь сечения, B — ширина, h — высота газослива.

Откуда $$Bhv = B\sqrt{\frac{h^3 t}{A^3}}$$

$$v = \sqrt{\frac{ht}{A^3}}$$

При ширине печи 2 м для скорости v имеем:

t^0	$h_1 = 0{,}3$ м		$h_1 = 1$ м	
	E=0,5 м; A=3,20	E=∞; A=3,67	E=0,5 м; A=2,43	E=∞; A=3,70
600	2,34	1,91	6,47	3,43
800	2,71	2,20	7,47	3,96
1000	3,02	2,46	8,34	4,42
1200	3,31	2,70	9,13	4,84
1400	3,58	2,91	9,87	5,24
1600	3,83	3,12	10,56	5,60

Из этого мы видим, что при горизонтальном своде скорости пламени колеблются обыкновенно в пределах до $5^1/_2$ м/сек, а так как в пламенных печах пламя должно оставаться некоторое время, чтобы успеть сообщить свою теплоту нагреваемым предметам, то техника очень часто бывает заинтересована сколь возможно замедлить движение пламени; но очевидно, что мы никогда не можем желать ускорить движение пламени, так как это повело бы к безмерному удлинению печи.

Я делал много попыток определить время, необходимое для передачи тепла газов нагреваемым предметам и стенкам печи. Мои подсчеты установили мне два предела для потери температуры в секунду. Метод расчета таков: я сосчитывая теоретическую температуру пламени, вычитаю температуру печных газов, покидающих рабочее пространство печи, делю разность на время пребывания газов в рабочем пространстве и получаю падение температуры в секунду.

Для мартеновских печей оно 250—350°С для больших круглых кирпичеобжигательных печей с обращенной тягой—70—80°С в секунду.

Таким образом, считая, что температура горения каменного угля при $1^1/_2$ расходе воздуха будет 1600°С, а температура дыма 700°С, мы получим, что газы должны остыть в рабочем пространстве на 900°, т.-е. должны пребывать в нем не менее 4 – 5 секунд.

Если это будет тип обыкновенной методической печи для подогрева слитков, где нижнее зеркало потока касается пода печи, то принимая $E = \infty$, скорость пламени в начале печи будет при высоте ее 0,75 м—4,39 м/сек ($t = 1300°$), а в конце 2,96 м/сек ($t = 600°$), а в среднем $\frac{4{,}39 + 2{,}96}{2} = 3{,}68$ м/сек, что дает длину печи в 15—$18^1/_2$ метра.

Итак, ограничиваясь возможно малыми скоростями потоков пламени, мы приходим к очень длинным печам.

Отсюда ясно все неудобство старой системы пламенных печей с узким пламенным окном и чрезмерным увеличением скорости над порогом печи. Такое средство смешивать между собой элементы пламени должно быть оставлено. Тесное смешение вторичного воздуха и полугенераторного газа необходимо, но в пороге ему не место.

Высота пламенного окна над порогом должна делаться сообразуясь с формулой:—

$$h_1 = A\sqrt[3]{\frac{Q_1^2}{B^2 t}}.$$

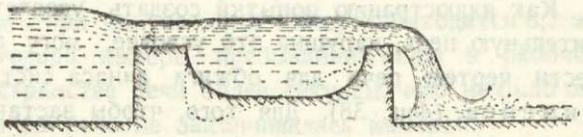
Пламенные печи, основанные на идее газосливов с подпрудой.

Весьма часто печи большой длины неудобны. Между тем есть желание удержать пламя в печи подольше, уменьшив скорость поступательного движения газов. В этих случаях газослив подпруживают так же, как подпруживают водослив.

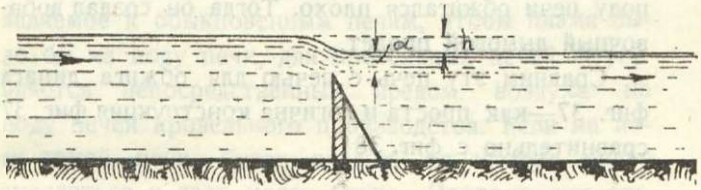
Если мы имеем подпруженный водослив, то очевидно скорость в подпруде будет меньше скорости в водосливе. Следовательно, устроив подпруду, мы уменьшим скорость воды.

Сделаем для пламени то же, что мы сделали для воды.

На фиг. 26 мы имели водослив с горизонтальной площадкой. На фиг. 33 имеем водослив с углублением.

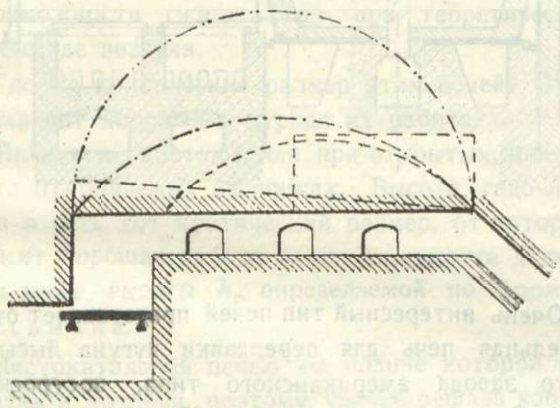


Фиг. 33.

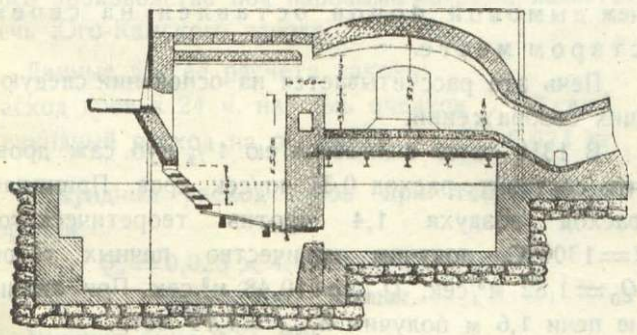


Фиг. 34.

Сравнивая фиг. 26 и 33 мы видим, что преобразование водослива с площадкой в водослив с углублением произошло, когда мы порог водослива оставили на месте, и на поверхности водослива сделали углубление. Если мы будем увеличивать это углубление, то получим подпруженный водослив (фиг. 34) в котором уровни жидкости остались почти те же, что и в водосливе фиг. 26.

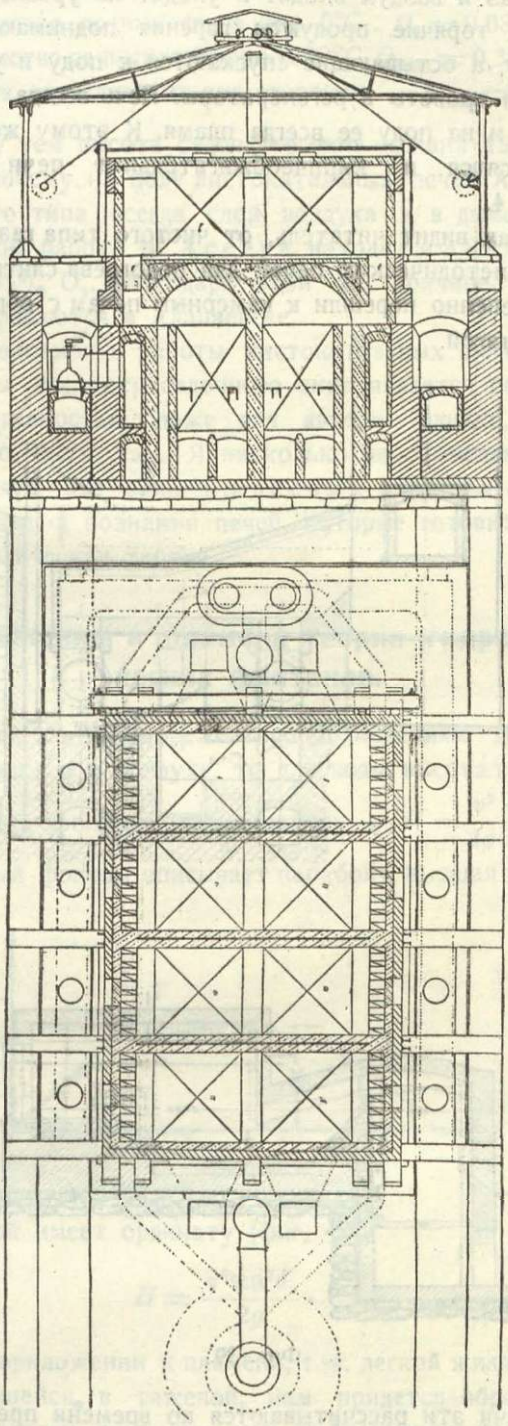


Фиг. 35.



Фиг. 36.

Если мы сделаем то же с печью (фиг. 35) и изменим свод по всем шести вариантам, то уровень зеркала потока останется на подине и печь будет продолжать хорошо работать. Газы будут пребывать в печи большее время и лучше отдавать свою теплоту нагреваемым предметам, а температура газов, покидающих печь, а, следовательно, и температура нагреваемых предметов, будет различна.



Фиг. 37.

Таким образом нетрудно перейти от типа методической печи к типу камерной печи. На фиг. 36 изображен переходный тип от обыкновенной печи для нагрева слитков к камерной печи. Это—печь для нагрева поковок Путиловского завода. Очень короткая печь с высоким сводом, дабы иметь возможность вводить крупные слитки. Фиг. 37 изо-

жает рабочее пространство печи автора для обжига динаса. Это—конструктивно разработанный чертеж печи, описанной в Журн. Русс. Мет. О-ва (1910, 86—89).

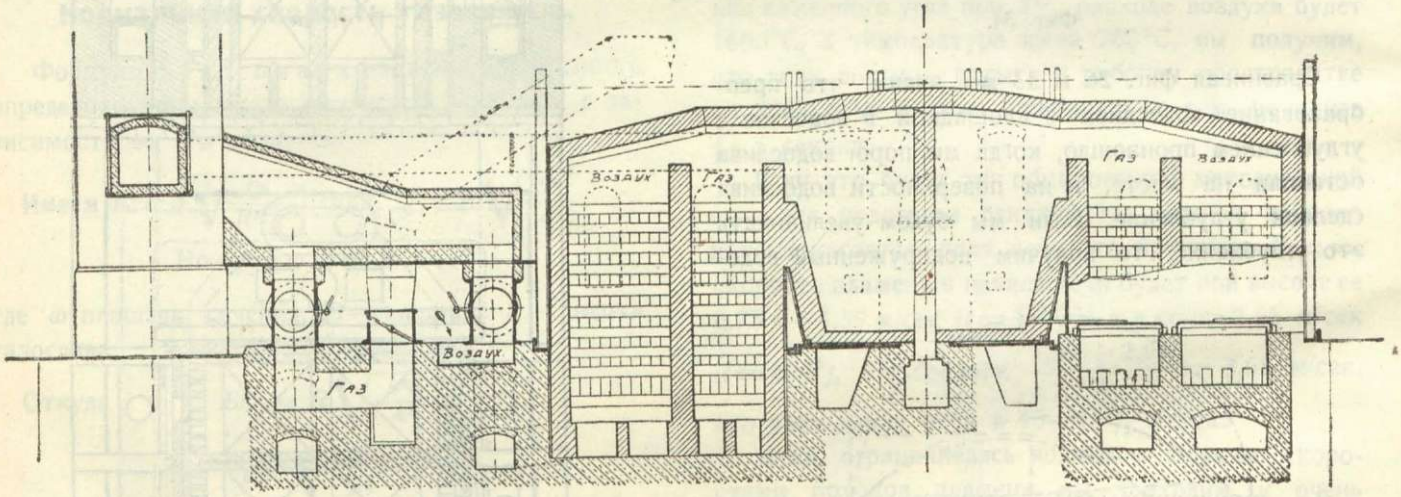
В этой многокамерной печи системы Сименса газ и воздух входят и уходят на уровне пода печи, горячие продукты горения поднимаются к своду, а остывающие спускаются к поду и уходят через пролеты в регенераторы. Печь всегда полна огня и на поду ее всегда пламя. К этому же типу относятся и кирпчеобжигательные печи типа фиг. 4.

Как видит читатель, от чистого типа газосливных методических печей для подогрева слитков мы постепенно перешли к камерным печам с обращенной тягой.

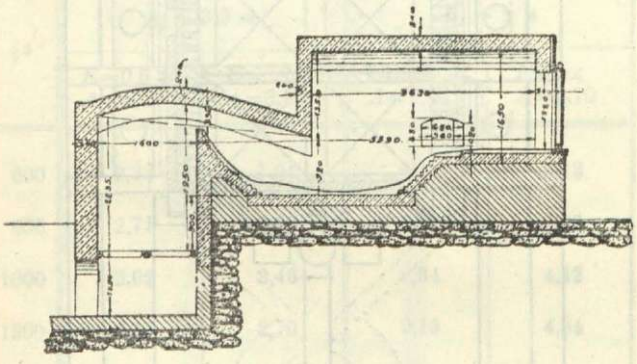
высота верхней кромки дымового канала должна быть не выше h_1, а нижняя кромка должна быть на уровне пода печи. Если в камерной печи взять дым выше уровня пода, то на поду никогда высокой температуры достигнуто не будет.

Как иллюстрацию попытки создать удовлетворительную печь, нарушив это условие, могу привести чертеж печи для обжига динаса системы Сименса (фиг. 38). Для того, чтобы заставить пламя обжечь динас на поду печи, изобретатель устроил в печи перегородку и, все-таки, динас на поду печи обжигался плохо. Тогда он создал добавочный дымовой пролет.

Сравним эту печь с печью для обжига динаса фиг. 37—как проста и логична конструкция фиг. 37 сравнительно с фиг. 38!



Фиг. 38.



Фиг. 39.

Печи эти рассчитываются по времени пребывания в них газов, задаваясь падением температуры печных газов в секунду. Но, конструируя эту печь, надо иметь всегда в уме формулу И. Есьмана для газослива и ею руководствоваться во всех тех случаях, когда движущийся об'ем печных газов может получить форму газослива.

Например, если в печи мы имеем окна и заслонки, то высота окон не может превышать высоты h_1; если боровок взять не вниз, а в бок, то

Очень интересный тип печей представляет отражательная печь для переплавки чугуна Лысьвенского завода американского типа, построенная А. И. Онуфровичем (фиг. 39). Конец обыкновенной отражательной печи обращен в камеру, при чем дымовой боров оставлен на своем старом месте.

Печь эта рассчитывается на основании следующих соображений.

В $13^1/_2$ часов сжигается ею $4^1/_2$ куб. саж. дров, что составит расход 0,31 кг/сек дров. Принимая расход воздуха 1,4 против теоретического, $t = 1300°C$, получим количество печных газов $Q_0 = 1{,}82$ м³/сек, $Q_{1300} = 10{,}48$ м³/сек. При ширине печи 1,6 м получим $h_{1300} = 1{,}19$ метр.

Следовательно, нормальная глубина газослива этой печи равна 1200 мм и, чтобы эта печь могла работать расстояние от пода до верхней кромки дымового пролета должно быть не больше 1200 мм, иначе на подине не будет пламени и под не прогреется. Действительный вертикальный размер от выпускного отверстия до верхней кромки дымового

пролета, сделанный 1100 мм, хорошо сходится с расчетом. Садочное окно гораздо выше, но во время работы печи его плотно замазывают, а потому потери пламени через него не происходит.

Об'ем рабочего пространства этой печи около 11 м³, при чем на долю камеры приходится 8,7 м³. Благодаря камере, пребывание газов в рабочем пространстве печи более секунды, чего не было бы, если бы печь не заканчивалась камерой.

Одним из интереснейших типов печей являются печи кровельного производства. Требование, пред'являемое к обыкновенным печам, чтобы пламя было бы на поду печи, для кровельных печей усугубляется непосредственным вредом воздуха на поду печей кровельного производства. Если на поду такой печи будет воздух, то железо будет окисляться и даст массу брака. Поэтому все эти печи должны строиться так, чтобы исключить всякую возможность появления на поду свободного воздуха.

Печи эти по типу камерные и высота свода над подом может быть очень большая. Наилучшие печи делаются с высоким сводом, при чем подсводным пространством пользуются как сожигательной камерой, для теснейшего смешения газа и воздуха и возможности сжигать газ при теоретическом количестве воздуха.

Где же критический размер этих печей? Отчего зависит хорошая и дурная их работа?

Печи эти работают или при открытых, или при часто открываемых заслонках. Высота садочного окна и есть тот критический размер, от которого зависит хорошая работа печи. Эта высота должна быть ниже высоты h_p, определяемой по формуле И. Есьмана.

Листокатальной печью, на подине которой нет воздуха и которая, поэтому, удачно решала вопрос об утилизации теряющегося жара печей кровельного производства под паровыми котлами, является печь Юго-Камского завода.

Данные для ее расчета таковы:

Расход дров в 24 ч. на семь очелков . 4,2 саж³.
Секундный расход на очелок . . . . . 0,023 кг.

Секундный расход газов при теоретическом горении:

$$Q_0 = 0{,}023 \times 4{,}41 = 0{,}101 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

$$Q_{1000} = 0{,}471 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Ширина окна 0,85 мм.

Вычисленная высота окна $h_{1000} = 0{,}250$ м; сделано—225 мм.

Отсюда мы видим, что высота окна, прикрываемого заслонкой, строго пропорционирована с количеством газов, циркулирующим в очелке, а потому открытие заслонки (заслонка прекрасной конструкции, с педалью) не влечет за собой вторжения в очелок холодного воздуха, что имеет место, повидимому, во всех печах других систем, например в газовых печах Алапаевского типа, данные для которых следующие:

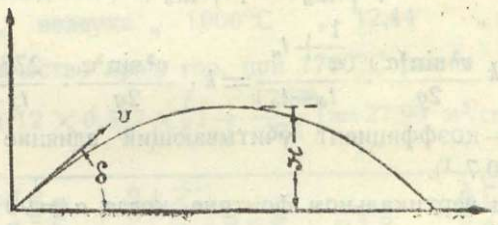
Секундный расход дров на очелок . . . 0,0185 кг.
Количество печных газов при 0°C . $Q_0 = 0{,}082$ м³.
Количество печных газов при 1000°C. $Q_{1000} = 0{,}382$ м³.
Высота газослива из-под заслонки . . $h_{1000} = 0{,}2$ м.

Между тем высота садочного окна сделана 450 мм. Вот почему на поду листокатальных печей Алапаевского типа всегда слой воздуха и в дыме их, согласно работе Н. Асеева, находится 3,85% CO_2 и 16,65% O_2. Благодаря этой же причине, печи эти бросаются в Алапаевске.

Зависимость работы листокатальных печей от высоты заслонки садочного окна является полной неожиданностью, даже для автора: однако, это должно быть так. Я нисколько не сомневаюсь в том, что это один из весьма многих сюрпризов в познании печей, которые готовит нам гидравлическая теория.

Приложение к пламени теории гидравлических фонтанов.

Если мы пренебрежем сопротивлениям трения в насадке и в воздухе, то для воды высота вертикального фонтана равна напору и $H = \frac{v^2}{2g}$. Наклонный фонтан описывает параболу, высшая точка



Фиг 40.

которой имеет ординату (фиг. 40).

$$H = \frac{v^2 \sin^2 \delta}{2g}.$$

В приложении к пламени, т.-е. легкой жидкости, движущейся в тяжелой, нам придется обратить этот чертеж вниз, так как на брошенную частицу действует не сила тяжести, направленная вниз, а разность весов брошенной частицы и соответствующего об'ема среды, в которой эта частица движется. Сила эта будет направлена вверх и весь чертеж нужно обратить на 180° (фиг. 41).

И. Г. Есьман дал нижеследующее выражение для высоты фонтана, в виде бесконечно тонкой струйки газов, выбрасываемых из пролета мартеновской печи

Назовем начальную скорость движущейся жидкости — v;

вес единицы об'ема движущейся жидкости — Δ_∂;

вес единицы об'ема неподвижной среды — $\Delta_н$.

Тогда каждая единица об'ема движущейся жидкости теряет в своем весе $\Delta_н$; а сила, поднимающая единицу об'ема равна $(\Delta_н - \Delta_\partial)$.

Ускорение этой силы x найдется из пропорции

$$x : g = (\Delta_н - \Delta_\partial) : \Delta_\partial.$$

А высота H для этого случая

$$H = k \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g} \left(\frac{\Delta_\partial}{\Delta_н - \Delta_\partial} \right).$$

Для раскаленных газов

$$\Delta_н = \frac{\Delta_0}{1 + \alpha t_н}$$

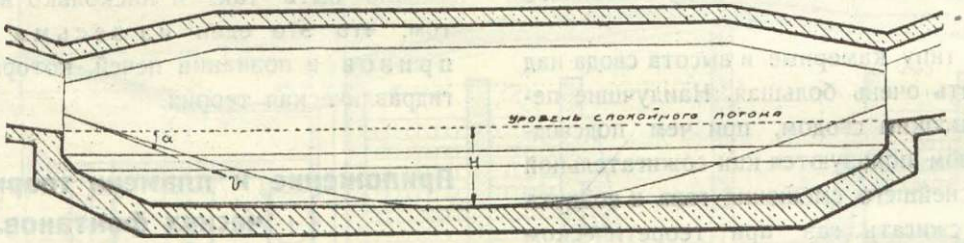
$$\Delta_\partial = \frac{\Delta_0}{1 + \alpha t_\partial},$$

вернее во всем пространстве печи ниж кромок газовых пролетов, остается вода, которая никоим образом из полости мартеновской печи удалена быть не может.

Присутствие воды ясно указывает нам на капитальнейший недостаток мартеновской печи, как прибора для нагревания: в ней пламя входит и уходит под сводом, и вся часть рабочего пространства от нижней кромки газового пролета до уровня выпускного отверстия, расстояние, равное в современных печах от 0,5 м до 1,3 м, остается вне газового потока.

На модели мы ясно видим, что ванна мартеновской печи является мешком, из которого остывшие газы не имеют естественного выхода и потому должны застаиваться.

Для того, чтобы сбить их с пода, смешать с раскаленными газами пламени, газ и воздух, по-



Фиг. 41.

откуда:

$$H = k \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g} \cdot \frac{\frac{\Delta_0}{1 + \alpha t_\partial}}{\frac{\Delta_0}{1 + \alpha t_н} - \frac{\Delta_0}{1 + \alpha t_\partial}} = k \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g} \cdot \frac{1 + \alpha t_н}{\alpha (t_\partial - t_н)}$$

$$H = k \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g} \cdot \frac{\frac{1}{\alpha} + t_н}{t_\partial - t_н} = k \cdot \frac{v^2 \sin^2 \alpha}{2g} \cdot \frac{273 + t_н}{t_\partial - t_н}$$

где k — коэффициент учитывающий влияние вихрей $= 0{,}7$ [1]).

При вертикальном фонтане, когда $\alpha = 90°$, получим:

$$H = k \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{273 + t_н}{t_\partial - t_н}.$$

При $t_н = 0°$, т.-е., когда фонтан бьет в холодный воздух, получим:

$$H = k \frac{v^2}{2g} \frac{273}{t_\partial}$$

или пренебрегая вихрями

$$H : h = 273 : t_\partial.$$

Пропорция, которую мы уже имели на стр. 18.

Сделаем приложение теории фонтанов к мартеновским печам.

На фиг. 23 показана модель мартеновской печи, в полостях коей движется керосин. Как видно из фиг. 23, все полости мартеновской печи заполнены керосином, кроме ванны печи; в ванне печи, ступающие в рабочее пространство мартеновской печи, направляют на под. Им дают большую скорость, около 12—18 м/сек в европейских и до 50 м/сек (на дутье) в американских печах, и, пользуясь явлением фонтана, опускают их на всю глубину лещади до выпускного отверстия включительно.

Если выражение для газового фонтана верно, то все печи Мартена, работающие в заводах, должны ему удовлетворять.

Посмотрим, так ли это?

В рабочее пространство мартеновской печи вводится нагретый до 1000°—1100°С воздух и газ

Соединяясь между собой, они дают факел пламени, имеющий по пирометру Ваннера 1800—1850°С, вместо теоретической температуры 2100°С Зная количество топлива, сжигаемого в 1 секунду в генераторный газ, его состав, не трудно вычислить секундный об'ем генераторного газа и вторичного воздуха, а следовательно,— не трудно вычислить и скорости горячего воздуха и газа, с которыми они вводятся в полость печи.

Например, 30-тн мартеновская печь, делая четыре плавки при затрате каменного угля в 25% от веса металла, расходует 0,347 кг к. у./сек, чему соответствует при 0°С 1,50 м³/сек генераторного газа (см. часть I) и вторичного воздуха (при полуторном расходе) 2,67 м³/сек.

[1]) См. Ж. Р. М О. 1913, I, 709. Статья В. Слесарева.

Приняв температуры газа и воздуха в 1000°, получим секундные об'емы их, вступающие в полость мартеновской 30-тонной печи: газа — 6,99 м³/сек, воздуха—12,44 м³/сек.

Газ и воздух в полости печи соединяются и дают струйку пламени, температурой 1850°. Вопрос: на какую глубину опустится эта струйка, если газ и воздух вступили в полость печи со скоростями $v_{газ}$ и $v_{воздух}$, под углами α и β к горизонту.

Работа мартеновской печи возможна только в том случае, если ее под хорошо проварен. Если под не проварен, то его срывает и плавка не будет прогрета.

Следовательно, высота фонтана H должна быть непременно больше высоты от порога газового окна до выпускного отверстия.

Эта высота дана М. А. Павловым для 36 лучших европейских и американских печей (Ж. Р. Мет. О-ва, 1910, 169—183) в пределах от 500 мм до 1375 мм.

Затем, обращаясь к формуле (стр. 26).

$$H = k \cdot \frac{v^2 \sin^2\delta}{2g} \cdot \frac{273 + t_н}{t_д - t_н}$$

мы видим, что высота фонтана тем больше, чем больше $t_н$, т.-е. температура рабочего пространства мартеновской печи. Ясно, что когда печь будет холодная и $t_н = 0$, то H будет minimum; когда $t_н$ сделается равной $t_д$, то H делается равным бесконечности; это обозначает, что если мы имеем жидкость и в ней частицу, которой сообщена скорость и если мы не примем во внимание явлений междучастичного трения, то мы должны будем притти к выводу, что перемещение H этой частицы будет бесконечно большим и движение будет продолжаться бесконечно долгое время.

Если температура полости мартеновской печи $t_н$ не равна нулю и не равна температуре пламени $t_д$, то высота фонтана H будет тем больше, чем температура $t_н$ выше, т.-е. чем печные газы, выполняющие печь, более легки.

И в самом деле, если мы имеем струю керосина, направленную вниз, то в воде она опустится на бóльшую глубину, чем в ртути. В печи, выполненной раскаленными газами, пламя опустится ниже, чем в печи, выполненной холодным тяжелым атмосферным воздухом.

Каждый, кто наблюдал процесс разогревания мартеновской печи, знает, что пламя вначале в холодной печи идет под сводом, опускаясь на под все ниже и ниже по мере разогревания печи; в раскаленной печи возможна уже наварка пода, т.-е. спекание кварцевого песку с небольшой примесью огнеупорной глины, магнезита с небольшой примесью мартеновского шлака или доломита, имеющего в своем составе 3—7% кремнезема. Такое спекание идет при температуре 1600—1700°С и возможно только тогда, когда пламя лижет под печи. Кроме того по мере работы площади газовых и воздушных окон, вследствие разгара, увеличиваются благодаря чему сильно уменьшается скорость газа и воздуха и наварка пода становится затруднительной.

Для наварки пода нужно, чтобы пламя, направляемое наклонными пролетами, могло касаться самой низкой его точки. Отсюда вытекает необходимость прежде всего выяснить, на какую глубину ниже нормального уровня газового потока нужно опустить струю раскаленных продуктов горения.

Высота газового потока определяется по формуле И. Г. Есьмана.

$$h_t = A \sqrt[3]{\frac{Q^2_t}{B^2 t}}$$

где Q_t — об'ем продуктов горения в м³ при температуре t,

B — ширина газослива в м,

t — температура.

В качестве средней температуры продуктов горения мартеновской печи можно принять 1700°С. Для примера расчитаем, при какой температуре $t_н$ рабочего пространства мартеновской печи струйка пламени температурой 1850°С коснется пода.

Берем три 30-тонных мартеновских печи[1]) №№ 19, 21 и 22, для которых, как вычислено выше:

расход газа при 1000°С равен 6,99 м³/сек.,
„ воздуха „ 1000°С „ 12,44 „

и количество прод. гор. при 1700°С равно

$$11{,}12 \times 0{,}347 \times \left(1 + \frac{1700}{273}\right) = 27{,}90 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

№№ печей.	Ширина рабочего пространства (метр.).	Высота свода над подом (метр.).	Площадь газовых пролетов (м²).	Площадь воздушн. пролетов. (м²).	Уклон лещади газовых пролет.	Уклон свода воздушн. пролетов.
19	3,3	2,280	0,285	0,540	15°	38°
21	3,6	2,200(?)	0,446	0,720	33°	33°
22	3,2	2,000	0,260	0,560	10°	38°

Кроме печи № 21 струи газа и воздуха имеют разные уклоны при различных массах (весах) газа и воздуха. Нам нужно получить общую скорость струйки пламени и ее уклон. Решим эту задачу так. Построим параллелограм количеств движения движущихся газа и воздуха и найдем вели-

[1]) См. М. А. Павлов. Определение размеров мартеновских печей по эмпирическим данным (1912 г.).

чину скорости и уклон смеси. Примем вес смеси за единицу и вычислим относительные веса газа и воздуха, вошедшие в состав смеси:

$$\frac{1{,}50\times 1{,}05}{2{,}67\times 1{,}29}=\frac{1{,}575}{3{,}444}=\frac{0{,}3138}{0{,}6862}.$$

Далее, для печи № 19:

скорость газа:

$$6{,}99 : 0{,}285 = 24{,}5 \text{ м/сек},$$

скорость воздуха:

$$12{,}44 : 0{,}540 = 23{,}0 \text{ м/сек}.$$

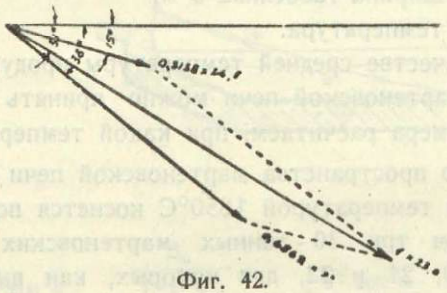
Строим параллелограм количеств движения (фиг. 42) и находим скорость смеси равной— 23,0 м/сек.

Нормальный уровень газового потока в мартеновской печи согласно формуле Есьмана:

$$h = A\sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 t}} = 3{,}70\sqrt[3]{\frac{27{,}90^2}{3{,}3^2\times 1700}} = \sim 1{,}30 \text{ м}.$$

Пламя необходимо опустить на глубину

$$2{,}280 - 1{,}300 = 0{,}98 \text{ или около } 1 \text{ м}.$$



Фиг. 42.

Формулой, связывающей высоту газового фонтана со скоростью и температурой неподвижной среды является выражение:

$$H = k\,\frac{v^2\sin^2\alpha}{2g}\,\frac{273+t_н}{t_в - t_н}$$

Зная H, v и $\alpha = 31°$, определим $t_н$

$$1{,}00 = 0{,}7\,\frac{23{,}0^2\sin^2 31°}{2g}\,\frac{273+t_н}{1850-t_н}$$

Решая это уравнение, находим необходимую температуру газов, выполняющих мартеновскую печь для начала наварки пода $t_н$ равной 81°С

Аналогично для печей №№ 21 и 22.

	№ 21.	№ 22.
Скорость газа	15,7 м/сек	26,9 м/сек
„ воздуха	17,3 „	22,2 „
„ смеси	16,8 „	23,0 „
Глубина погружения газового фонтана	1,00 м	0,70 м
Уклон газового фонтана	33°	28°
Температура мартеновской печи, необходимая для начала наварки пода	260°С	30°С

Какое значение имеет плотность среды, куда бьет газовый фонтан, видно из следующего примера:

Для печи № 19 высота H при $t_н = 81°$С равна 1,00 м. Определим, какова будет высота фонтана при $t_н = 0°$С.

Получим:

$$H = 0{,}7\,\frac{23{,}0^2\sin^2 31°}{2g}\,\frac{273+0}{1850+0} = 0{,}740 \text{ м},$$

т.-е. пламя не коснется пода на

$$1{,}000 - 0{,}740 = 260 \text{ мм}$$

и пойдет выше пода почти на фут.

Итак, во взятых на удачу, трех 30-тонных печах, газу и воздуху в головках даны такие скорости и такие уклоны, что пламя стелется по поду при весьма слабом подогреве печи. Это, конечно, обезпечивает прекрасную починку пода, но во время работы печи не очень выгодно. Когда печь наполнена сталью и шлаком, то круто направлять пламя на ванну невыгодно: происходит удар струи о поверхность ванны, при чем пламя отражается к своду, что вредно для печи и для нагрева ванны.

Меня очень интересовал вопрос о движении пламени в длинных печах американских заводов, головки которых имеют весьма небольшие уклоны пролетов, малые скорости воздуха и большие скорости газа.

Возьмем две 60-тонные печи из таблиц проф. М. А. Павлова—№№ 34 и 36.

Расход воздуха по предыдущему примем при 1000°С . . . . . 24,88 м³/сек

Расход газа . . . . . 13,98 „

Количество продуктов горения при 1700°С —55,80 м³/сек.

	№ 34.	№ 36.
Ширина рабочего простран.	4,88 м	5,10 м
Высота свода над подом	2,53 „	2,69 „
Площадь газового пролета.	0,730 м²	0,3935 м²
„ воздушного „	2,700 „	3 750 „
Уклон газовых пролетов.	6°	12°
„ воздушных „	17°	26°
Нормальная высота газового потока.	1,58 м	1,53 м
Глубина погружения газового фонтана	0,95 „	1,16 „
Скорость газа	19,2 м/сек	35,5 м/сек
„ воздуха	9,2 „	6,6 „
„ смеси	12,3 „	15,6 „
Угол наклона газового фонтана.	11°	16°
Температура печи, необходимая для наварки пода	1490°С	1080°С

Из этого расчета следует, что наварка пода в печи № 34 будет затруднительна, и едва ли опубликованный чертеж верен.

Что касается печи № 36, то, как мне кажется, она отвечает всем пред'явленным к ней требованиям. Наварка пода не очень трудная и пламя не отражается от поверхности ванны.

ГЛАВА II.

Основы правильной конструкции печей.

Задача построения печи решена, если в полости рабочего пространства температура распределена согласно потребности производства.

Топочные газы входят в рабочее пространство с невполне законченными реакциями горения. Поэтому первая задача проекта печи заключается в том, чтобы дать реакциям горения возможность завершиться в рабочем пространстве печи, сосредоточить в нем фокус горения и наивысшую температуру пламени. Впрочем, иногда, по условиям производства, требуется предотвратить получение такого фокуса горения и, напротив того, возбудить горение во всей полости печи.

Вторая задача проекта печи—нагреть полученными раскаленными газами предметы, введенные в полость рабочего пространства.

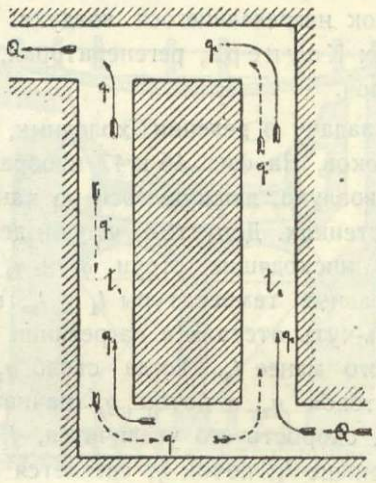
О том, как решается первая задача мы уже имели суждение, теперь я займусь решением второй задачи: какое направление должно быть дано пламени, чтобы оно могло бы наисовершеннейшим способом омыть нагреваемые предметы и удалиться из рабочего пространства, освобождая место свежему притоку печных газов? Как приспособить к такому движению пламени рабочее пространство?

Решение этой второй задачи весьма просто. Однако, несмотря на его простоту, оно очень плохо усвоено практиками и мне придется дать читателю целую коллекцию действовавших и действующих печей с грубыми нарушениями законов природы, т.-е. коллекцию печей-уродов.

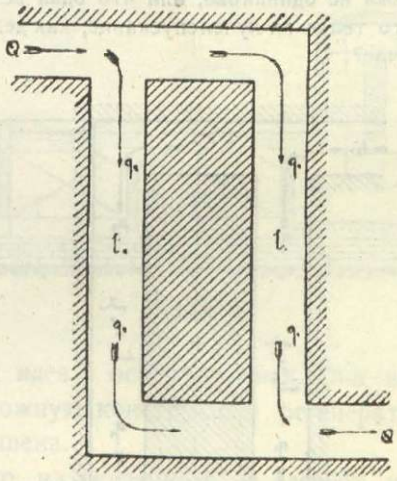
О делении потоков горячих газов.

Дан поток горячих, но остывающих газов Q (фиг. 43 и 44), требуется разделить его на две вертикальных восстающих равных струи q_1 и q_2. Допустим, что на фиг. 43 нам удалось это сделать и поток Q разделился на две струи q_1 и q_2 с температурами t_1 и t_2, при чем $q_1 = q_2$ и $t_1 = t_2$. Но вот, при действии этой системы, оказалось, что лучеиспускание ветви q_1 стало несколько большим, чем q_2, и t_1 сделалось меньшим t_2 на самую малую величину Δt.

Раз температура $t_1 < t_2$, то вес столба газов q_1 окажется больше, чем q_2, а потому и скорость потока q_1 окажется меньше, чем скорость потока q_2. Уменьшение скорости потока q_1 еще более понизит температуру t_1; скорость потока q_1 еще уменьшится, температура еще понизится. В то же время скорость потока q_2 увеличится, температура газов его повысится, отчего он еще усилится и, в конце концов, может случиться так, что поток q_1 остановится совсем, а по ветви q_2 пойдут все газы потока Q. Но возможен и такой случай, что в колене q_1 поток примет направление обратное q_1, означенное пунктирной стрелкой. Из сказанного



Фиг. 43.



Фиг. 44.

ясно, что остывающий поток горячих газов нельзя разделить на равные восстающие струи.

Применим те же рассуждения к фиг. 44. Сделаем попытку разделить поток горячих газов Q на равные нисходящие струи. Такая попытка увенчается полным успехом. Действительно, допустим, что температура одной из струй, например q_1 понизилась. Тогда столб газов q_1 сделается тяжелее и скорость его движения вниз увеличится. Он

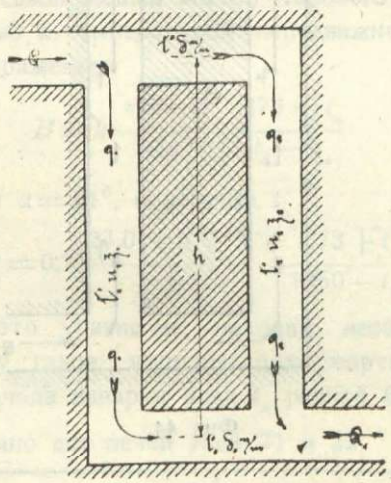
сделается сильнее, чем поток q_2 и температура его поднимется и выравняется с температурой потока q_2. Отсюда мы видим, что задача разделения остывающего потока на нисходящие струи решается очень просто, при чем нисходящие струи имеют свойство стремиться к уравнению своей температуры.

Итак, если мы должны разделить поток горячих остывающих газов на равные части, то струям этого потока должно придать направление вниз; иначе говоря, остывающий поток делится равномерно на нисходящие струи[1]).

При проектировании печей иногда приходится делить поток нагревающегося воздуха. Например, в аппаратах Каупера, регенераторах, рекуператорах и проч.

Решим задачу о делении холодных, нагревающихся потоков. На фиг. 46 и 47 изображен поток холодного воздуха, движущегося по каналам в накаленных стенках. Допустим, что он делится нами на равные нисходящие струи q_1 и q_2 (фиг. 46), имеющие равные температуры t_1 и t_2, но одна из ветвей чуть-чуть отстала в нагревании и t_1 сделалось немного менее t_2. Тогда столб q_1 сделается тяжелее столба q_2 и поток q_1 начнет работать энергичнее, скорость его увеличится, t_1 сделается заметно меньше t_2; поток q_1 сделается еще более

[1]) Однако бывают случаи, что сопротивление трению ветвей потока не одинаково; или что одна ветвь потока теряет много тепла на лучеиспускание; как делится поток в этом случае?

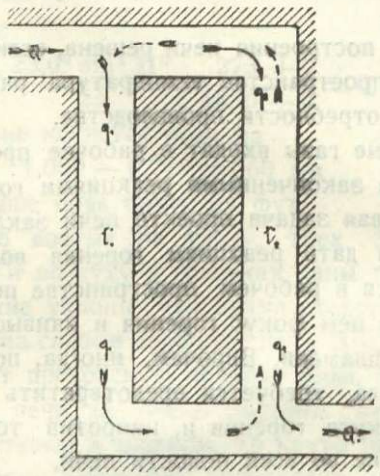


Фиг. 45.

На фиг. 45 имеем такой случай. Поток разделился на две ветви q_1 и q_2, которые имеют разные средние температуры, разные средние скорости и разные потери на трения ξ_1 и ξ_2, выраженные в мм водяного столба.

Однако необходимым условием равновесия в этом случае должно быть одинаковое приращение гидростатического давления в обоих ветвях q_1 и q_2.

Если бы не было затраты гидростатического давления на возбуждение скоростей u_1 и u_2 и на сопротивления холодным, а поток q_2 еще более горячим и, в конце концов, весь поток устремится по ветви q_1, а по ветви q_2 может возникнуть даже обратный циркуляционный ток, показанный пунктирной стрелкой.



Фиг. 46

Итак, холодный поток нельзя делить на нисходящие струи.

Попробуем разделить его на восходящие струи получим совсем другие результаты. Допустим даже, что струи фиг. 47 не равны:

$$q_1 > q_2 \text{ и потому } t_2 > t_1.$$

ξ_1 и ξ_2, то сопротивление гидростатического давления в мм воды в ветви q_1 при высоте ея h было бы, приняв вес м³ печных газов при 0° в 1,29 кг,

$$1{,}29\,h\left(1-\frac{1}{1+\alpha t_1}\right)=1{,}29\,h\,\frac{\alpha t_1}{1+\alpha t_1}.$$

Для ветви q_2 гидростатическое давление равно:

$$1{,}29h\,\frac{\alpha t_2}{1+\alpha t_2}.$$

Из этих приращений гидростатических давлений некоторая часть расходуется на сопротивление трению ξ_1 и ξ_2 и на возбуждение скоростей u_1 и u_2

Последние потери будут иметь такое выражение в мм водяного столба:

$$\frac{u_1^2}{2g}\,\frac{1{,}29}{1+\alpha t_1}\text{ и }\frac{u_2^2}{2g}\,\frac{1{,}29}{1+\alpha t_2}.$$

А условие равновесия приращений гидростатических давлений даст ур-ние:

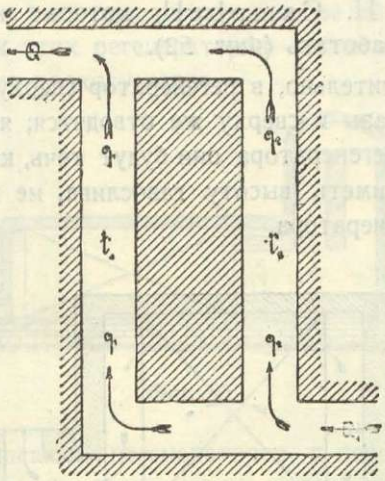
$$1{,}29h\,\frac{\alpha t_1}{1+\alpha t_1}-\xi_1-\frac{u_1^2}{2g}\,\frac{1{,}29}{1+\alpha t_1}=$$

$$=1{,}29h\,\frac{\alpha t_2}{1+\alpha t_2}-\xi_2-\frac{u_2^2}{2g}\,\frac{1{,}29}{1+\alpha t_2}.$$

В этом выражении шесть переменных. Зная пять из них, получим шестую. Например, зная сопротивления ξ_1 и ξ_2, t_1 и t_2, может определять соотношение скоростей u_1 и u_2.

Например: ячейки аппарата Каупера по его периферии теряют очень много на лучеиспускание и студят поток печных газов, по ним протекающий, благодаря чему в них идет усиленное движение печных газов, ибо если $t_2 < t_1$, то $u_2 > u_1$. Измерив t_2 и t_1, не трудно найти $u_2 : u_1$.

Если $t_2 > t_1$, то вес столба q_2 сделается легче веса столба q_1 и поток q_2 начнет усиленно работать, что понизит температуру t_2 и повысит t_1 пока они не выровняются; тогда выровняется и мощность потоков q_1 и q_2.



Фиг. 7.

Отсюда следует, что холодный нагревающийся поток нужно делить на восходящие струи.

Закон о делении газовых потоков, несмотря на свою простоту и элементарность, до сих пор не усвоен металлургами. Его знают прекрасно опытные печники, строящие печи для комнатного отопления, и не знают многие видные инженеры.

В дальнейшем будет приведено много примеров конструкций, противных природе, и потому плохо работающих или совершенно оставленных.

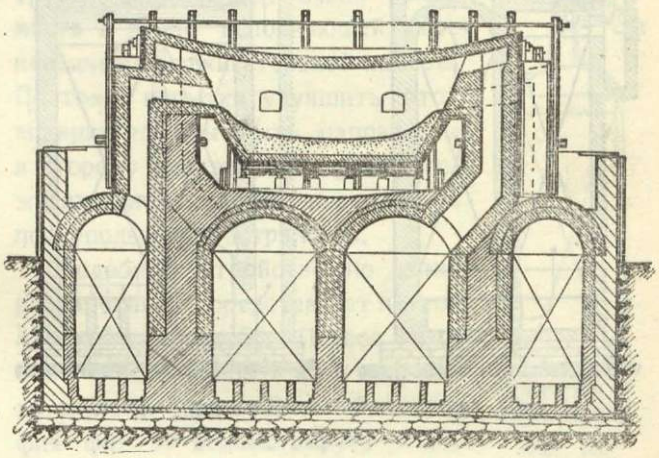
На практике встречается так много ошибок, что перечислить их нет никакой возможности, а потому я думаю, что лучшим методом изложения будет систематическое описание всевозможных типов печей с указанием конструкций правильных и ошибочнхы.

Порядок изложения будет такой:

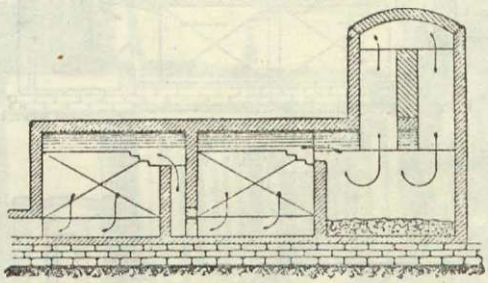
1. Вертикальные регенераторы.
2. Лежачие регенераторы.
3. Регенеративные воздухонагреватели.
4. Уравнители температуры дутья.
5. Воздухонагреватели с чугунными трубами.
6. Камерные печи кирпичного и керамикового производства.
7. Цементационные печи.
8. Печи для приготовления ковкого чугуна.
9. Кольцевые печи.
10. Муфельные печи.
11. Вертикальные печи для закалки, отжига и отпуска.
12. Горизонтальные закалочные печи.
13. Печи для отжига котельных листов.
14. Обыкновенные печи для нагрева слитков.
15. Нагревательные печи Сименса.
16. Колодцы с отоплением.
17. Печи для нагревания слитков.
18. Коридорные печи.

Вертикальные регенераторы.

Обыкновенный тип вертикальных регенераторов мартеновских печей построен совершенно правильно. Печные газы высокой температуры равномерно спускаются сверху вниз, делясь на равные, нисходящие струи [1]). Поэтому идея Шенвельдера разделить регенераторы каждый на две части и тем способствовать их равномерной



Фиг. 48.



Фиг. 9.

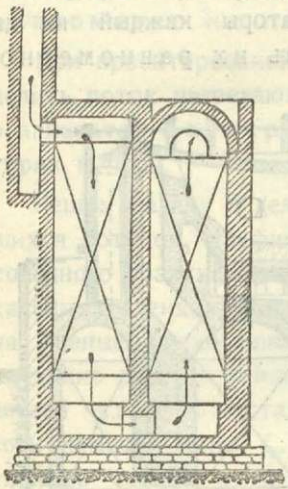
работе, идея в основе ложная. Она вызвала излишне сложную конструкцию регенераторов и потому брошена.

Однако, из сказанного не следует, что, как ни устроить вертикальные регенераторы, они всегда будут работать равномерно. Несомненно, что вертикальные регенераторы стремятся работать равномерно, но неправильным их устройством мы можем испортить их работу.

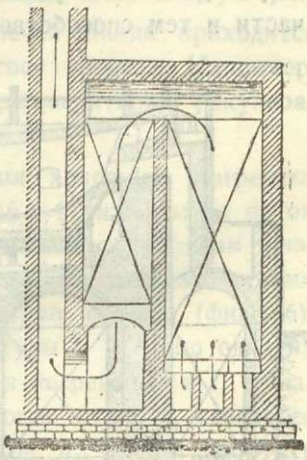
Например, на фиг. 48 представлен очень распространенный тип регенератора, в котором фонтан печных газов из вертикальных каналов прямо бьет в решетку регенератора. Очевидно о равномерной работе решетки в этом случае нечего и думать.

[1]) Холодный же воздух и газ равномерно поднимаются, делясь на восстающие равные струи.

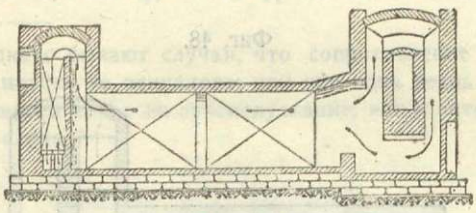
Равномерно решетка может работать только тогда, когда скорость печных газов в свободном пространстве под сводом регенератора будет нуль или близка к нулю. Вихревые движения в подсводовом пространстве регенератора есть сильнейший враг равномерности работы регенераторов. В интересах правильной работы регенераторов необходимо дать печным газам возможность успокоиться в шлаковиках и затем с небольшой скоростью вступить в подсводовое пространство регенераторов. Прекрас-



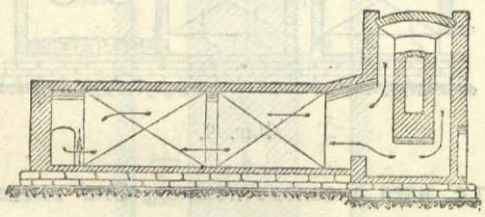
Фиг. 50.



Фиг. 51.



Фиг. 52.



Фиг. 53.

чый тип регенераторов мы имеем (фиг. 49) в 40-тонной мартеновской печи Pensylvania Steel C°.

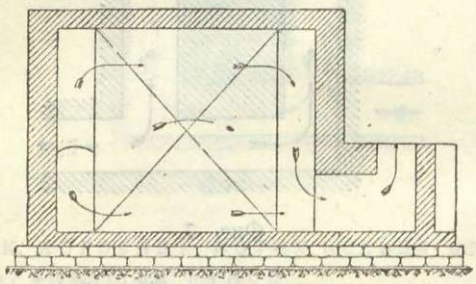
Время от времени появляются печи, где вертикальным регенераторам придается конструкция, нарушающая основной принцип движения остывающих печных газов вниз, а воздуха вверх. Примеры такой ошибочной конструкции мы видим на фиг. 50 и 51.

В обоих этих случаях печным газам придано переменное направление: на фиг. 50—сверху вниз (правильное) и снизу вверх (неправильное), и на фиг. 51—снизу вверх (неправильное) и сверху вниз (правильное).

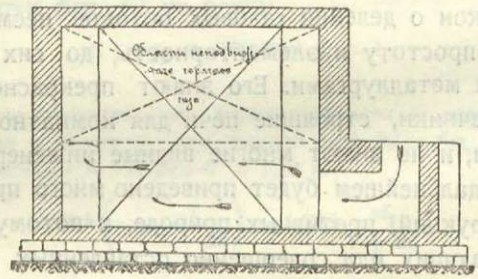
Лежачие регенераторы.

Лежачие регенераторы пользуются дурной славой и немудрено, ибо в них чаще, чем когда-либо, делаются грубейшие ошибки при делении потоков. Возьмем, например, регенераторы прославленной печи H. H. Campbell, которые не могут хорошо работать (Фиг. 52).

Действительно, в регенератор сверху поступают горячие газы и сверху же отводятся; ясно, что по полости регенератора они будут течь, как газослив и будут иметь высоту газослива, не коснувшись пода регенератора.



Фиг. 54.



Фиг. 55.

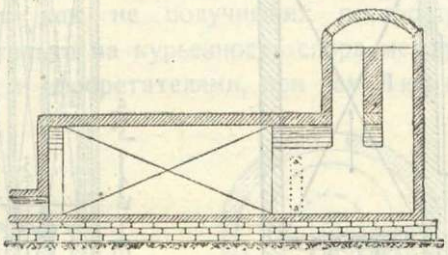
Нет ничего легче, как исправить эти регенераторы и заставить их работать правильно; на фиг. 53 показано такое исправление; надо пустить горячие печные газы сверху и выпустить их снизу, рассчитав h, высоту канала, ведущего к перекидным клапанам, по формуле И. Г. Есьмана [1]), что обеспечит касание нижнего зеркала потока—пода регенератора.

В чертеже, сделанном покойным Р. М. Даленом оказалась ошибочная конструкция (фиг. 54 и 55). Здесь печные газы приводятся в газовый регенератор не сверху, а в половине высоты. Такой газовый регенератор прогревается хорошо (фиг. 54); работает же неудовлетворительно, ибо нагревшийся легкий газ не может спуститься в выходной канал и вся верхняя часть регенератора совсем не работает (фиг. 55). это—мешок, заполненный горячим неподвижным газом.

[1]) См. стр. 27.

На фиг. 56 показана правильная конструкция лежачего регенератора. Показанная пунктиром стенка *аа* должна быть выкинута, как бесполезная.

Очень хороша конструкция, изображенная на фиг. 49. Это, собственно, не лежачие, а вертикальные регенераторы, но поставленные рядом. Движению газов в них придано правильное направление. Недостаток этих регенераторов—значительное сопротивление проходу газов.

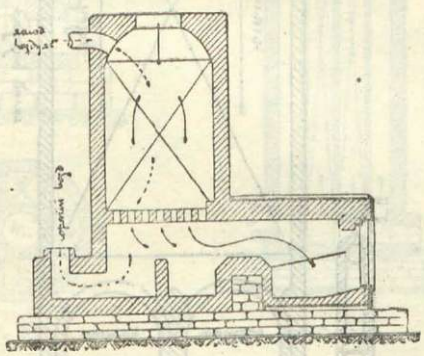


Фиг. 56.

Я не касаюсь регенераторов с перегородками вместо насадки, устроенных по типу воздухонагревателя Витвеля. О них будет сказано при разборе недостатков этого аппарата.

Регенеративные воздухонагреватели.

Принцип регенерации Сименса был применен для нагрева воздуха для домен в 1860 г. Каупером. Однако, сначала аппараты эти успеха не имели. В металлургии Перси-Веддинга сохранился чертеж этих первых регенеративных приборов (фиг. 57). Приборы отоплялись каменным углем, доменный газ был применен позже; продукты горения направлялись прямо вверх и уходили через



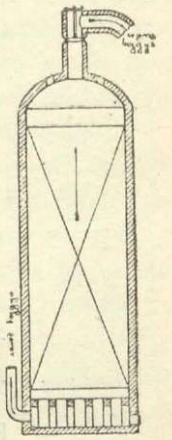
Фиг. 57.

клапан в своде в атмосферу. Холодный воздух входил в аппарат сверху и выводился из аппарата снизу.

Из этого описания видно, что направление газов в этом приборе было дано неправильное.

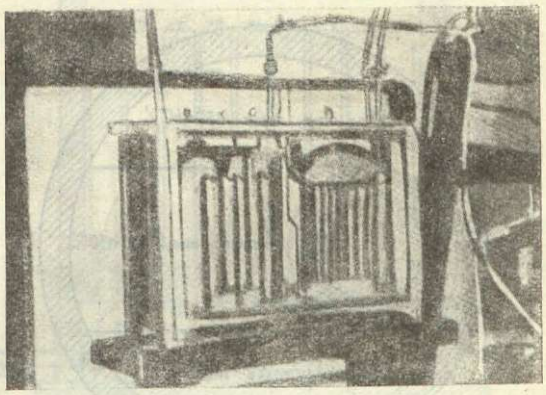
Каупер заметил свою ошибку и в следующем видоизменении своих аппаратов дал направление газам совершенно правильное. Пламя по центральной или эксцентричной трубе подводилось к куполу и обращалось вниз, разделяясь на множество равномерных струй; собиралось под решеткой и удалялось через дымовой клапан. Холодный воздух входил в аппарат снизу, делился на восходящие струи и удалялся из-под купола вниз по сожигательной камере. В таком виде этот аппарат остается и до сих пор. Едва ли какой другой прибор подвергался большим переделкам, однако все эти модификации не получают распространения, ибо они почти всегда основаны на ложном понимании законов деления пламенных потоков.

Единственным слабым местом аппарата Каупера является его сожигательная камера, в виде трубы, занимающей очень много места и дурно исполняющей свое назначение сожигательной камеры. Поэтому попытки улучшить этот аппарат должны быть направлены в сторону упразднения трубы; сожигательной камерой должно быть подкупольное пространство.



Фиг. 58.

Подобное устройство, но плохо разработанное, представляет патент Moor'a — фиг. 58. Первое видоизменение прибора Каупера было сделано Витвелем. Фотография фиг. 59 демонстрирует недостаток этих аппаратов. Здесь одно-



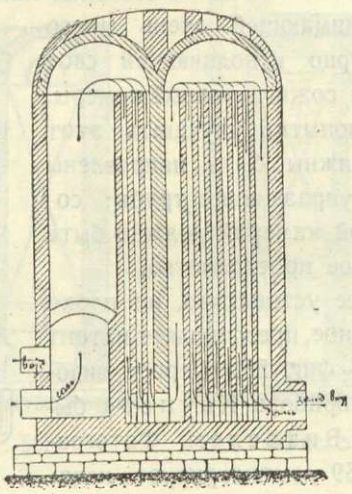
Фиг. 59.

временно в аквариуме с водой сняты модели: налево аппарата Витвеля, направо — Каупера в период нагревания.

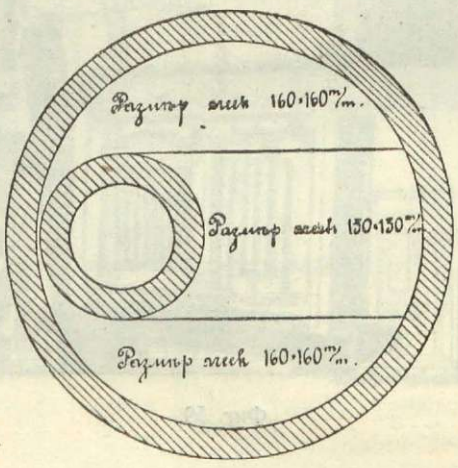
Совершенно ровная поверхность керосина, опускающегося в модели аппарата Каупера, указывает на совершенно равномерную работу решетки этого прибора. Напротив того, в аппарате Витвеля полости выполнены керосином далеко не одинаково. Те полости, в которых керосин опускается, выполнены прекрасно, те же полости, в которых керосин направлен кверху, невыполнены им: керосин струйками поднимается кверху, почти не омывая стенок воздухонагревателя. Прибор плохо

греется. Так же плохо он греет и воздух. Если в низ модели пустить воду, изображающую холодный воздух, то мы увидим, что полости, по которым вода поднимается кверху, прекрасно водой выполнятся, по полостям же, где холодный воздух спускается, он падает струями вниз, очень плохо омывая стенки.

Одного взгляда на эти модели достаточно, чтобы понять, почему аппараты Витвеля везде оставлены [1]). Идеи Витвеля нашли себе осуществление в столь нашумевших приборах Массика и Круга, которые отличаются только распо-



Фиг. 60

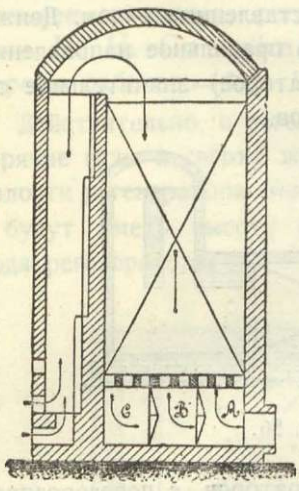


Фиг. 61.

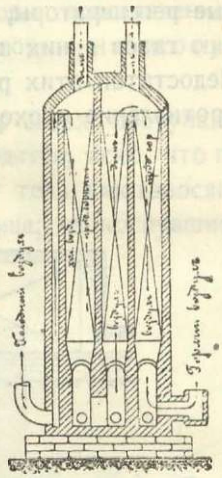
ложением камер, в которых газы имеют переменное направление. Теперь и эти приборы везде, оставлены по понятной причине.

Когда регенеративная решетка одержала верх, то многие изобретатели старались обеспечить равномерность ее работы, не подозревая, что равномерное опускание горячих газов лежит в природе этих газов.

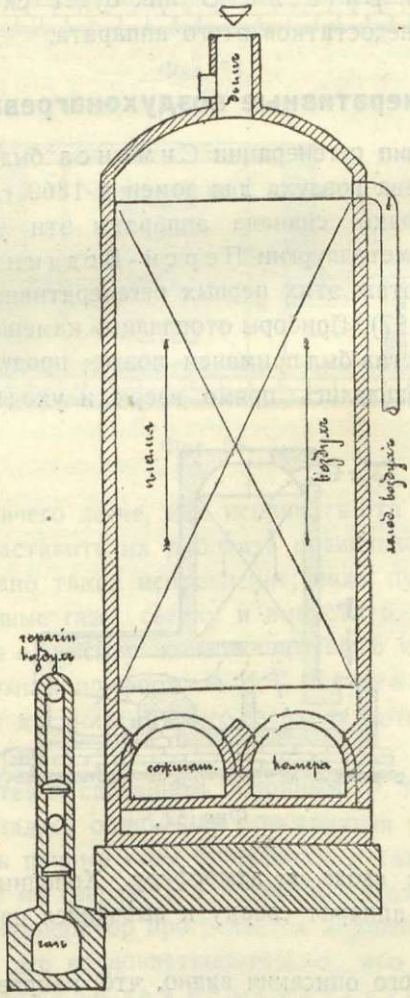
Одно время имел большой успех патент Беккера (фиг. 61), который делал ячейки решетки



Фиг. 62.



Фиг. 63.



Фиг. 64.

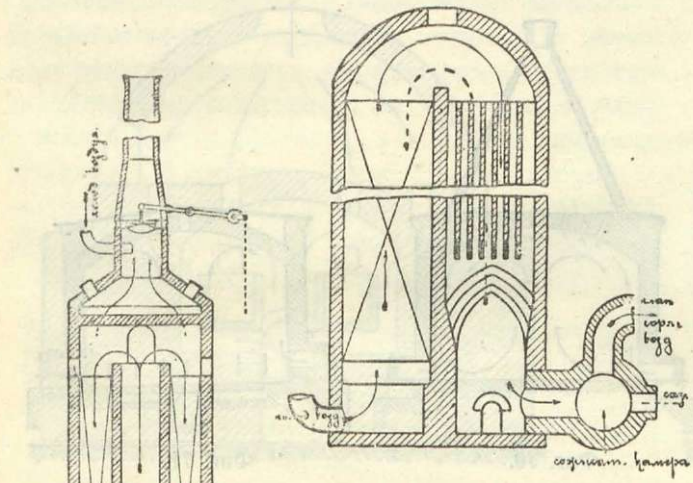
различной величины, чем очевидно заставил свой прибор работать менее равномерно [1]), чем обыкно-

[1]) Витвель сам заметил недостаток этого прибора и в последних видоизменениях его (фиг. 60) дал газам правильное направление сверху вниз, приблизив по типу эти аппараты к регенераторам (фиг. 49) мартеновской печи Pensylvania Steel C°.

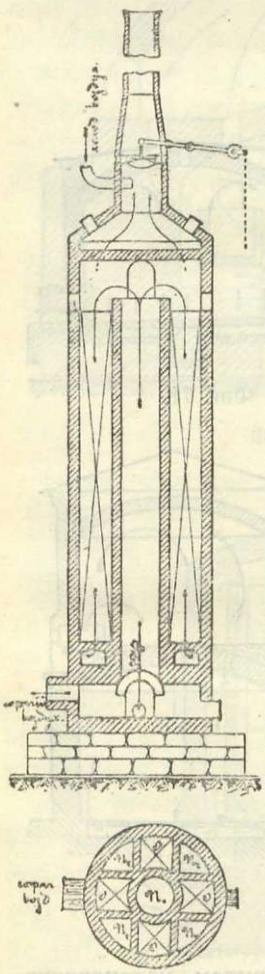
[1]) Он ослабил трение в широких ячейках и получил потому боле горячий дым, чем в узких ячейках.

венный каупер. На модели (фиг. 59) аппарата Каупера я нарочно сделал каналы, изображающие разрез решетки разной ширины, чтобы показать, что такое усложнение прибора совершенно бесцельно.

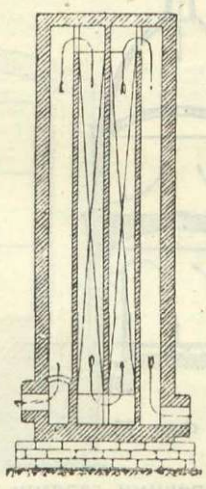
Я не останавливаюсь на патентах J. L. Stefenson & J. Evans (фиг. 62), на сложные перегородки и двери под решеткой аппарата для достижения правильного распределения пламени в решетке, как не получивших распространения, укажу только на курьезность спора между Люрманом и изобретателями, при чем Люрман ду-



Фиг. 66.



Фиг. 65.



Фиг. 67.

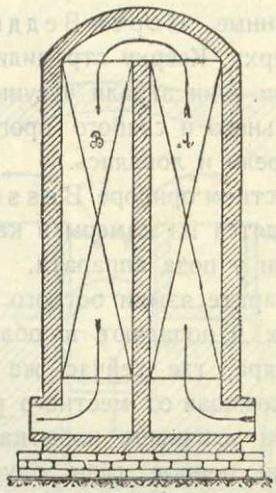
мает, что наибольшее количество дыма идет через A, а наименьшее через C. Изобретатели утверждали противное. Вот насколько хаотичны понятия даже современных знаменитых конструкторов. Спор этот очевидно решается к удовольствию обеих сторон: в аппарате Каупера работа решетки совершенно равномерна и всякие двери под решеткой излишни.

Воздухонагревателей с неправильным направлением газов очень много. Привожу эскизы воздухонагревателя Hugh Kennedy (фиг. 63), Harvey (фиг. 64), Frank Roberts (фиг. 65), Havtan'a (фиг. 66), Macco (фиг. 67) с целью подтвердить свою мысль, что ясное представление о законах деления потоков не проникло в понятия современных металлургов.

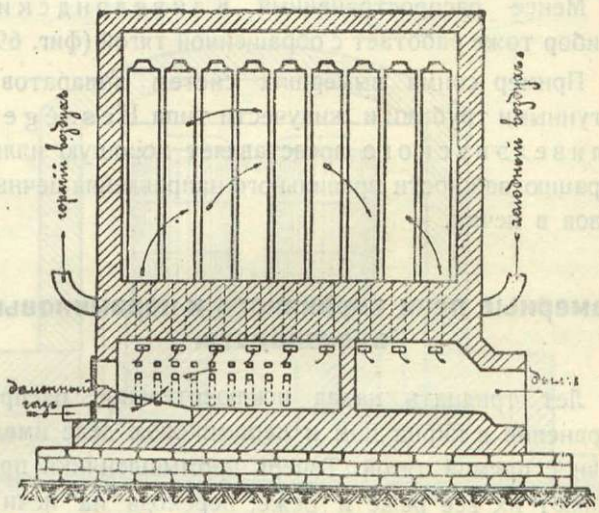
Уравнители температуры дутья.

. Нетрудно доказать, что построить разумный уравнитель температуры дутья есть задача неосуществимая.

На фиг. 68 имеем схему употребляемых уравнителей. Допустим, что температура дутья выше



Фиг. 68.



Фиг. 96.

температуры насадки. Тогда половина A, где горячие газы поднимаются, будет работать неравномерно, половина B прогреется равномерно. Половина A прогреется плохо; B—хорошо.

Температура дутья понизилась и стала ниже температуры насадки. Равномерно и быстро стынуть начнет половина A, половина B будет стынуть неравномерно и медленно.

Таким образом хорошей работы от уравнителя ждать не приходится, — вот причина, почему они мало распространены

Воздухонагреватели с чугунными трубами.

Было время, когда о воздухонагревателях с чугунными трубами существовала целая литература. В металлургии чугуна Перси-Веддинга описывается 12 типов этих приборов; в ней посвящаются десятки страниц устройству чугунных труб и причинам их порчи. В конце-концов из всех этих многих типов приборов остался тип завода Bessège и Кливелэндский прибор; все остальные были брошены.

Где же причина этого? Причина проста: все приборы, описанные Перси-Веддингом имели отвод дыма сверху. Кверху стремились все языки острого пламени. Они лизали чугунные трубы, давали места сильного и слабого прогрева, а трубы коробились, горели и лопались.

В общеизвестном приборе Bessège продукты горения переводятся из камеры в камеру окнами, расположенными у пода аппарата.

В этом аппарате языки острого пламени поднимаются вверх и попадают в область неподвижного жара, где сейчас же теряется их острота, происходящая от местного развития реакции горения под влиянием избытка воздуха. По мере остывания печные газы опускаются вниз, равномерно обогревая все трубы, отчего эти последние хорошо служат.

Менее распространенный Кливелэндский прибор тоже работает с обращенной тягой (фиг. 69).

Пример сонма вымерших систем аппаратов с чугунными трубами и живучести типа Bessège и Кливелэндского представляет хорошую иллюстрацию важности правильного направления печных газов в печах.

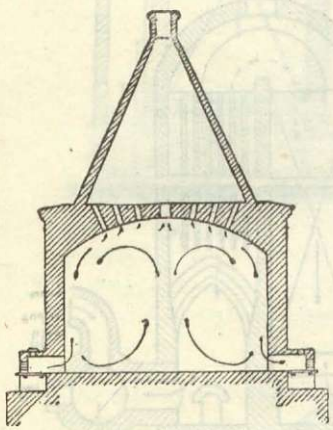
Камерные печи кирпичного и керамиковых производств.

Лет тридцать назад исключительное распространение в кирпичном и керамиковом деле имели печи с прямой тягой. Теперь промышленники применяют их все реже и реже, переходя на печи с обращенной тягой и печь с прямой тягой является пережитком старого.

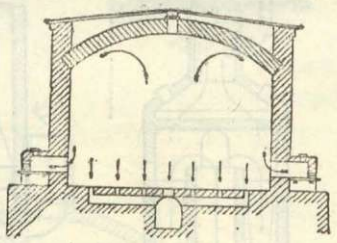
Тем удивительнее, что издание[1]) фирмы Эрнст Шматолла, специально строящей печи для керамикового производства, описывает целый ряд этих печей, вскользь упоминая только о том, что печи с обращенной тягой дают, в общем почему-то лучшие результаты, чем печи с прямой тягой.

В главе I (часть II), на стр. 17, я дал правило для расчета этих печей Суживая дымовое отверстие, можно добиться того, что нижнее зеркало пламени, выполняющего полость печи, касается пода печи и этим путем можно заставить пламя нагреть и предметы, непосредственно лежащие на поду камеры; однако, такое прогревание очень несовершенно и неравномерно. Механизм такого прогревания состоит в следующем.

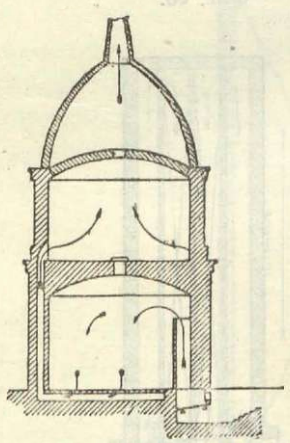
Раскаленные топочные газы из топки прямо поднимаются кверху (фиг. 70) так, что середина печи остается вне прямого восходящего потока топочных газов, а потому заполнена тяжелыми газами более низкой температуры. Эти тяжелые газы начинают падать на под камеры и замещаются горячими газами; таким путем устанавливается циркуляция пламени в камере и расположенные в печи предметы постепенно нагреваются. Однако так циркулирует только часть пламени. Большая часть вылетает через отверстие в своде прямо в трубу. Поэтому все предметы, встреченные прямым потоком топочных газов, будут обожжены сильно, все же предметы, омытые циркуляционным потоком низкой температуры, будут обожжены слабо.



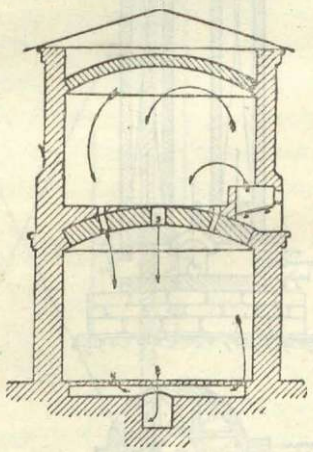
Фиг. 70.



Фиг. 71.



Фиг. 72.

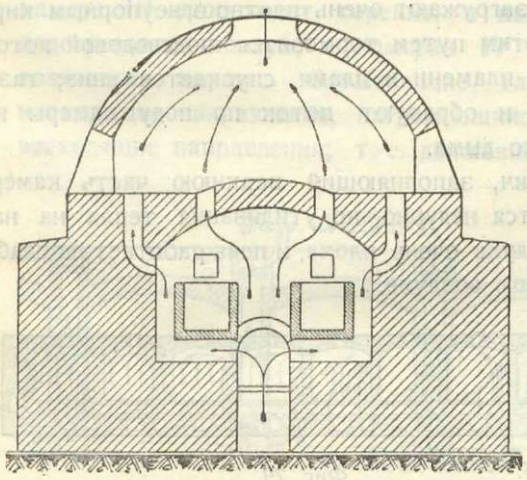


Фиг. 73.

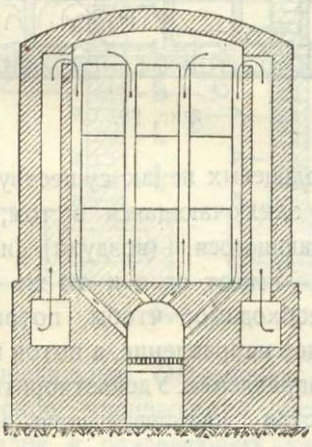
Хотя до сих пор во многих заводах еще работают печи с прямой тягой, но, в общем, принцип обратной тяги известен довольно широко, а потому очень долго на этом останавливаться не стоит.

[1]) Die Brennöfen—Ernst Schmatolla, 1923

На фиг. 71 изображена та же печь, перестроенная на обращенную тягу. Деление потока пламени здесь совершенно правильно, ибо поднявшееся к своду печи пламя равномерно делится на нисходящий струи. Результатом перестройки явилось уменьшение брака кирпича с 30% до 1%. Фиг. 72 представляет этажную печь фарфорового производства старого типа. Такие печи еще существуют в работе, верхняя печь работает очень неудовлетворительно, ибо пламя делится здесь на восходящие струи и равномерность распределения его почти невозможно урегулировать размером пламенных



Фиг. 74.



Фиг. 76.

отверстий. Нижняя часть печи с обращенной тягой работает равномерно.

Фиг. 73 представляет печь того же типа, построенную правильно. Как верхняя, так и нижняя печи работают с обращенной тягой. Топки перенесены во второй этаж.

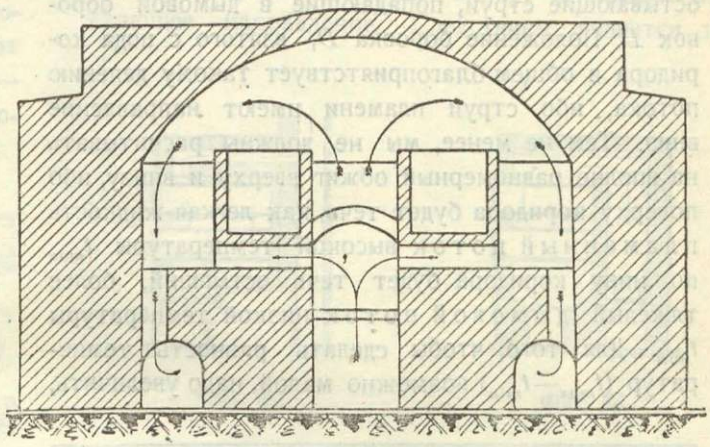
Цементационные печи.

На фиг. 74 представлена старая цементационная печь из курса Ледебура. Пламя из топки сразу делится на восходящие струи, охватывающие ящики с цементируемым железом, пересыпанным углем.

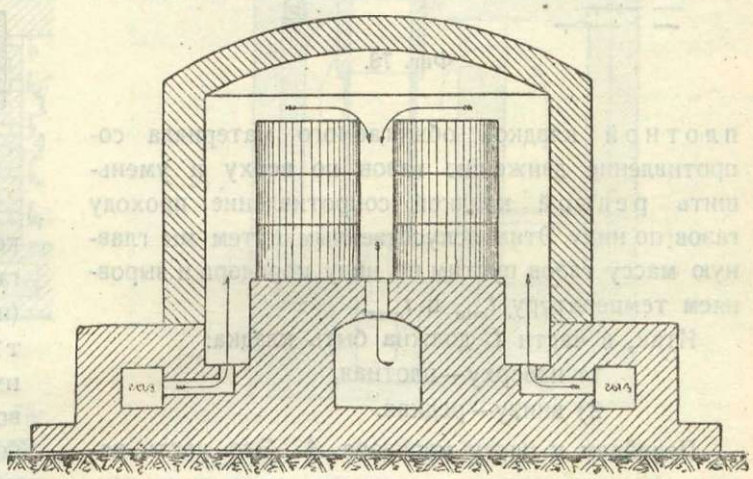
Правильно было бы эти старые печи перестроить на печи с обращенным пламенем, как показано на фиг. 75.

Печи для приготовления ковкого чугуна.

На фиг. 76 представлена старая печь из металлургии Ледебура, на фиг. 77 патент P. Schnie 1898 г на подобную же печь, но с обращенной тягой.



Фиг. 75.



Фиг. 77.

Очевидно, жизнь, а не теория научила изобретателя применить к этой системе печей обращенную тягу.

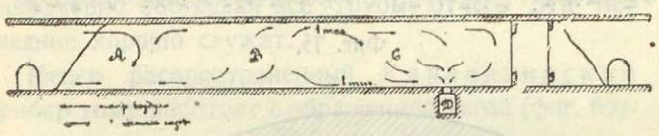
Кольцевые печи.

Несмотря на кажущиеся совершенство конструкции кольцевых печей, они всегда работают недостаточно удовлетворительно. Недостатки их: резкость остывания обожженных продуктов и масса брака из-за трещин; громадный избыток воздуха в пламени и вызываемая этим острота

пламени; высокая температура дыма; избыток расхода топлива; все это — результаты нарушения законов деления потока пламени в этих печах.

Чтобы быть ясным, возьмем простейший случай (фиг. 78): часть коридора A — где подогревается воздух; B — где бросается топливо и материал обжигается; C—где материал подогревается теряющимся жаром; D – боров дымовой трубы; F—заклеенная бумагой стенка.

Начнем наши рассуждения с части коридора B. Здесь развивается пламя. Наш идеал заключается в том, чтобы это пламя двигалось по всему сечению коридора, делясь на равныя, равномерно остывающие струи, попадающие в дымовой боровок D. Положение боровка D, взятого с пода коридора в общем благоприятствует такому делению потока, ибо струи пламени имеют направление вниз. Тем не менее, мы не должны расчитывать на вполне равномерный обжиг вверху и внизу, ибо поверху коридора будет течь, как легкая жидкость пламенный поток высокой температуры t_{max} по низу коридора будет течь остывший, более тяжелый дымовой поток низкой температуры t_{min}. Для того, чтобы сделать разность температур $(t_{max}-t_{min})$ возможно малой, надо увеличить,



Фиг. 78.

плотной кладкой обжигаемого материала сопротивление движению газов по верху и уменьшить редкой кладкой сопротивление проходу газов по низу. Этим искусственным путем мы главную массу газов пустим по низу коридора и выровняем температуру t_{min} и t_{max}.

Итак, в части C должна быть кладка:

1) наверху—плотная,
2) внизу—редкая.

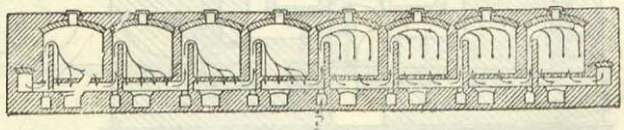
Перейдем к части коридора A. Эта часть заполнена раскаленным материалом, по поду ее движется подогреваемый воздух, как тяжелая жидкость, не имеющая никакого стремления подняться кверху. Заставить ее подняться кверху можно, только увеличив сопротивление плотной кладкой внизу и редкой кладкой вверху.

Сравним это требование с тем, что мы имели для части C. Мы получили, как раз обратное части C.

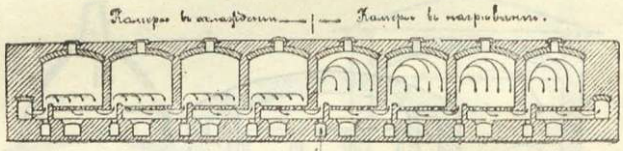
Правда, усадка обожженного кирпича, особенно обожженной извести, облегчает наше положение, т. к. образует в части A просвет под сводом (в известковых печах даже очень значительный), но в общем в кольцевых печах мы находимся в очень трудном положении; у нас два выхода: 1) хорошо подогревать сырец, но зато работать на плохо подогретом воздухе и подвергать кирпич резкому остуживанию внизу, отчего он трескается, или 2) хорошо подогревать воздух, предохранить материал от резкого остуживания, но зато неравномерно подогревать сырец. Обыкновенно останавливаются на первом методе работы.

Например, при обжиге огнеупорного кирпича, на заводе в Боровичах, низ кольцевой печи нагружается «варюшками» для шамота, резкое остуживание которых не вредит их качеству. Укладывая возможно редко варюшки у пода, верх камеры загружают очень плотно огнеупорным кирпичем; этим путем тормозится подсводовой поток горячего пламени и пламя спускается вниз; газы стынуть и образуют поток по поду камеры из холодного дыма.

Кирпич, заполняющий верхнюю часть камер, обжигается недурно, но утилизация тепла на нагрев воздуха очень плоха, и печь работает на слабо подогретом воздухе.



Фиг. 79.



Фиг. 80.

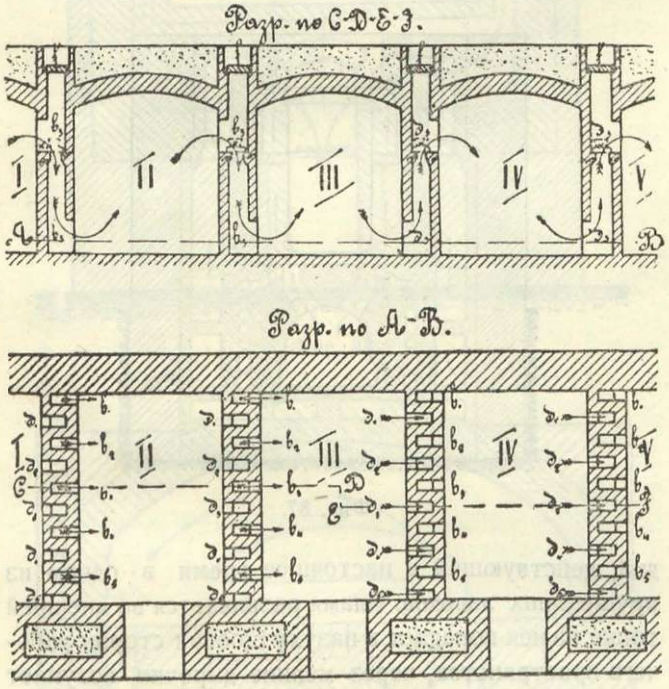
Итак, в кольцевых печах существует ошибка в конструкции, заключающаяся в том, что потоки газа, — нагревающегося (воздуха) и стынущего (печные газы),—имеют одно и то же направление, тогда как необходимо, чтобы поток стынущий имел нисходящее направление, а поток греющийся — восходящее направление. Удовлетворить этому требованию простая кольцевая печь не может и потому работа ее всегда недостаточно совершенна.

Существующие системы камерных кольцевых печей Мендгейма и других столь же мало удовлетворительны, как и простые кольцевые печи.

На фиг. 79 и 80 показаны два типа печей Мендгейма – с поднятым порогом и без него. Наружный воздух входит в печь через выгруженную камеру и проходит поочередно все камеры, находящиеся в охлаждении. Протекание воздуха показано стрелками; холодный воздух стелется по поду, неравномерно и резко студит обжигаемый кирпич, сам плохо нагревается и очень плохо студит камеру. Под влиянием моих работ в области теории печей, наш инж. К. К. Адамецкий

(Варшава) взял привилегию на усовершенствование кольцевых печей введением дополнительных каналов, соединяющих нижнюю часть каждой камеры с верхнею частью предыдущей или последующей камеры или же одновременно с обеими. Этим путем ему удалось осуществить принцип нисходящего потока для пламени и восходящего потока для воздуха, но конструкция вышла несколько сложная, что побудило меня подумать об ее упрощении и выработать простой конструктивный тип рациональной кольцевой печи.

Фиг. 81 представляет эскиз этой печи. Здесь в камере III происходит горение; в камере I и II подогревается воздух; в камерах IV и V подготовляется кирпич. Остывающие газы имеют нисходящие направления, нагревающийся воздух— восходящие направления; т.-е. движение газов со-



Фиг. 81.

вершенно правильное. Обращение направления газовых потоков производится системой чередующихся каналов в разделяющих камеры стенах,— каналов b_1b_1, b_2b_2, b_3b_3 для воздуха и d_1d_1, d_2d_2, d_3d_3 для печных газов. При пуске в камеру газа (например в IV) каналы dd должны быть закрыты, а bb должны быть открыты.

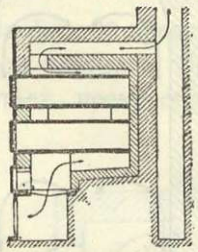
Прикрытие и открытие каналов bb и dd делается крайне просто кирпичами, показанными пунктиром.

На фиг. 81 изображена печь в первоначальном виде. Впоследствии оказалось, что прикрывать каналы не нужно (Подробнее см. часть IV, гл. V).

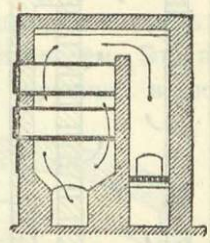
Муфельные печи.

Для отжига и закалки стали, латуни и других потребностей, муфельные печи представляют очень много удобств. Ровная температура, отсутствие языков пламени, малая окисляемость и абсолютная чистота поверхности (условие крайне важное для штамповки) делает эти печи излюбленным типом заводов. Часто жалуются на непрочность муфелей, однако при правильном направлении пламени стальные литые муфеля и даже чугунные работают годами. К сожалению, идея правильного направления пламени далеко не пользуется распространением.

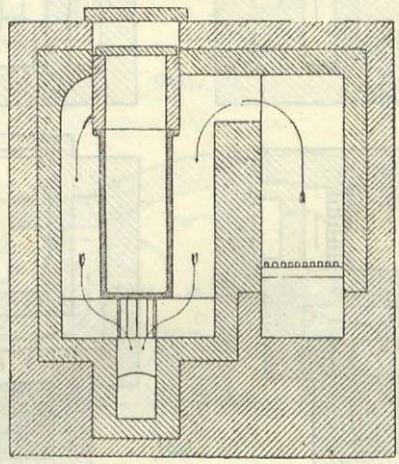
На фиг. 82 представлэна муфельная печь, весьма распространенная на заводах. Пламя развивается в топке, расположенной внизу, и имеет восстающее направление. Следствием является не-



Фиг. 82.



Фиг. 83.



Фиг. 84.

равномерное нагревание муфелей, а потому и скорая их порча.

На фиг. 83 показан способ заставить печь эту работать вполне равномерно. Для этого пламя обращено вниз. Дымовой боровок собирает отработавшие печные газы с пода печной камеры, в которой вмазаны муфеля.

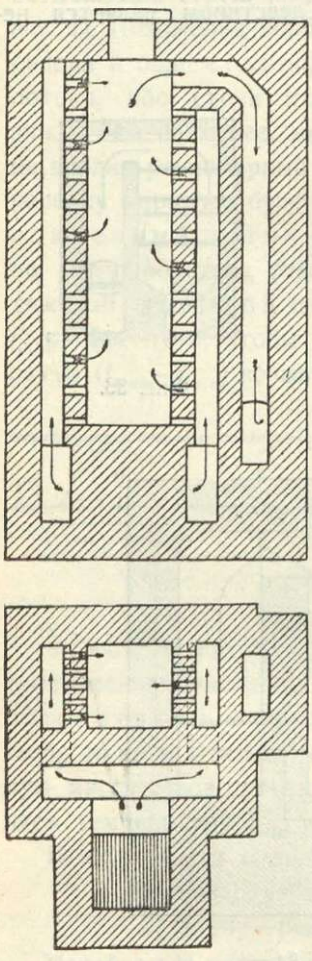
Благодаря неправильному направлению пламени, вертикальные муфеля для закаливания снарядов удаются весьма редко; однако мой опыт указал что такой скептицизм не имеет места, если пламени придано правильное направление. Муфель, изображенный на фиг. 84, работает идеально.

Вертикальные печи для закалки, отжига и отпуска.

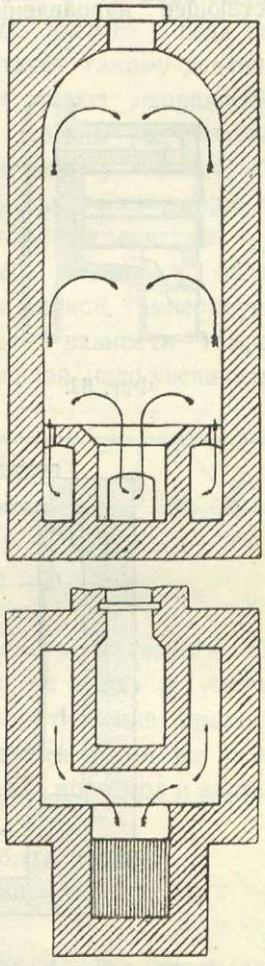
Нигде применение идеи обращенного пламени не может дать таких блестящих результатов, как в этих печах и нигде мы не наблюдаем таких несовершенных печей, как именно в печах закалочных.

Причина этому простая. «Закалочная» — это секрет всякого завода. Но мне кажется, что люди, делающие секреты, знают всегда меньше людей, их не делающих.

Тем не менее, печи для закалки и отжига, имеющие температуру в пределах 800—1000°С, существуют и—худо ли, хорошо ли—но работают. Что касается печей для отпуска, то их нет и дело отпуска поставлено еще хуже, чем дело закалки.



Фиг. 85.



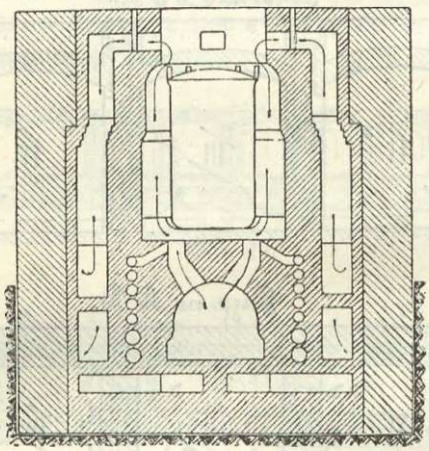
Фиг. 86.

Для печей для отпуска нужна температура ниже 700°, т.-е. температура, при которой реакция горения не идет, а потому печные газы надо получить вне печи, в особой сожигательной камере остудить до требуемой температуры, провести в рабочее пространство печи и нагреть его равномерно до температуры 400—500—600°, как требуется.

Закалочные печи для крупных орудий делаются в виде колодца, на различных горизонтах коего установлены топки; дым отводится сверху. Орудие при этом вращается. Так нагревают орудия и в СССР и за границей, при чем у нас нагрев ведется на дровах, что гораздо лучше, чем работать на каменном угле. В последнее время закалочные печи для орудий строятся газовые, с очень большим числом горелок, расположенных по винтовой линии.

В этих печах делается две ошибки: 1) пламя горелок, имеющее высокую температуру, вводится в закалочное пространство; 2) дым отводится сверху.

Нагрев больших орудий до 700″ длины представляет при этой системе много трудностей и, конечно, для закалки таких орудий надо применить идею обращенного пламени. Чтобы иллюстрировать, в каком направлении надо это сделать, привожу на фиг. 85 чертеж печи для закалки полевых орудий, действующей в настоящее время в одном из крупнейших заводов. Пламя развивается во внешней топке, из нея попадает в пазуху с обеих сторон рабочего пространства, через мелкие дырочки вступает в него и отводится сверху. Последний отвод сверху и портит всю печь. Сделай автор этой печи отвод печных газов с пода печи, печь работала бы гораздо равномернее.



Фиг. 87.

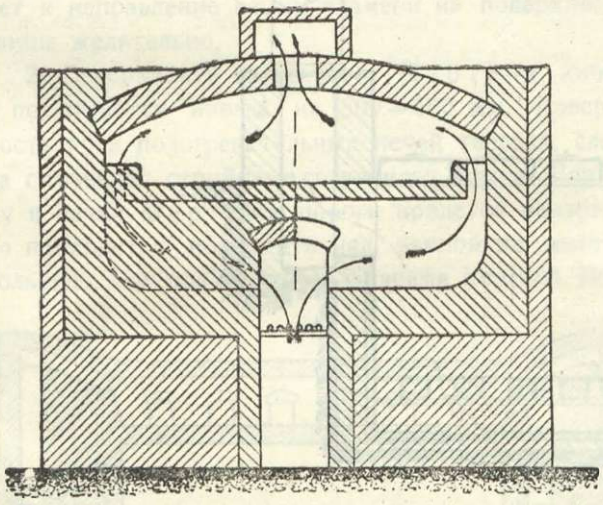
Еще проще придать печи абрис фиг. 86. Здесь пламя из внешней топки прямо проводится в расширенное рабочее пространство печи и отводится с пода печи. Движение газов указано стрелками.

Конечно, такая система применима только для полевых орудий. Колодец в 9 сажен глубины, для морских гигантов, нельзя отапливать таким простым способом, но в общем эта задача решается очень легко, если уничтожить лучеиспускание рабочего пространства

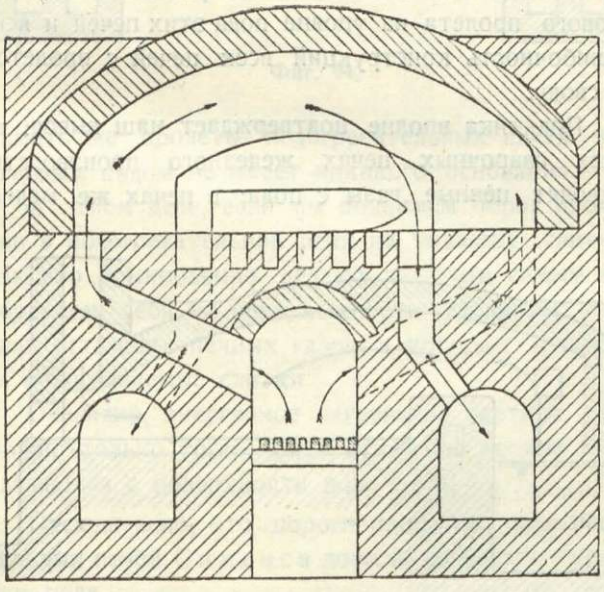
К типу вертикальных отжигательных печей относятся печи для отжига проволоки перед и во время волочения. В моем распоряжении находится

чертеж такой печи системы Мейля, построенной одним из русских заводов и оказавшейся, несмотря на свою сложность и дороговизну, крайне неудовлетворительной. Печь отжигала неравномерно и впоследствии была перестроена. На фиг. 87 ясна причина столь печальных результатов работы этой печи: пламени дано возстающее направление, почему чугунный горшок, вводимый в камеру, греется неравномерно. Кроме того, узость камеры препятствует правильному развитию пламени.

Ясно, что печь должна быть перестроена на печь с обращенной тягой и сожигательной камерой.



Фиг. 88.



Фиг. 89.

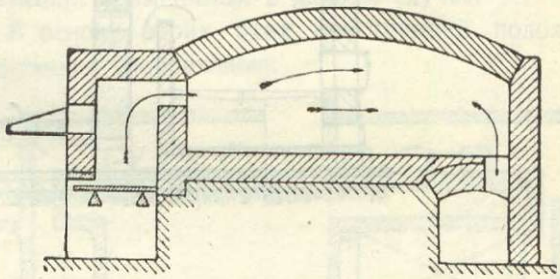
Горизонтальные закалочные печи.

На фиг. 88 изображена закалочная печь для снарядов завода Круппа. Завод Круппа держится системы нагревания предметов теплом, «отраженным» от свода. Ниже мы увидим, к каким курьезным конструкциям приводит эта теория. В этой печи снаряды, перекатываемые по поду, нагреваются тоже «отраженным» теплом, ибо раскаленные газы коксовой топки проходят под сводом в отверстия в ключе свода; раскаленными же газами снаряды не омываются, а находятся как бы в мешке среди остывших неподвижных газов.

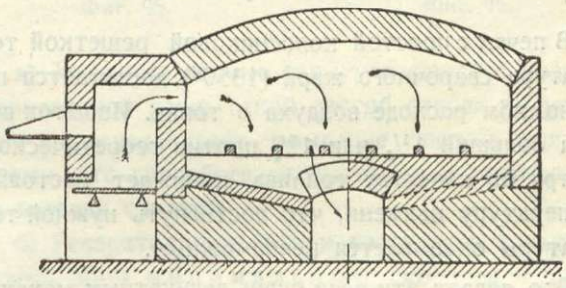
Работа этой печи была мало удовлетворительна. Кроме того, было желательно кокс заменить дровами, как более дешевым топливом. Печь эту перестроили согласно моему чертежу (фиг. 89). Оставив общее расположение печи тем же, я обратил пламя вниз и, расположив снаряды на решетчатом поду, озаботился удалением из-под снарядов остывших печных газов в дымовые пролеты. Печь работает прекрасно.

Печи для отжига котельных листов.

На фиг. 90 представлена общепринятая печь для отжига листов с обращенным пламенем. Эта печь работает прекрасно, но имеет крупный недостаток: отжиг идет по одному листу, занимающему весь под, и потому производительность печи мала и расход каменного угля велик. Если в этой печи нагревать несколько листов, положенных друг на друга, то они прогреваются чрезвычайно плохо, ибо холодные, отработавшие печные газы не имеют возможности покинуть рабочее пространство печи. Рабочее пространство не канализовано. Для быстрого нагрева рабочее пространство надо освобождать от стылых газов, для чего полезно придать печи конструкцию фиг. 91. Листы передвигаются по железным или чугунным колосникам или брусьям. Боровок расположен под срединой пода и холодные газы из-под нагреваемых листов попадают в боровок и оттуда в дымовую трубу.



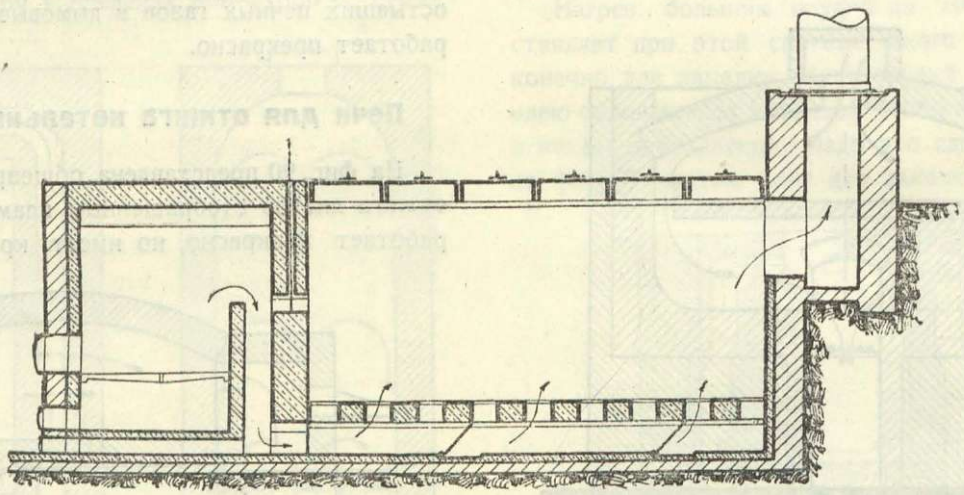
Фиг. 90.



Фиг. 91.

Чем энергичнее омывание листов снизу, тем скорее идет прогрев листов.

Инж. Рейнеру пришла идея отжигать листы в подвешенном состоянии и он конструировал печь фиг. 92. Эта печь не пошла и идея отжигать листы в подвешенном состоянии была оставлена. Не пошла эта печь потому, что пламени дано восстающее направление и отжиг был неравномерен. Если обратить пламя, сделать постоянный свод, то в нашем распоряжении остается боковая стенка для дверей и можно бы осуществить идею Рейнера достаточно конструктивно.



Фиг. 92.

Печи для нагрева слитков с обыкновенной колосниковой решеткой.

В печах с простой колосниковой решеткой температура сварочного жара (1350°) достигается при экономном расходе воздуха в топке. Избыток воздуха больший $1^1/_2$ или $1^3/_4$ против теоретического, смотря по качеству топлива, понижает настолько температуру пламени, что достигнуть нужной температуры оказывается невозможным.

Это делает эти печи очень деликатным механизмом и они удаются при соблюдении двух условий:

1. Хорошем смешении воздуха с горючими газами.

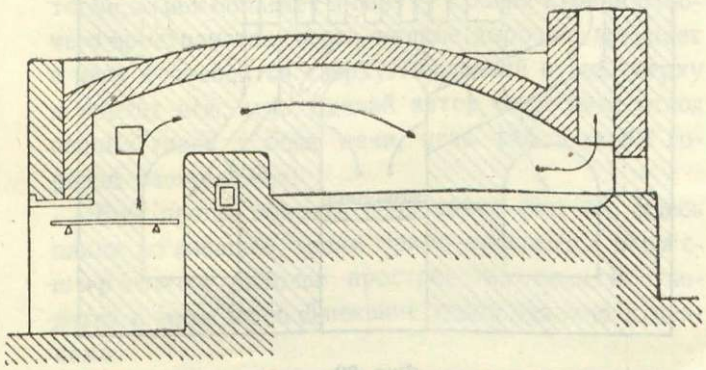
2. Пропорционировании печи так, чтобы фокус горения расположился в начале рабочего пространства печи. Кроме того, т. к. температура печи совпадает с расчетной температурой пламени, то время пребывания пламени в рабочем пространстве печи менее секунды, а потому питание рабочего пространства пламенем и удаление отработавших газов должны совершаться в строгом порядке.

Из сказанного очевидно, что пропорционирование этих печей есть прежде всего вопрос «горения» и только в последней своей части касается вопроса, нами обсуждаемого, о направлении пламенных потоков. Не рассматривая вторично (см. часть I) первые два вопроса, я ограничусь замечанием, что для лучшего смешения элементов пламени в этих печах часто прибегают к суживанию пламенного окна, все равно, как в керосиновой горелке суживают пламя и тем избегают копотливости лампы.

Единственным последствием сужения пламенного окна, является увеличение в нем скорости пламени; пламя затормаживается в рабочем пространстве понуростью свода этих печей и направляется им на под, с пода же убирается через дымовой пролет.

Отсюда ясна необходимость расположения дымового пролета на уровне пода этих печей и ясна ошибочность конструкций всех печей с пролетом в своду.

Практика вполне подтверждает наш вывод: во всех сварочных печах железного производства отводят печные газы с пода; в печах же медно-



Фиг. 93.

плавильных, свинцовых и проч., остались еще пережитки старых печей с отводом дыма со свода.

Фиг. 93—печь для очистки меди, отвод дыма сверху. В данном случае ванна находится в мешке остывших газов, что, конечно, понижает температуру печи.

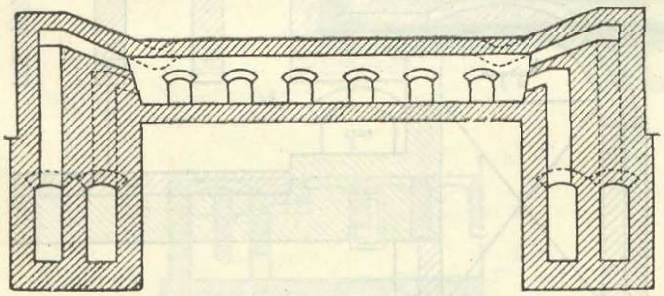
Нагревательные печи Сименса.

Печи Сименса симметричны и пролеты, питающие печь пламенем, служат также и для удаления продуктов горения. При постройке нагревательных и сварочных печей этой системы часто без всякой надобности копируют головки печей Мартена, не учитывая разницы в назначении печей.

Между тем разница весьма существенна и сводится к следующим положениям:

1. Температура нагрева слитков не выше 1300°, поэтому направление языка пламени на слитки не допустимо. В печах Мартена этого ограничения нет и направление языка пламени на поверхность ванны желательно.

2. Поверхность ванны печи Мартена кипит и поднимается иногда на 500—600 мм. Поверхность пода подогревательных печей твердая, слегка смоченная струйками сварочного шлака. Поэтому в печах Мартена пороги пролетов неизбежно приходится поднимать над ванной на высоту большую, чем под'ем ванны во время кипения. Под-



Фиг. 94.

нимать же пролеты подогревательных печей над твердым подом не имеет никакого основания.

В самом деле, если мы поднимем порог пролетов в подогревательной печи на толщину слитка, как это обыкновенно делают, то этим самым мы обрекаем себя на невозможность удалить с пода слой остывших печных газов, в которых купаются подогреваемые слитки.

Очевидно, энергичное нагревание слитков возможно только тогда, когда остывшие печные газы удаляются с поверхности пода печи.

Отсюда ясно, что пороги пролетов подогревательных печей Сименса должны совпадать с уровнем пода.

В моем распоряжении имеется весьма интересная печь Сименса фиг. 94. Длина ее пода 8020 мм, высота свода над подом 1000 мм, ширина 2000 мм, головки обыкновенного типа.

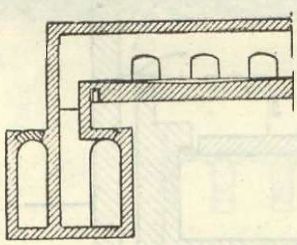
Первоначально свод был сделан прямым. Затем он был опущен у головок печи до 680 мм. Очевидно, при длине печи в 8020 мм хвост пламени отставал от пода и слитки у дымовых пролетов им не обогревались. Происходило то же явление, что и при очень длинных печах Мартена, когда за исчерпанием живой силы фонтанов горячих газа и воздуха, хвост пламени поднимается под свод до нормальной высоты газового потока, вычисляемой по формуле И. Есьмана; в углу у дымовых пролетов получается мешок остывших газов и ванна мерзнет. Такой случай наблюдался на нефтяных печах завода Гужона в Москве при длине печи в 14 м и вызвал постановку двух нефтяных форсунок, поставленных одна за другой.

В данном случае было поступлено иначе: у головок свод был опущен до высоты газослива и этим путем принудили пламя лизать под не только по выходе из пролетов печи, но и во всей второй половине печи.

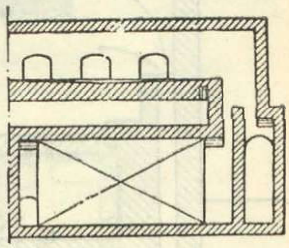
Отдавая полную дань уважения этому методу исправления недостатков общепринятого типа головок, я думаю, что можно достигнуть гораздо лучших результатов другим путем.

На фиг. 95 и 96 представлены два эскиза конструкций, применимых в данном случае.

В основу обоих этих конструкций положены следующие соображения:



Фиг. 95.



Фиг. 96.

а) Холодные печные газы удаляются с пода нагревательной печи; такой способ отвода их усиливает и упорядочивает омывание слитков горячими газами, что способствует быстрому и равномерному нагреву слитков.

б) Генераторному газу и воздуху, вступающим в печь, даны минимальные скорости, с целью получения горения во всей печи и устранения фокуса горения в языке пламени.

При подогретом воздухе и газе температура языка пламени может подняться выше 1500—1600°, что очень опасно для нагреваемых слитков.

Смешение генераторного газа и воздуха предположено вне рабочего пространства печи.

в) Для того, чтобы сварочный шлак не попадал в пролеты печи, поду дан уклон к средине печи, основание же пролетов энергично студится чугунными порогами с принудительной циркуляцией холодного воздуха, при помощи вытяжной трубы.

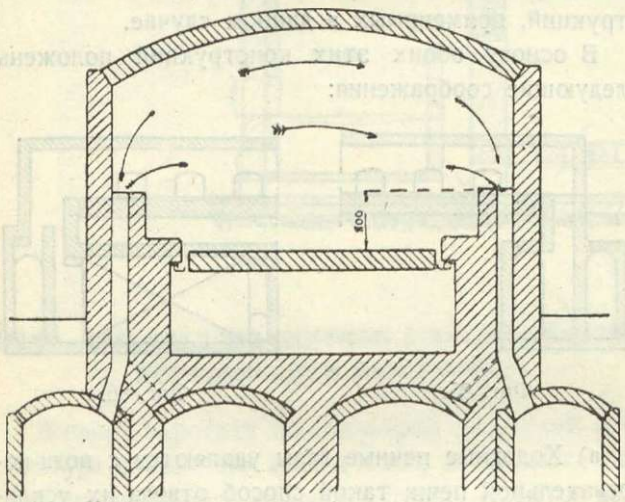
Интереснейший пример полного пренебрежения основными положениями рациональной конструкции печей представляют печи Сименса для цементации и закалки броневых плит завода Круппа,

характерного своею отсталостью в конструкциях печей.

На фиг. 97 мы видим, что вертикальные головки печи Сименса подняты на 800 мм над подом печи и хотя броня укладывается на выдвижной под на кирпичных столбиках, но тем не менее она помещена в мешок холодных газов, удалить которые из-под брони нет никакой возможности. Если прибавить к тому же, что на этих печах всегда работали с отрицательным давлением, то ясно, что нагревание вели в потоке засасываемого холодного воздуха.

Результаты такой работы ясны. При цементации предполагалось нагревать две броневых плиты, обращая их лицом друг к другу, с промежутком между ними древесного угля.

Оказалось, что нижняя плита цементовалась гораздо медленнее верхней и пришлось отказаться от идеи цементовать две брони сразу. Теперь це-



Фиг. 97.

ментуют по одной плите, занимая двойное количество печей и вдвое увеличивая расходы эксплоатации.

Однако гипноз фирмы Круппа так велик, что срезать головки до уровня пода заводы не решаются.

Колодцы с отоплением.

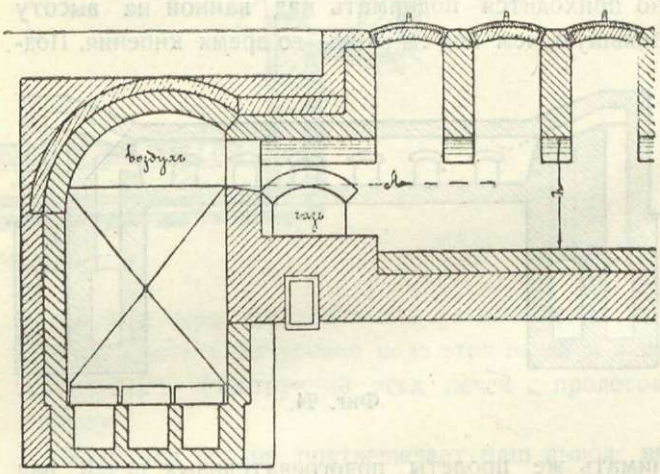
В колодцах, для нагревания слитков стоя, чаще всего делаются ошибки в отводе дыма. Здесь, благодаря большей высоте рабочего пространства, более, чем в какой-либо другой системе, надо озаботиться правильным удалением дыма с пода колодцев, ибо иначе нижние части слитков попадают в мешок застойных газов и плохо нагреваются.

Из имеющихся у меня конструкций вполне удовлетворительной нет ни одной, в некоторых же принцип правильного отвода дыма нарушен весьма грубо.

На фиг. 98 представлены пролеты колодцев «системы Сименса», чертежи коих оплачиваются очень дорого.

Колодцы эти имеют только воздушные регенераторы, газовых нет.

Таким образом продукты горения могут быть удалены из рабочего пространства только через воздушные регенераторы, которые взяты на 600 мм выше уровня пода колодцев (см. пунктирная линия *A*). Ясно, что на поду колодцев получился мешок холодных газов. Чтобы спасти печь и заставить ее работать, остается единственное средство понизить перегородки между колодцами так, чтобы высота h равнялась бы высоте газослива, вычисленной по формуле Есьмана. Так построенные колодцы будут работать, но в полости рабочего пространства скорость печных газов будет скоростью нормального газослива, т.-е. при высоте h около метра = 9 м/сек. Такая скорость



Фиг. 98.

крайне невыгодна, т. к. теплота пламени не успеет передаться слиткам и расход топлива будет очень велик. Лучшим исправлением печи будет, если мы опустим окно в воздушный регенератор на уровень пода колодцев.

На фиг. 99 представлены колодцы Сименса по проекту Р. Далена, построенные в Н.-Салдинском заводе. Пламя отводится сверху, почему низ слитков им плохо омывается. Действительно, во время работы этих колодцев низ слитков прогревался всегда хуже верха, что заставляло садить слитки толстым концом кверху, опирая их на стены. Для улучшения работы в печи следует опустить пламенное окно на уровень пода печи.

Так как колодцы Сименса представляют незаменимое по удобству устройство, то я приведу принципы правильного их конструирования.

1. В рабочем пространстве колодцев желательно слабое отрицательное давление, дабы при снимании крышек не обжигать рабочих.

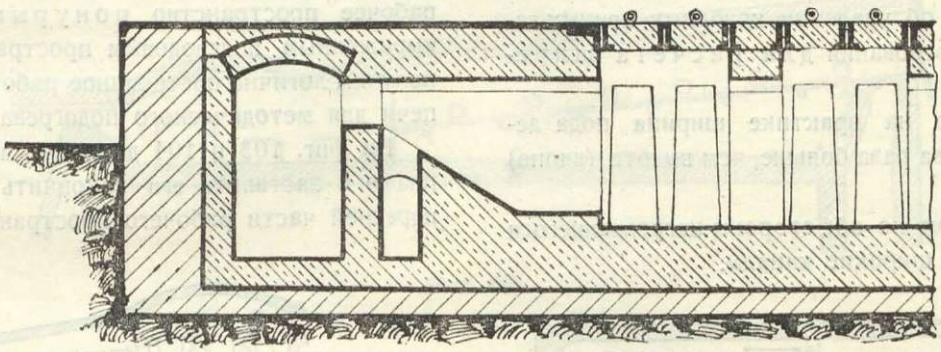
2. Своды регенераторов должны быть на одном уровне с крышками, чтобы было удобно перекрыть всю печь чугунными плитами заводского пола.

3. Регенераторы всего удобнее делать лежачими—так, чтобы печные газы поступали в регенераторы сверху, а уводились к перекидному клапану снизу.

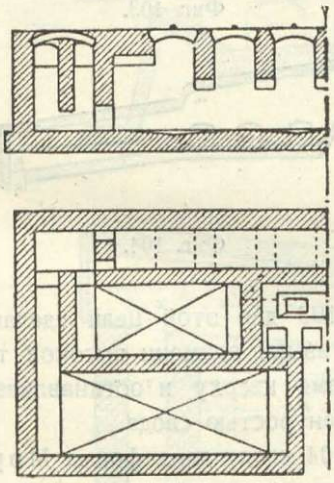
4. Пролеты должны быть расположены у пода колодцев. При таком устройстве нет нужды низко опускать перегородки между колодцами и движению пламени можно дать малую скорость.

5. Размеры пролетов вычисляются как газосливы, чем достигается минимальная скорость истечения газа и воздуха из пролетов, а следовательно,—медленное течение пламени по рабочему пространству колодцев.

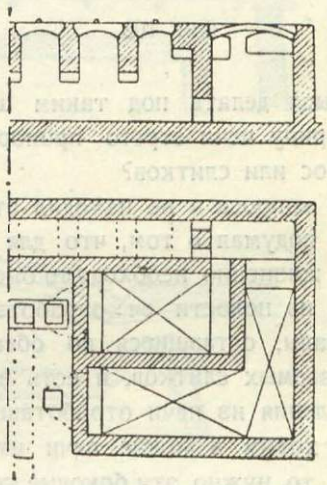
6. Для смешения газа и воздуха можно применять головки фиг. 100 или фиг. 101; разница в конструкциях которых понятна из чертежа.



Фиг. 99.



Фиг. 100.



Фиг. 101.

Печи для нагревания слитков.

Как я писал в первой главе, единственною конструкцией, разработанной вполне правильно, является печь Моргана (стр. 21 фиг., 30). Все остальные печи для методического нагревания железа полны логических ошибок. Начнем рассмотрение их в строгой последовательности.

Под—может быть плоским; однако, в последние годы решительное преимущество получают печи, в которых железо подогревается на трубах, расположенных на некоторой высоте над кирпичным подом. Эта конструкция строго логична. Печь, как всякий организм, должна, во-первых, правильно питаться горячими газами топки и, во-вторых, своевременно освобождаться от остывших, отработавших газов.

Застой холодных газов в печи наносит ей громадный вред, так как задерживается поступление топочных газов и ослабляется омывание газами нагреваемых предметов.

Располагая слитки на трубах, при чем под ними остается достаточно высокий канал, ведущий холодные газы к дымовой трубе, мы создаем под слитками подовый, донный поток холодных газов, освобождающий слитки от отработавших газов, тотчас заменяемых горячими газами. Таким путем циркуляция газов в печи получает полную планомерность. Пламя держится под сводом, там заканчиваются реакции горения; затем спускается к слиткам, омывает их, стынет, холодные газы спускаются ниже слитков и удаляются в дымовой пролет.

Сравним эту строго логичную конструкцию с общепринятой системой методических печей.

На фиг. 31 показано движение пламени (керосина) по строго логичной печи Моргана.

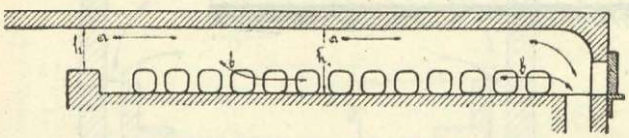
На фиг. 28 демонстрируется мешок остывших газов (вода) в методической печи с восстающим подом и сводом. Очевидно, в данном случае, смена холодных газов горячими—затруднена до последней степени.

Несколько лучше обстоит дело при горизонтальном поде. Мешка не получается, однако на пути подового потока холодных газов расположены слитки, преграждающие ему движение к дымовому пролету.

Соображения об удалении холодных печных газов могут дать основания для расчета ширины пода.

Действительно на практике ширина пода делается почти в два раза больше, чем высота (длина) слитка.

Таким образом по обе стороны нагревающегося слитка остаются широкие каналы.



Фиг. 102.

Какой смысл делать под таким широким? Не лучше ли ширину печи строго пропорционировать с длиной полос или слитков?

Для этого вопроса я не находил ответа до тех пор, пока не подумал о том, что для правильной работы печи жизненно необходимо быстрое и полное удаление из полости ея отработавших газов. Боковые каналы, оставшиеся по обеим сторонам ряда подогреваемых слитков, и есть единственный путь для удаления из печи отработавших газов.

Если мы хотим в конце печи иметь низкую температуру, то нужно эти боковые каналы делать возможно более широкими, что видно из нижеследующего.

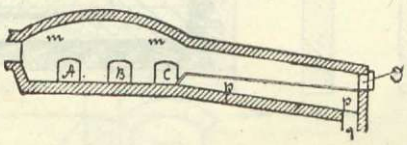
Имеем (фиг. 102) методическую печь с горизонтальным подом и сводом[1]), в которой высота пролета над порогом есть высота газослива h, высота окон ниже этой величины, продукты горения отводятся с пода, а потому пламя подпружено и высота свода над подом $h_1 > h$; на поду расположены слитки; возможны два газовых потока—aa под сводом и bb по поду; чтобы попасть в пролет горячему потоку aa надо опуститься на высоту h_1 и затратить на это некоторое гидростатическое давление δ мм воды; потоку же bb надо преодолеть трение о слитки. Ясное дело, что прорыв пламени прямо в пролет возможен в том случае, если сопротивление движения потока bb — δ_1 мм воды будет больше чем δ мм т.-е. когда

$$\delta_1 > \delta$$

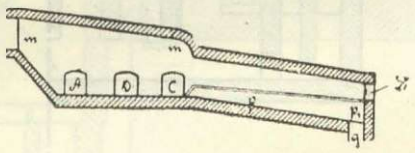
Чем шире печь сравнительно со слитками, тем δ_1 меньше и тем больше оснований для того, чтобы прорыв пламени в дымовой пролет не имел бы места.

Расположив слитки на трубах (фиг. 103 и 104), сделав ступеньку для удобного их кантования перед выдачей, сделав под трубами канализационный канал pp, ведущий в дымовой боров q, снабдив рабочее пространство понурым сводом с ясно выраженным подсводовым пространством mm, мы получим логично построенное рабочее пространство печи для методического подогрева слитков.

На фиг. 103 и 104 даны два метода остановить пламя и заставить его закончить свои реакции в передней части рабочего пространства.



Фиг. 103.



Фиг. 104.

На фиг. 103 для этой цели сделан выпуклый кверху свод: языки пламени высокой температуры уклоняют пламя кверху и останавливают его последующей понуростью свода.

На фиг. 104 своду дана форма Моргана. Понуростью свод просто тормозит пламя; впуск пламени в рабочее пространство печи производится очень высоко над подом.

Я полагаю, что оба эти средства остановить пламя и задержать его в передней части печи одинаково хороши.

Однако при этом нельзя делать одной весьма распространенной ошибки: окна A, B, C и D нельзя делать на разных уровнях. Если мы сделаем их на разных уровнях, то вышележащее окно сделается дымовой трубой нижележащего окна; через нижележащее окно начнется засасывание холодного воздуха, а через вышележащее будет бить сноп пламени и копоти. Пороги всех окон печи должны быть на одной высоте.

[1]) См. также часть III стр. 32.

В заключение дам две иллюстрации исправленных по моим указаниям дорого оплаченных конструкций шведских печей, построенных на одном из Уральских заводов.

На фиг. 105 дан абрис построенной по купленному чертежу печи. При работе конечно оказалось, что стенка *ab* образует мешок застойных газов и я предложил эту стенку сломать.

При капитальном ремонте я предложил переделать печь по эскизу фиг. 106.

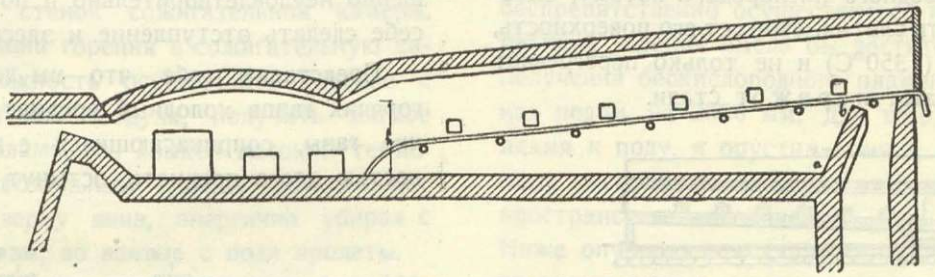
Другая маленькая подобная печь изображена на фиг. 107 и там же исправленная пунктиром. Исправления имели своим следствием увеличение производительности печи с 700 пуд/24 час. до 920 пуд/24 час. т.-е. на 30% при неизменившемся расходе каменного угля.

О форме свода методических печей можно сделать следующие указания:

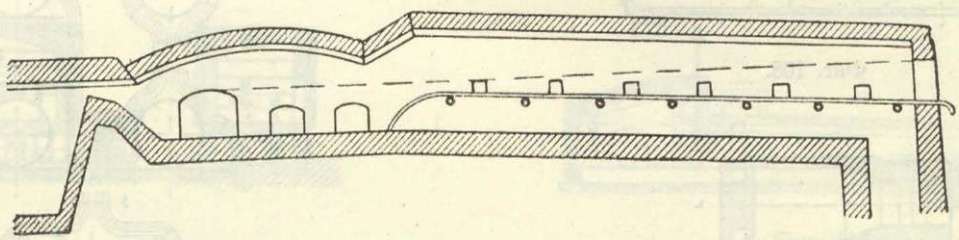
1. Если смесь воздуха и горючих газов в топке подготовлена плохо, то необходим пережим струи в пламенном окне. Его главнейший недостаток возбуждение чрезмерно большой скорости пламени, для уничтожения которой дают сводам специальную форму, как на фиг. 103 и 104. Если подготовка пламени в топке хороша или газы поступают в обширное подсводовое пространство, играющее роль сожигательной камеры, то в пережиме струи в пламенном окне надобности нет.

Если задняя половина свода восстающая, то нередко в своде делается пережим и высота $h = A\sqrt{\frac{Q^2}{B^2 t}}$ (фиг. 105). При понуром своде и подовом потоке холодных газов все эти пережимы излишни.

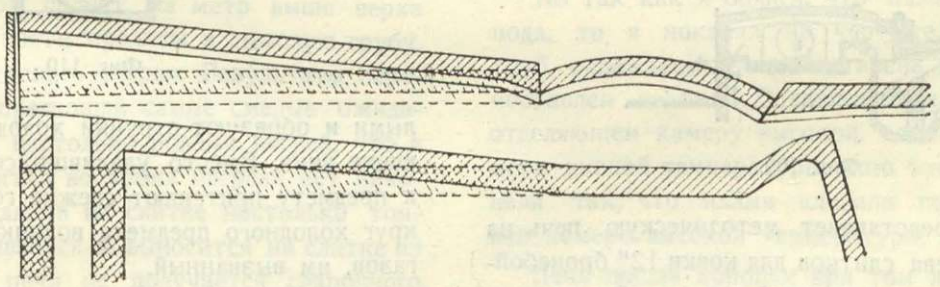
Вообще надо сказать, что понурый свод концентрирует пламя в передней части рабочего пространства; восстающий свод посылает пламя в заднюю часть печи, а потому методические печи надо строить с понурым сводом. Печи для равномерного нагрева очень длинных предметов, например, печи для сварки труб—с восстающим сводом.



Фиг. 105.



Фиг. 106.

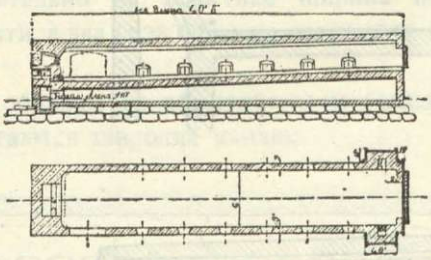


Фиг. 107.

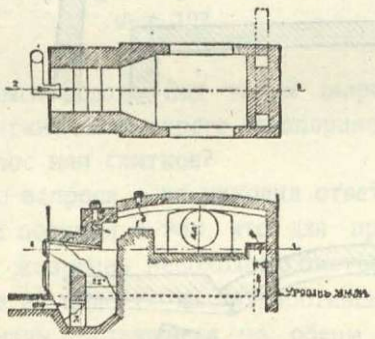
Недостатки современных печей для нагрева стальных слитков сказываются особенно резко на печах для нагрева очень крупных слитков. Перегрев и пережог стали, трещины в отковках суть бедствия, преследующие крупные поковки. Все эти недостатки свойственны в меньшей степени и печам для нагрева мелких слитков, а потому все сказанное о печах для крупных поковок должно применять и к обыкновенным печам для нагрева стальных слитков.

Заводский опыт учит нас, что при неосторожном нагреве можно испортить материал для поковки и вследствие этого получить весьма плохие результаты механических испытаний; мне было поручено создать тип печей, исключающих возможность перегрева.

Современные нагревательные печи для этого непригодны. Для того, чтобы усилить нагревательную способность этих печей, конструкторы направляют язык пламени прямо на слиток, так же как пламя паяльной трубки направляется на шарик буры. Язык пламени по оптическому пирометру имеет нередко температуру до 1800°С, кроме того несет массу свободного кислорода, а потому, охватывая поверхность слитка, сжигает его поверхность, плавит окалину (1350°С) и не только перегревает сталь, но даже дает пережог стали.



Фиг. 108.



Фиг. 109.

Фиг. 108 представляет методическую печь на нефти, для нагрева слитков для ковки 12″ бронебойных снарядов, вместо которой я должен был спроектировать новую.

Фиг. 109 представляет полугазовую печь на английском каменном угле для слитков до 1000 пуд., подлежащую замене новой.

На этой фигуре показано расположение такого слитка в рабочем пространстве печи.

Проектируя печи, неспособные перегреть сталь, я прежде всего исключил нагрев слитка факелом пламени.

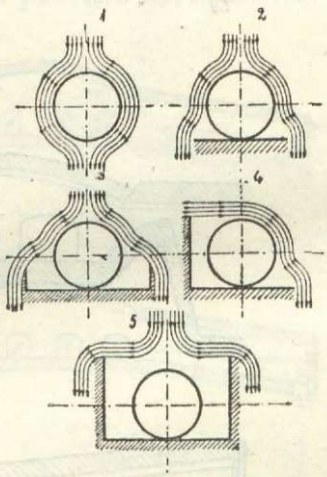
В новых печах реакция горения должна совершаться вдали от слитка. Языки пламени, высокой температуры и богатые кислородом, не должны лизать поверхности металла. Слиток должен нагреваться бескислородными продуктами горения, состоящими из CO_2, N_2 и паров H_2O, с минимальным количеством O_2, с температурой не выше 1300°С.

Нагрев в печи должен быть мягкий (1100—1200°С); но окалина не должна плавиться (1350°С); печь не должна быть «сварочной», не должна нагревать до «слезы» т. е. плавления окалины, не должна давать сварочного шлака.

Для того же, чтобы нагревание слитка шло достаточно быстро и равномерно, рабочее пространство нагревательной печи должно быть правильно канализировано.

Вопрос канализации рабочего пространства в современных пламенных печах поставлен совершенно неудовлетворительно и потому я позволяю себе сделать отступление и здесь его рассмотреть.

Представим себе, что мы ввели в атмосферу горячих газов холодный предмет (фиг. 110). Горячие газы, соприкасающиеся с холодной поверхностью этого предмета, остынут, сделаются тяжелыми и образуют струйки холодных газов, стекающие вниз. Вместо удалившихся холодных газов к предмету притекают свежие горячие газы и вокруг холодного предмета возникает целый поток газов, им вызванный.



Фиг. 110.

Если положим нагреваемый предмет на под (2), то удаление холодных газов снизу будет затруднено и нижняя поверхность предмета будет омываться газами хуже верхней. Верх слитка будет прогреваться скорее низа.

Если мы поместим слиток в печь, дымовыя отверстия, в которой, будут выше пода (3), то низ слитка будет греться еще хуже. Он будет в мешке холодных газов.

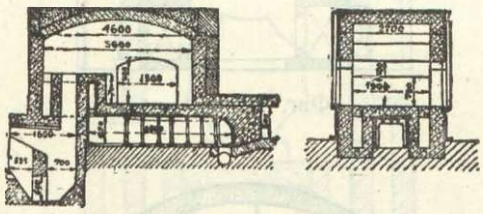
Если мы сделаем у печи очень высокий порог и положим слиток на не канализированный со всех сторон под (4), то струйки будут прогревать только одну сторону слитка.

Наконец, нагревание будет до крайности затруднено при полном отсутствии канализации

пода. Слиток находится в мешке холодных газов и может согреваться только лучистой теплотой сверху (5).

Из вышеизложенного следует, что очевидно печь для нагрева должна быть устроена по типу (1) т.-е. остывшие газы должны очень энергично убираться с пода печи. В условиях (1), слиток даже в том случае будет нагреваться очень быстро, когда печные газы будут не очень высокой температуры. Но, для получения, в этом случае, хороших результатов необходимо, чтобы реакция горения завершалась где-то вне нагреваемого слитка в наилучшей для реакции горения обстановке, среди раскаленных стенок сожигательной камеры. Перенесение реакции горения в сожигательную камеру даст возможность осуществить горение с небольшим избытком воздуха, получить мягкое бескислородное пламя, без языков высокой температуры. Этим «томильным пылом» можно будет омыть слиток сверху вниз, энергично убирая с пода остывшие газы, во взятые с пода пролеты.

Так именно и была построена печь фиг. 111. Это та же печь фиг. 109, но пламя направлено



Фиг. 111.

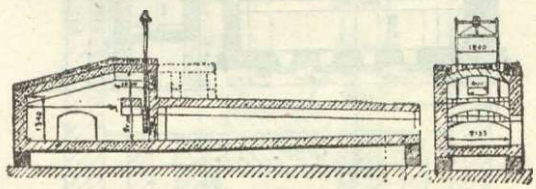
прямо вверх, свод поднят на метр выше верха слитка, а с пода взяты пролеты в дымовую трубу. Арматура печи осталась старая. Результаты переделки этой печи превзошли самые смелые ожидания: 1) печь дала настолько ровный нагрев, что в поворачивании слитка во время нагрева нет никакой нужды; 2) окалина на слитке настолько тонка, что не отваливается и выносится на слитке из печи, поэтому в печи не получается сварочного шлака; 3) плавления окалины на слитке никогда не бывает, поэтому не наблюдается и перегрева стали; 4) слиток греется быстро и очень мягко, что особенно оценил персонал рабочих и мастеров у пресса в 1000 тонн, при котором печь поставлена; 5) расход топлива остался прежним.

Рациональное переустройство методической печи фиг. 108 осуществить было гораздо легче. Направляя пламя предыдущей полугазовой печи на свод, увеличивая об'ем ее подсводового пространства, я боялся понизить температуру печи, боялся не достигнуть в определенной печи температуры слитка в 1200°С, нужной для ковки.

При переделке печи на нефть (фиг. 112) эта боязнь у меня отпала. Нефть такое великолепное топливо, что дает пламя очень высокой температуры, и моя задача заключалась только в том, чтобы защитить слиток от непосредственного воздействия богатого кислородом факела пламени.

Осуществлено это было перестройкой печи по фиг. 112. Я поднял паровую форсунку во второй этаж и направил ее сзади наперед. Благодаря такому расположению форсунки, пламя распыливаемой паром нефти проходило под сводом печи около 3600 мм, ударялось о переднюю стенку печи, поворачивало на 180° и направлялось вдоль рабочего пространства методической печи.

Для того, чтобы такой поворот на 180° мог бы беспрепятственно осуществиться и для того, чтобы реакция горения имела бы достаточное время для получения бескислородного пламени, я поднял свод над подом на 2000 мм. Для того, чтобы прижать пламя к поду, я опустил стенку, отделяющую камеру высокой температуры от остального рабочего пространства методической печи на 700 мм [1]). Ниже опустить эту стену было нельзя, ибо слитки во время ковки осаживались вертикально и диаметр их доходил до 600 мм.



Фиг. 112.

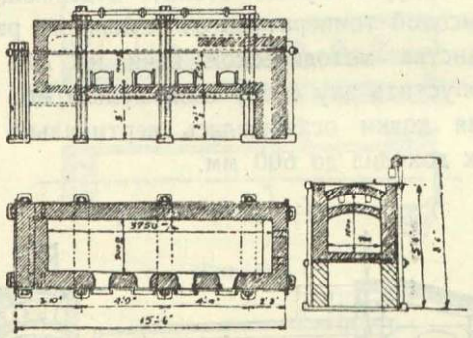
Но так как я боялся, что пламя оторвется от пода, то я показал на чертеже, собранный из труб, охлаждаемых водой ставень, который однако поставлен не был. Оставляя один слиток в окне, отделяющем камеру высокой температуры от камеры низкой температуры, окно это рабочие стесняли так, что пламя «лизало под» и в передней камере высокой температуры.

Печь пошла хорошо: при том же расходе нефти производительность печи возросла; слитки нагревались мягко и ровно; плавления окалины не наблюдалось; тонкий слой окалины выносился всегда на слитке и отваливался только под молотком; сварочного шлака не получалось. Позже выяснился существенный недостаток этого расположения паровой форсунки, а именно: паровая форсунка оказывается столь слабо инжектирующим воздух аппаратом, что держать положительное давление на поду печи оказывается затруднительным и я в настоящее время отказался от установки паро-

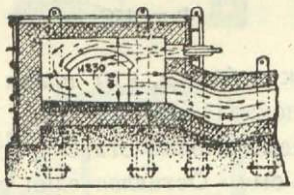
[1]) С гидравлической точки зрения эту стенку надо назвать «перевалом» или «перевальной стенкой», соответственно перевалу в плотина.

вых форсунок, под сводом печей. Подобная конструкция применяется мною только к форсункам, работающим от вентилятора, ибо эти форсунки не получают нужный им воздух путем засасывания через щель вокруг форсунки. Этот успех подтолкнул меня применить идею поставить форсунку во второй этаж, и сделать печь с очень высоким сводом и в печи для нагрева заготовок для снарядов в Пермских пушечных заводах.

Печь мною была оставлена в ее старой арматуре (фиг. 113). Свод был поднят до высоты 1 м над подом. Было поставлено две форсунки на дутье в 1″ ртути. Пламя их должно было пролететь под сводом 3750 мм и завернуться на 180°, так как дымовые пролеты были сделаны на поду со стороны форсунок. Но оказалось, что для такого поворота на 180° высота свода над подом в



Фиг. 113.



Фиг. 114.

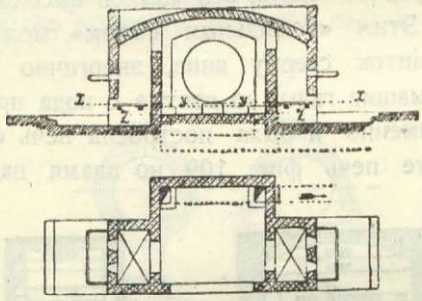
в 1000 мм мала. Горн. инж. Н. В. Попов ввел поправку в чертеж этой печи, сделав второй сводик под форсунками, чем корректировал пламя форсунок, сделав его широким и плоским.

Печь пошла хорошо и все печи прессовой фабрики Пермских пушечных заводов начали постепенно переделывать по типу этой печи.

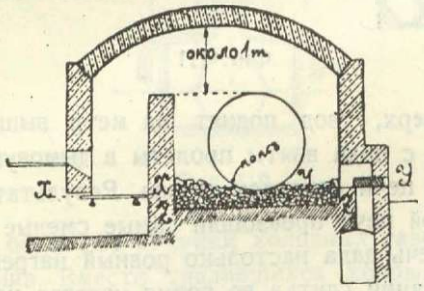
Печи этой конструкции были пущены в Путиловском заводе в августе 1914 года, в Мотовилихе в октябре, а в ноябре 1914 г. в The Iron Trade Rev., стр. 1000, была опубликована печь фирмы Washington Iron Works C°, изображенная на фиг. 144 (Ж. Р. М. О. 1914, стр. 654). Я не думаю, чтобы опубликованные размеры печи были верны, но очевидно, что идея печи у меня и у американского изобретателя была одна и та же.

Таким образом вопрос о рациональной конструкции печей для нагрева как крупных слитков, так и мелкой заготовки был решен. Посмотрим как решают этот вопрос лучшие заводы Европы.

В печи для нагрева очень тяжелых (100 тн) слитков завода Крезо во Франции (фиг. 115) пламя пущено прямо на слиток. Уровень колосников *xx* сделан выше уровня пода и так как печь самодувная, то на поду естественно получается отрицательное давление. Под слиток через все щели сосет воздух, низ слитка стынет и во избежание этого на под печи подбрасывают кокс; этим путем подогревают низ слитка. Дымовыя отверстия берутся выше пода с уровня *yy*, чем предупредили попадание в них при загрузке кокса, но устроили на поду мешок холодных газов, подогреваемых коксом. Равномерный нагрев слитка достигается его поворачиванием, но при ковке трещин достаточно.



Фиг. 115. [1]).



Фиг. 116.

Как исправить эту печь? Конечно,—поднять свод, опустить на метр колосники, на поду сделать целый ряд дымовых отверстий от уровня пода. Наконец,—использовать теряющийся жар для подогрева воздуха и тем сократить неимоверный расход топлива в этом типе печей.

Печь Джона Брауна в Шеффильде (фиг. 116) совершенно подобна печи Крезо, но повышено подсводовое пространство до 1 м; уровень колосников *xx* выше уровня пода *zz*; уровень дымовых отверстий *yy* тоже выше пода, как в Крезо; дымовыя отверстия расположены только с одной стороны. При нагревании слитка на под засыпают

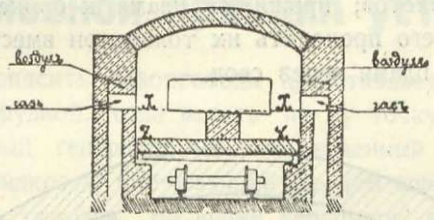
[1]) Все эскизы сделаны мной от руки на память, ибо чертеж этих печей представляет тщательно охраняемый секрет (!).

кокс, кроме того слиток поворачивают. При ковке на слитке оказывается много трещин.

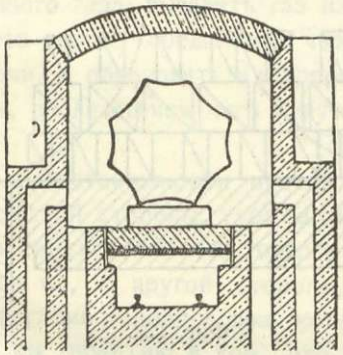
Недостатки этой печи те же, что и в печи Крезо. В таком виде эта печь конечно неудовлетворительна.

Печь Сименса завода Армстронга и Витворта в Шеффильде (фиг. 117). Пролеты направлены прямо на слиток; низ слитка купается в мешке холодных газов, ибо уровень пода *zz* ниже уровня головок.

Печь Сименса завода Виккерса в Шеффильде (фиг. 118) лучше предыдущей, ибо воздушные пролеты взяты с пода печи, чем уничтожен



Фиг. 117.



Фиг. 118.

мешок холодных газов на поду. Газовые пролеты следовало бы тоже сделать на уровне пода и направить вверх, т.-е. дать печи конструкцию фиг. 119.

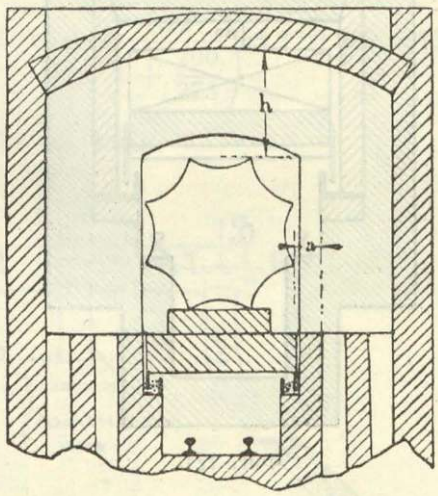
Чем больше будет сделан нами размер *a* и высота *h*, тем спокойнее и ровнее будет нагрев слитка.

В заключение я должен сказать, что среди инженеров наблюдается совершенно неосновательный страх за крупные поковки. Конечно, отлить слиток для крупной поковки задача трудная, но раз слиток отлит хорошо, в нем нет трещин, нет значительной ликвации и усадки, то ковка слитка является операцией совершенно безопасной. Конечно нельзя уводить ковкой ликвационную зону с ее осевого положения; проект ковки должен считаться с неизбежностью ликвационной зоны, он должен предусмотреть ее распределение в готовой поковке. Но если за всем этим, печи для нагрева слитков не имеют недостатков печей Круппа, Крезо, Джона Брауна, Армстронга, Виккерса и многих других заводов, а построены логично, то можно смело браться за исполнение каких угодно поковок с твердой верой в успех.

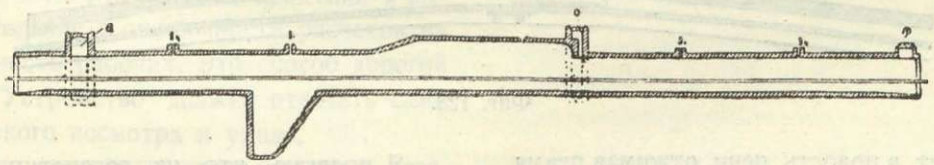
Резюмируя все сказанное о печах для нагрева слитков мы должны для этих печей поставить три нижеследующих требования:

1. Реакция горения должна совершаться вне нагреваемого слитка и слиток должен быть обогреваем продуктами горения, а не факелом пламени.

2. Для быстроты нагрева под, на котором подогревается слиток, должен быть хорошо канализирован.



Фиг. 119.



Фиг. 120.

3. К этим двум пунктам надо прибавить, что под'ем температуры слитка не должен быть резок, а потому для нагрева слитков особенно хороши методические печи.

Коридорные печи.

Несмотря на заманчивость коридорных печей, их редко строят, ибо они редко удаются, вследствие ошибочности своей конструкции.

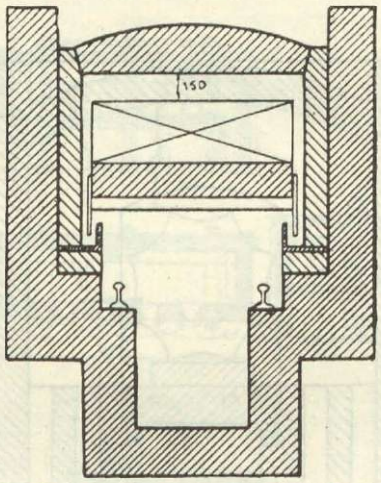
На фиг. 120 представлен эскиз печи Грёндаля для обжига брикетов.

Середина печи имеет приподнятый свод, где развивается пламя генераторного газа поступающего через щель в своде *O*. Генератор на дутье;

воздух доставляется тоже вентилятором через щель в своде P и дым удаляется через щель Q, тоже через свод. Пламя в печи течет под сводом; для того, чтобы прижать его к поду, делаются опускные со свода заслонки s_1 и s_2 [1]).

Заставляя двигаться пламя по кладке брикетов, мы увеличиваем сопротивление движению газов; приходится увеличивать давление дутья под колосники генератора и в печь, и повышать дымовую трубу. Однако такому повышению упругости дутья препятствует малая герметичность песчаного затвора, который очень трудно держать в порядке в условиях печи Грёндаля.

Из этого затруднения последний выходит, вдувая отдельную струю воздуха под вагонетки, якобы для их охлаждения. Этот дополнительный воздух



Фиг. 121.

вероятно проникает в полость печи, отжимая пламя от брикетов к своду, следствием чего явилась необходимость увеличить длину коридорной печи для обжига брикетов с 50 до 70 м длины.

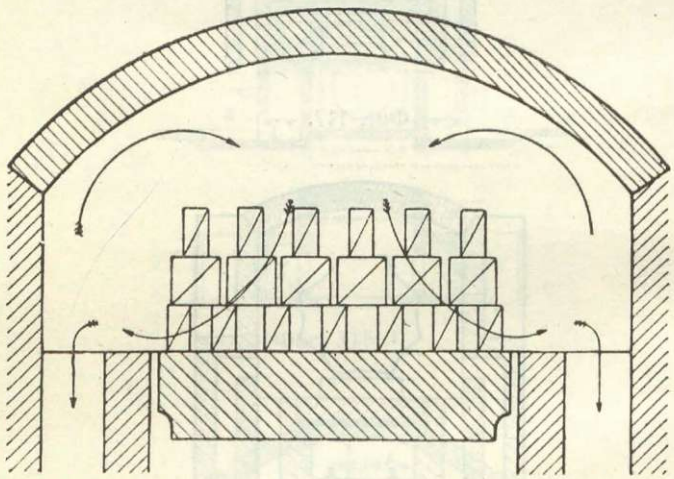
В устройстве коридорных печей Грёндаль делает явную ошибку, отводя дым сверху. Этим путем он погружает весь поезд брикетов в мешок холодных газов. Эта ошибка очевидна.

Другая его ошибка состоит в стремлении заставить пламя пройти через решетчатую кладку брикетов во всю длину коридора. Эта задача очень трудно осуществимая и, чтобы обеспечить себя, изобретатель стал грузить на вагонетки только по два ряда кирпичей.

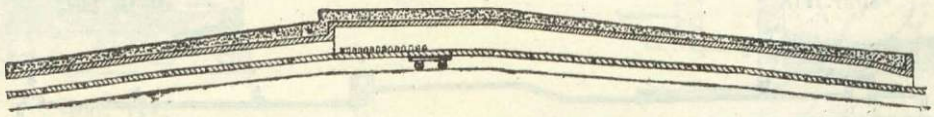
Я полагаю, что в решении вопроса о коридорных печах, мы должны стоять на совершенно другой точке зрения. Гнать пламя по решетке брикетов протяжением в 50 м не следует. Выгоднее греть брикеты нисходящими потоками горячих газов.

Разность в методах работы — осуществленной Грёндалем и предлагаемой мной — видна из сопоставления поперечных сечений коридорной печи Грёндаля и мною исправленной (фиг. 121 и 122).

Грёндаль (фиг. 121) делает прямой свод на расстоянии 150 мм от верха нагруженных в два ряда брикетов; прижимая пламя к брикетам, заставляя его проходить их толщу, он вместе с тем отводит пламя через свод.



Фиг. 122.



Фиг. 123.

Я полагаю, что на вагонетку нужно грузить столько рядов брикетов, сколько будет удобно по условиям их производства. Показываю их на фиг. 122 три ряда.

Делаю коридор гораздо шире вагонетки, свод поднимаю над верхним рядом брикетов на такую высоту, чтобы все пламя шло под сводом. Благодаря ширине печи сбоку брикетов, получается два подовых потока, которые отводятся вниз в дымовые пролеты.

Движение омывающих брикеты газов сверху вниз показано стрелками.

Кроме того, чтобы осуществить и в продольном направлении движение печных газов сверху вниз, а движение нагреваемого воздуха снизу вверх, я изгибаю прямой коридор Грёндаля по дуге круга выпуклостью вверх, как показано на фиг. 123.

[1]) Кроме того имеются еще заслонки s_3 и s_4 претендующие повидимому способствовать лучшему нагреванию воздуха, но очевидно не имеющие смысла, ибо холодный воздух сам по себе всегда идет понизу, а потому, прижимать его к поду нет никакой нужды.

Так построенная печь не будет нуждаться в дутье: превышение средней части печи (камеры горения) над устьем печи, в которое вступает холодный воздух, создает гидростатическое давление, достаточное для преодоления сопротивлений движению воздуха по широкому коридору, в котором движется поезд вагонеток. С другой стороны пламя, развившееся в камере горения, будет спускаться вниз, нагревая брикеты тягой дымовой трубы, ибо сопротивление опять-таки широкого коридора не велико.

Я полагаю, что так исправленные коридорные печи могут работать вполне удовлетворительно.

ГЛАВА III.

Основной принцип устройства безопасных газопроводов.

Обезопасить газопроводы представляется задачей не трудной, если встать на ту точку зрения, что теплый генераторный или доменный газ есть легкая жидкость, окружающий же его воздух есть жидкость тяжелая. Во время перерывов в работе, например, при засыпке в домну калош, холодный воздух, как тяжелая жидкость, может войти в горелки доменного газа, выдавить газ из части газопровода через другие горелки или через колошник доменной печи, и образовать в газопроводах взрывчатую смесь, последствием чего будут хлопки или взрывы.

Мерами предосторожности против взрывов может быть, с одной стороны, уход за газопроводами, например, закрытие клапанов горелок при каждой засыпке, или же, с другой стороны, разработка такой конструкции газопроводов, которая сама по себе давала бы гарантию в том, что взрывов при эксплоатации газопровода не будет.

Из моей многолетней заводской практики я вывел твердое убеждение в ошибочности расчетов на уход и аккуратность рабочих. Это способ дорогой и ненадежный. Устройство должно отвечать само за себя, без всякого досмотра и ухода.

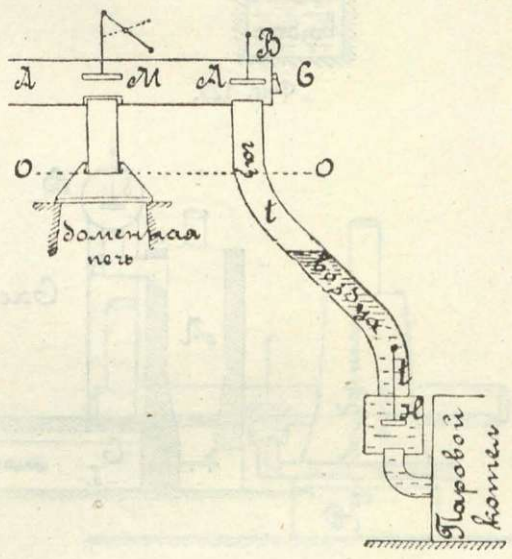
Правила этого устройства газопроводов я предлагаю вниманию читателя. Они очень элементарны, очень просты, как все приложения гидравлики к печам. Тем не менее, случаи нарушения их чрезвычайно часты, ибо о них, просто, не думают.

Правила о предупреждении несчастных случаев предписывают такое устройство газопроводов, чтобы давление в них всегда было бы выше атмосферного. Поэтому, если на фиг. 124 мы имеем колошник доменной печи, прикрытый обыкновенной крышкой, и газопровод $AAtt$ к паровым котлам, то давление доменного газа в горелке парового котла должно быть не ниже атмосферного, скажем — равно нулю. Давление в трубе AA будет, конечно, гораздо выше атмосферного.

Приняв вес 1 м³ доменного газа при 0° равным 1,22 кг, температуру доменного газа в 200°, высоту трубы AA над горелкой парового котла в 23 м, мы найдем гидростатическое давление доменного газа в трубе AA равным:

$$\delta = 23\left(1{,}29 - \frac{1{,}22}{1+\frac{200}{273}}\right) = 23.0{,}585 = 13{,}45 \text{ кг/м}^2$$

или 13,45 мм воды.



Фиг. 124.

Из сказанного следует, что, пока крышка на домне закрыта, на всем пути между доменной печью и горелкой паровых котлов (фиг. 124) давление доменных газов — выше атмосферного и никакой опасности в засасывании воздуха на этом пути не существует. Напротив того, как только мы откроем крышку на домне, то часть доменного газа из газопровода может быть выдавлена воздухом через неплотности клапана M; воздух, как тяжелая жидкость, заполнит газопровод через горелку, как заштриховано на фиг. 124.

Весь ли доменный газ уйдет в этом случае из газопровода? Конечно, не весь; воздух не может подняться выше уровня линии OO; на практике

он остановится несколько ниже, ибо доменный газ в колене *tt* холоднее, чем у самой домны.

Когда крышка домны будет опущена, начнется обратное вытеснение воздуха доменным газом и, если общее направление газопровода вертикально, то воздух спокойно вытеснится сверху вниз через горелку; а когда придет газ, он спокойно загорится. Что это так, я убедился на примере пуска доменного газа к котлам в Нижне-Тагильском заводе в 1895 году. Там было принято, чтобы при пуске газа воздух вытеснялся только из квадратной трубы *AA* через клапан *C*. Из трубы *tt* воздух вытесняли через горелки, для чего просто поднимали клапан *B*; взрывов никогда не происходило; конечно, такой способ пуска газа в котлы должно считать рискованным. С течением времени автоматическое прикрытие клапана *M* было упразднено и котлы работали на доменном газе, при чем воздух во время каждой засыпи входил в газопроводы, а затем вытеснялся в топку.

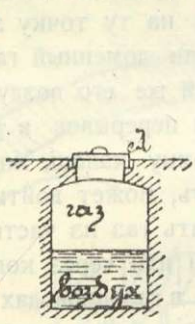
Фиг. 125.

Почему не было взрывов? Ответ совершенно ясен: легкий газ имел во всех частях газопровода направление движения сверху вниз и вытеснял тяжелый воздух вниз, с ним не смешиваясь.

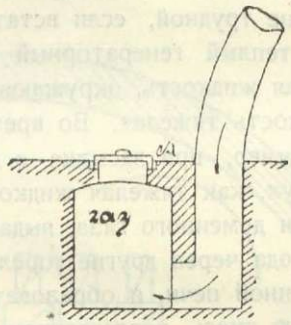
Если бы перед впуском в котлы была бы придана конструкция фиг. 125, т.-е. газу перед входом в котлы было бы дано направление снизу вверх, то при заполнении боровка тяжелым воздухом получалась бы смесь газа и воздуха, которая при обратном движении в топку дала бы взрыв.

Сравним между собой фиг. 124 и 125. Сделано небольшое конструктивное изменение и безопасная конструкция (фиг. 124) сделалась очень опасной (фиг. 125).

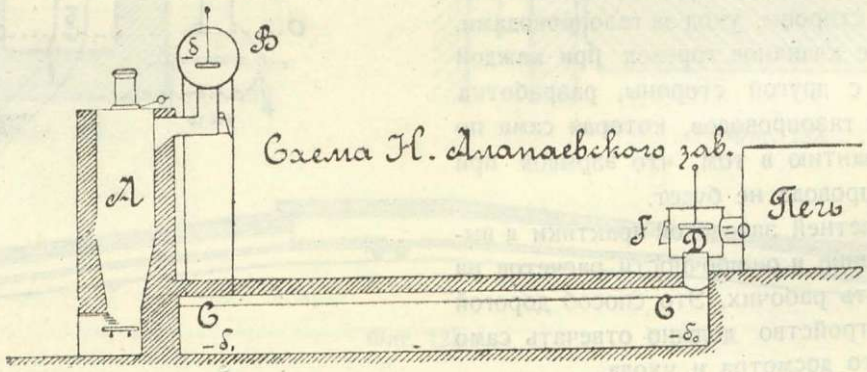
Положительное давление в газопроводе на уровне горелки не всегда гарантирует положительное давление во всех частях газопровода. Подобный пример в моей практике был в Н.-Алапаевском заводе (фиг. 126). Группа генераторов *A* была присоединена к газовому коллектору *B*, а из него газ проводился очень длинным боровком *CC* в листокатальные печи и печь Сименса для нагрева слитков. Устройство это давало такие взрывы, что подземный боровок был оставлен и заменен подземной железной трубой.



Фиг. 127.



Фиг. 128.



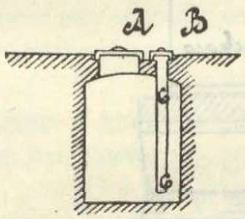
Фиг. 126.

Взрывы прекратились. Тут мы имеем случай, когда давление, равное нулю в горелке, не гарантирует положительного давления во всем газопроводе. И в самом деле, если в горелке давление равно нулю, то у дна боровка оно будет отрицательно ($-\delta_0$ и $-\delta_1$) и через трещины в кладке боровка делается возможным засасывание воздуха. Но взрывы во время работы печей были сравнительно редки. Очень опасные взрывы были при пуске генераторов в ход. Причина этих взрывов совершенно ясна. Для выпуска взрывчатой смеси из подземных боровков применяются обыкновенно песчаные клапаны типа фиг. 127.

Совершенно ясно, что такой клапан взрывчатую смесь из газопровода удалить на воздух не может

на дне боровка всегда останется слой воздуха, как тяжелой жидкости.

Если боровок короток, то делу может помочь подвод газа снизу (фиг. 128); при длинных же подземных боровках клапан для удаления взрывчатой смеси должен иметь специальную конструкцию (фиг. 129) при которой взрывчатая смесь может быть выдавлена газом с пода боровка. Здесь, кроме обыкновенного предохранительного клапана *A*, помещен еще специальный клапан *B* с трубой *cc*, немного не доходящей до дна боровка, который служит для вытеснения на воздух взрывчатой смеси с пода боровка. Таких клапанов обыкновенно не



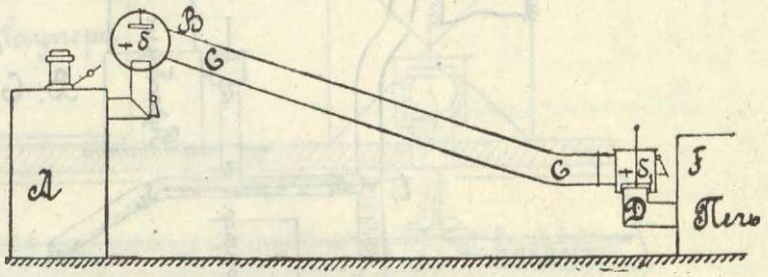
Фиг. 129.

делают, ибо совсем не задаются мыслью, как выдавить со дна боровка тяжелый холодный воздух. Вот причина, почему длинный подземный боровок рисуется в глазах инженеров, как устройство нежелательное и несколько опасное в отношении взрывов.

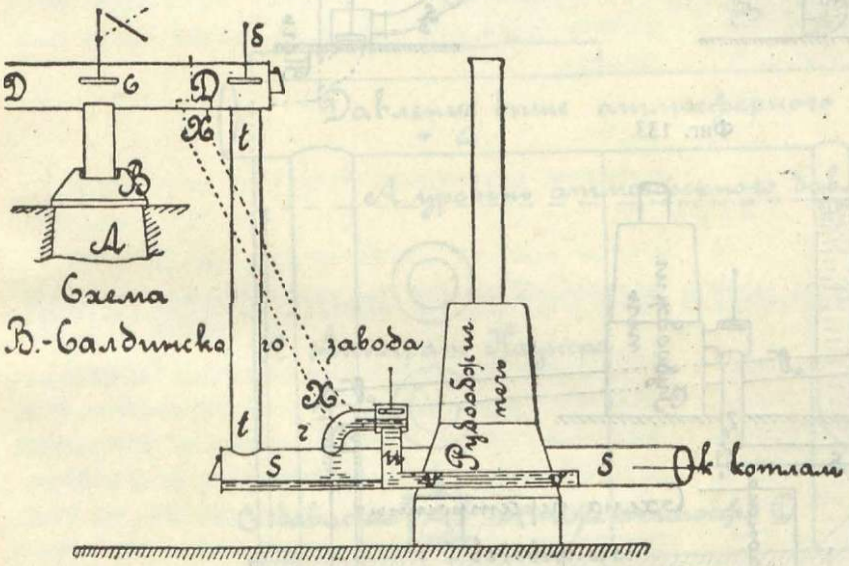
Кроме завода Н.-Алапаевского, Н.-Шайтанского, об устройстве боровков коих писано выше, взрывы в подземном боровке были наблюдаемы мною в Н.-Салде у аппаратов Каупера. От взрывов мы избавились энергичным продуванием боровков паром из специально устроенного паропровода.

Вместо подземных боровков очень часто делают надземные железные трубопроводы, (фиг. 130). Устройство их предложено еще Сименсом, об'яснявшим тягу генераторов действием «сифона». Если в горелке давление равно нулю, то во всех частях газопровода (фиг. 130) давление выше атмосферного, и он совершенно обеспечен от взрывов. Вытеснение воздуха из газопровода через клапан (фиг. 130) идет сверху вниз, т.-е. в условиях чрезвычайно благоприятных; смешения газа и воздуха не происходит, почему и взрывов не бывает.

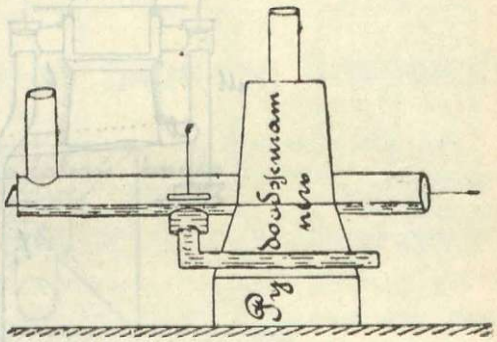
После постройки рудообжигательной печи Вестмана, в Верхне-Салдинском заводе, каждая засыпка калоши в домну сопровождалась взрывом. Схема газопроводов показана на фиг. 131. Домна *A* прикрывалась крышкой *B*, прижимающей автомати-



Фиг. 130.



Фиг. 131.



Фиг. 132.

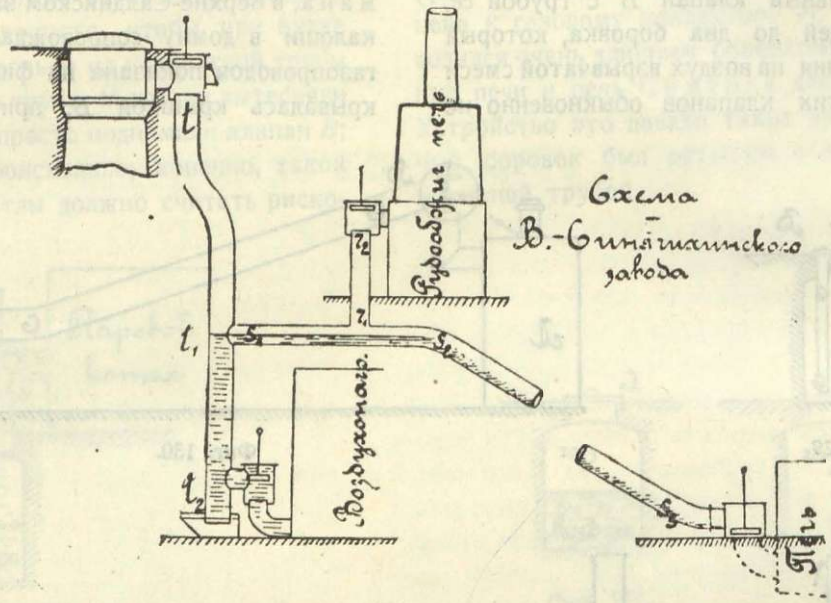
чески клапан *C*. Доменный газ направлялся трубой *DD*, *tt* и *SS* к паровым котлам. По пути от трубы *SS* был взят патрубок *r*, который отводил часть газа по газопроводу *u* и *vv* к горелкам печи Вестмана. До постройки печи Вестмана взрывов не бывало, и автоматический клапан *C* был заброшен и при опускании крышки не запирался.

Причиною взрывов был очевидно воздух, входивший в горелки газопровода *vv* и в патрубок *u*; затем он частично выполнял патрубок *r* и падал на дно пятифутового газопровода *SS*, образуя взрывчатую смесь.

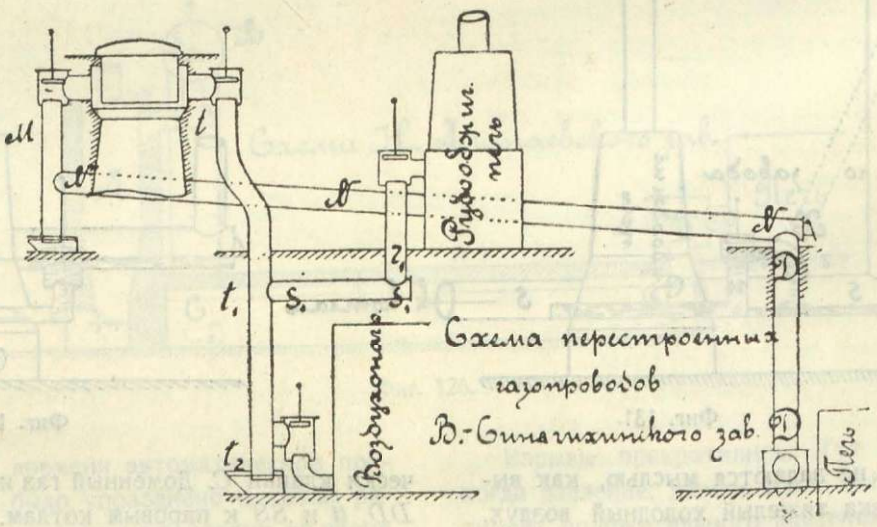
Чтобы избежать взрывов, пришлось восстановить автоматический клапан *C*, но полного исчез-

новения хлопков мы все-таки не достигли. Значительно улучшить положение дела можно было бы методом взятия газа от газопровода. Фиг. 132 давала бы лучшую гарантию безопасности, но радикальное улучшение произошло бы, если бы рудообжигательная печь была бы снабжена отдельным газопроводом XX, указанным на фиг. 131 пунктиром, или газопроводом, взятым от вертикальной трубы tt.

При каждой засыпи калоши на доменной печи в листокатальной печи был взрыв. Очевидно, что во время засыпи рудообжигательная печь высасывала из газопровода газ; холодный воздух входил в горелку воздухонагревателя, выдавливал газ из части вертикальной трубы t_1t_2, распространялся по трубе S_1S_2 и, попадая вниз по трубе S_2S_3, давал смесь с газом. По окончании засыпи колоши газ обратно выдавливал воздух в горелку воздухонагре-



Фиг. 133.



Фиг. 134.

Если газопроводы очень длинны, а потребители доменного газа находятся на различных горизонтах, то вопрос о безопасном устройстве газопроводов принимает особую остроту.

На фиг. 133—схема газопроводов В.-Синячихинского завода. Потребителями доменного газа были: воздухонагреватель, рудообжигательная печь, установленная на плотине завода на 6—7 метров выше воздухонагревателя, и листокатальная печь, поставленная в саженях 50 от доменной печи.

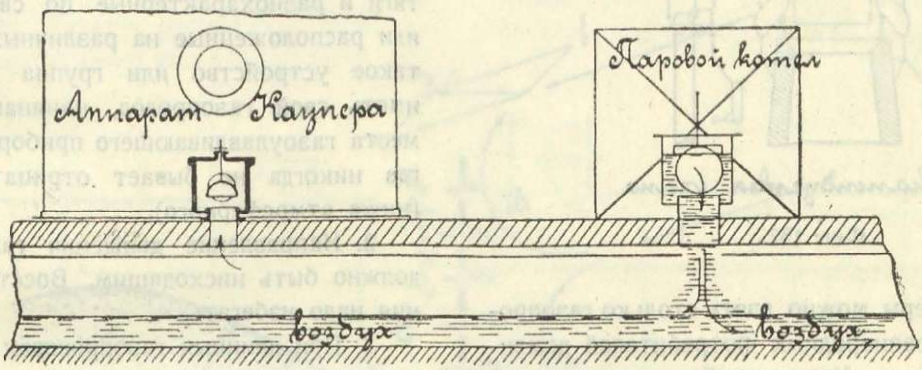
вателя, смесь же, образовавшаяся в трубе S_2S_3, попадала в горелку листокатальной печи и давала взрыв.

Газопроводы были перестроены (фиг. 134). От доменной печи был взят другой патрубок и устроен для листокатальной печи свой газопровод $MNNDD$. Взрывы, конечно, прекратились. Конечно, было бы логично перестроить газопровод к рудообжигательной печи $S_1S_1r_1$, уничтожив восстающее колено r_1, но этого сделано не было, ибо эта часть газопровода нас мало безпокоила.

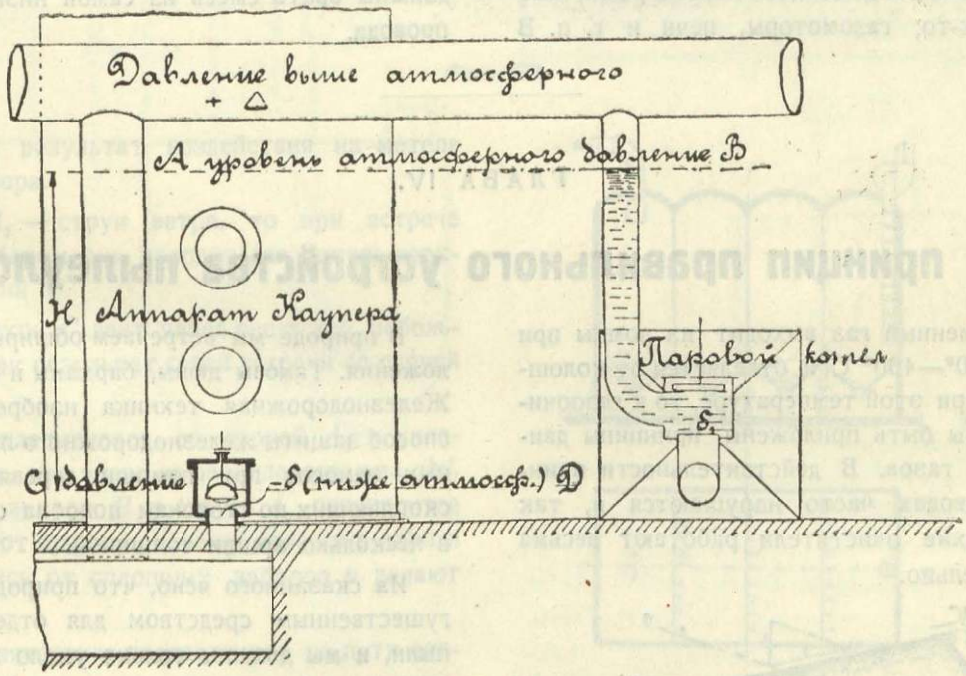
В схеме фиг. 133 во время засыпки калош газ выдавливался воздухом из газопровода через рудообжигательную печь. Патрубок $r_1 r_2$ являлся, так-сказать, дымовой трубой всех газопроводов В.-Синячихинского завода благодаря тому, что рудообжигательная печь поставлена выше воздухонагревателя и листокатальной печи.

Но совершенно очевидно, что такое же явление можно получить и в том случае, когда потребители доменного газа расположены на одном уровне, но устройство газовых топок их разного характера. Горелка доменного газа может быть такого большого диаметра, скорость входа доменного газа в топку так мала, что в полости топки может существовать почти атмосферное давление. Такие топки очень часто устраиваются у паровых котлов, работающих доменным газом. Если рядом с группой таких котлов поставить аппарат Каупера, который пропорционируется с очень маленькими клапанами и большими скоростями доменного газа и воздуха, а потому работает с очень большим разрежением в сожигательной камере, то, очевидно, во время засыпки калоши на доменной печи, воздух через горелки паровых котлов войдет в газопроводы и выдавит газ из газопровода в аппараты Каупера.

Такое вытеснение газа из газопроводов может обходиться благополучно и неблагополучно, в зависимости от того, как устроен газопровод. Фиг. 135 дает пример чрезвычайно опасного устройства фиг. 136 — устройства тем менее опасного, чем выше газопровод над полом и чем горячее газ. На фиг. 136 разрежение ($-\delta$), господствующее в камере горения аппарата Каупера, должно быть уравновешено разрежением, которое способно дать столб теплого легкого газа H.



Фиг. 135.



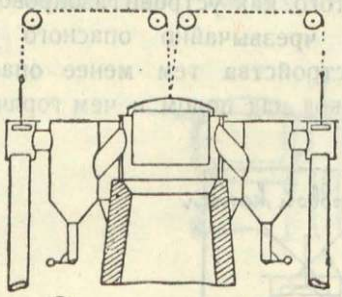
Фиг. 136.

Если линия AB не поднимается выше низа газопровода, то устройство газопровода будет совершенно безопасно, и хлопков в газопроводе никогда не будет.

Если же мы хотим иметь совершенно безопасное устройство, так сказать, идеал безопасности,

то, конечно, для каждой группы потребителей нужно прямо от домны устраивать свой газопровод. Подобное устройство указано эскизно на фиг. 137.

Здесь вокруг колошника устроена кольцеобразная камера для улавливания колошниковой пыли, механически удаляемой через спускные люки; от



Фиг. 137.

стенок этой камеры можно взять столько газопроводов, сколько разнородных потребителей доменного газа мы имеем. Например, кауперовские аппараты, рудообжигатели, котлы, аппараты для очистки и потребления доменного газа на различные надобности, как-то: газомоторы, печи и т. п. В пылеосадительной камере на уровне колошника царствует всегда давление выше атмосферного, а потому, если все газопроводы будут направлены сверху вниз, то ни малейшей опасности взрыва в этих газопроводах не будет.

Суммируя все описанные случаи неудачного расположения газопроводов, мы можем вывести нижеследующие правила проектирования безопасных газопроводов.

1. Не следует соединять общим газопроводом устройства, работающие при различных условиях тяги и разнохарактерные по своему назначению, или расположенные на различных уровнях. Всякое такое устройство или группа устройств должны иметь свой газопровод, начинающиеся от такого места газоулавливающего прибора или газопровода, где никогда не бывает отрицательного давления (ниже атмосферного).

2. Направление движения газа в газопроводах должно быть нисходящим. Восстающего направления надо избегать.

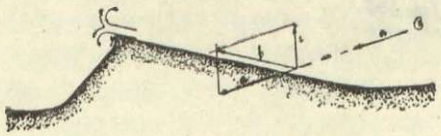
3. При длинных газопроводах их лучше делать с падением в сторону движения газов.

4. Устройства для продувки взрывчатой смеси должны брать смесь из самой низкой части газопровода.

ГЛАВА IV.

Основной принцип правильного устройства пылеуловителей.

Так как доменный газ выходит из домны при температуре 200°—400° С и отделяется от колошниковой пыли при этой температуре, то к газоочистителям должны быть приложены принципы движения горячих газов. В действительности принципы эти в заводах часто нарушаются и, так называемые, сухие очистители работают весьма неудовлетворительно.



Фиг. 138.

Между тем, практика дает указания, что задача очистки газа от колошниковой пыли—задача разрешимая. Мы имеем многочисленные указания на то, что длинный горизонтальный газопровод прекрасно очищает газ от пыли. Специально же устроенные вертикальные очистители отделяют только подрудок. Почему? Вот вопрос, на который надо дать простой и ясный ответ.

В природе мы встречаем обширные пылевые отложения. Таковы дюны, барханы и отложения лёса. Железнодорожная техника изобрела прекрасный способ защиты железнодорожного полотна от снежных заносов при помощи деревянных решеток, скопляющих по сторонам полотна отложения снега в несколько аршин толщиной.

Из сказанного ясно, что природа обладает могущественным средством для отделения газа от пыли, и мы должны только умело воспользоваться этим средством.

Рассмотрим процесс передвижения дюн: струя ветра *a* (фиг. 138) ударяет о поверхность дюны и, поднимая песчинку с весом *c*, принимает направление *b*. Достигнув вершины дюны, струйка *b* ударяется о неподвижный воздух, и скорость ея превращается в два вихря—верхний и нижний, которые продолжают движение струйки *b*, но с небольшой скоростью.

Под влиянием центробежной силы песчинки выходят из сферы вихря и падают вниз, образуя угол естественного откоса подветренной части дюны.

Иногда, под влиянием нижнего вихря, дюна получает ясно выраженный карниз.

На фиг. 139 дана схема работы железнодорожной решетки для защиты пути от снеговых заносов.

Задача устройства этой решетки—осадить снег, увлекаемый ветром.

Решетка исполняет двойную роль:

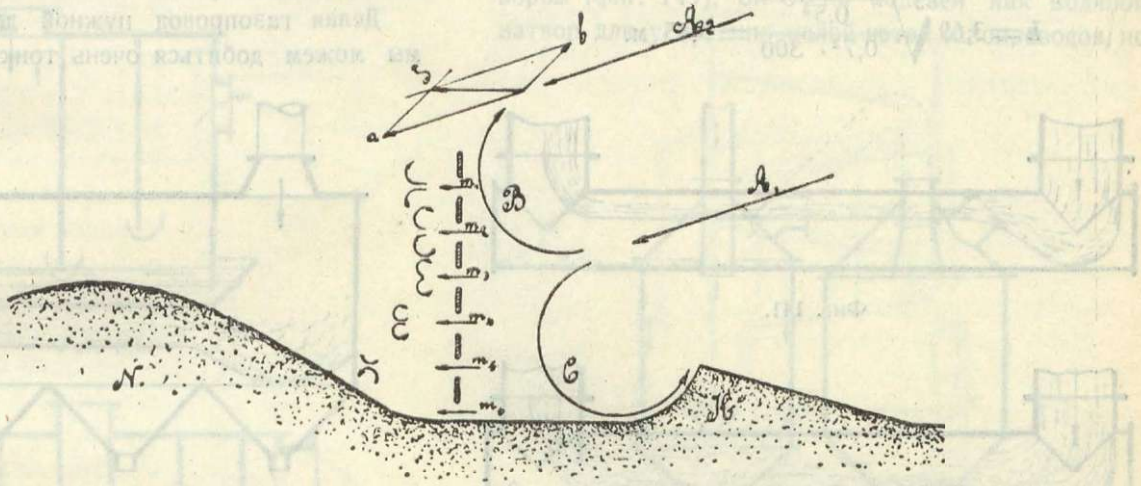
a) Она работает, как обыкновенное препятствие движению ветра, как сплошной забор.

b) Она работает, как сито.

маленькие вихри и отделят от себя снежинки, которые упадут вниз и образуют мощное отложение *N*.

Газоочистители.

Итак, природа учит нас, что в дюнах и в железнодорожных решетках отделение пыли от воздуха производится уничтожением горизонтальной скорости поступательного движения и превращениям ее в скорость движения вихревого.



Фиг. 139.

Рассмотрим результат воздействия на метель сплошного забора.

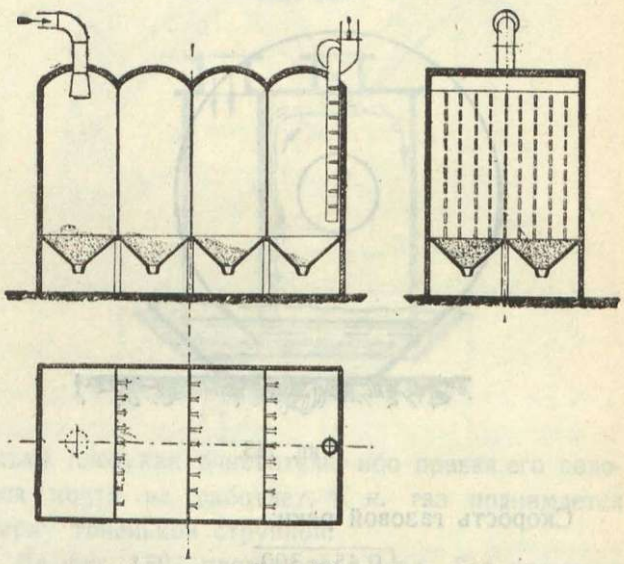
Если A_1, A_2 — струи ветра, то при встрече струи A_1 с забором она породит два вихря: верхний B и нижний C.

Нижний вихрь C дает перед решеткой небольшой надув K, как результат своей встречи со струей вдоль почвы.

Вихрь B складывается со струей A_2 и уклоняет ее кверху, как видно из параллелограмма abd. Снег, несомый вихрем B и струей A_2, переносится через забор. Вот причина, почему железные дороги давно отказались от сплошных заборов и делают решетки.

Всякое препятствие, поставленное на пути воздушной струи A_1, уничтожая ее скорость, превращает эту скорость в давление; отсюда ясно, что если в препятствии будут щели, то через эти щели устремится с большою скоростью воздух, и вихри B и C ослабятся. Таким путем, поставив на пути струи A_1 решетку, мы большую часть струи A_1 преобразуем в мелкие струйки m_1, m_2, m_3, m_4...., разделенные между собой пространствами с неподвижным воздухом, соответствующими доскам решетки.

Мелкие струйки m_1, m_2, m_3 ...., ударяясь о неподвижный воздух за решеткой, превратятся в



Фиг. 140.

Этим явлением можно воспользоваться для устройства газоочистителя. На фиг. 140 изображен газоочиститель, состоящий из ряда камер, разделенных стенками, в которых сделаны узкие щели, превращающие поступательное движение в вихревое, следствием чего является осадка пыли.

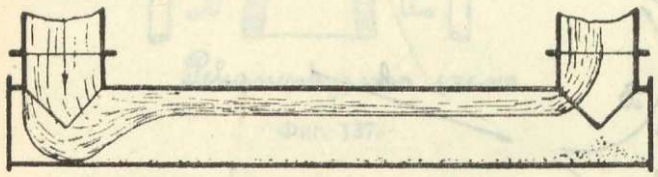
Такие же результаты мы можем получить, замедлив движение газовой струи настолько, что пыль, под действием силы тяжести, опустится на дно газоочистителя.

Самым простым газоочистителем такого типа является длинный горизонтальный газопровод с отводом газа сверху, и настолько большим сечением, что газ не заполняет всего сечения (фиг. 141). При этом на дне газопровода получается мешок холодных газов, в котором может осесть самая тонкая пыль.

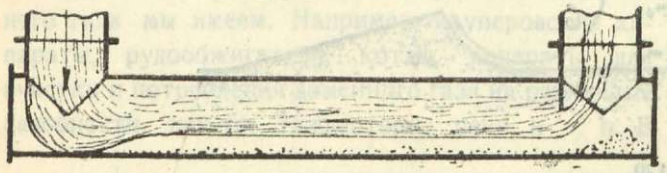
Предположим, что по газопроводу (сечением $0{,}7 \times 1{,}0$ м)[1]) течет 0,5 м³ газа в секунду, нагретого до 300° С.

Высота газослива будет:

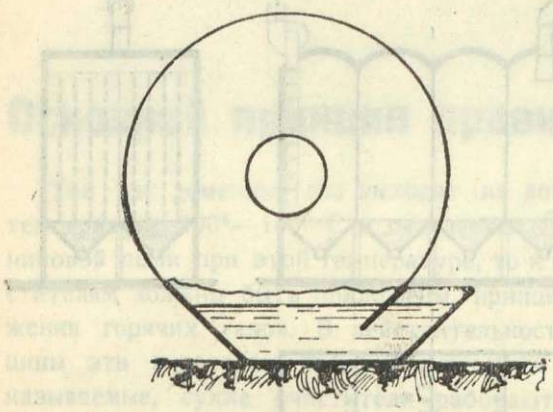
$$h = 3{,}69 \sqrt[3]{\frac{0{,}5^2}{0{,}7^2 \cdot 300}} = 0{,}45 \text{ м}.$$



Фиг. 141.



Фиг. 142.



Фиг. 143.

Скорость газовой реки:

$$v = \sqrt{\frac{0{,}45 \cdot 300}{3{,}69^3}} = 1{,}64 \text{ м/сек}.$$

Но мы имеем все средства понизить эту скорость и увеличить время пребывания газа в трубе, подпрудив газовую реку, подобно тому, как показано на фиг. 142. Сделаем высоту перевальной стенки 0,30 м.

Высота газослива в этом случае будет:

$$h = 3{,}17 \sqrt[3]{\frac{0{,}5^2}{0{,}72 \cdot 300}} = 0{,}38 \text{ м}.$$

Сечение подпруженного газослива будет:

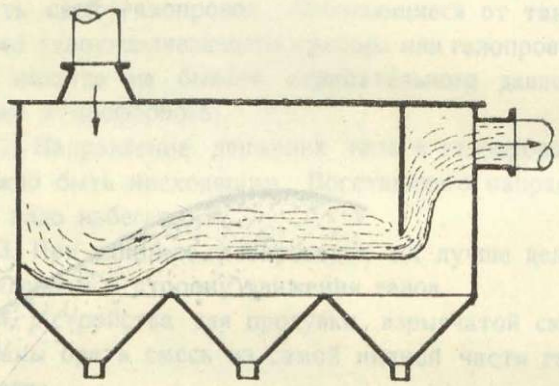
$$\omega = (0{,}30 + 0{,}38) \cdot 0{,}70 = 0{,}476 \text{ м}^2.$$

Скорость газовой реки будет:

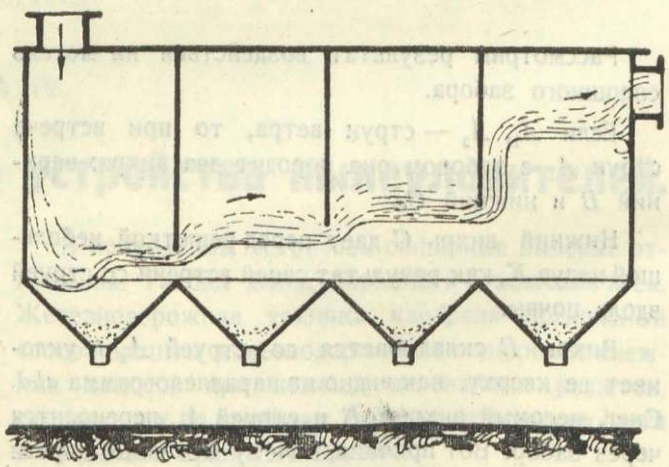
$$v = 0{,}5 : 0{,}476 = 1{,}05 \text{ м/сек},$$

и время пребывания газа в газопроводе, а следовательно время отстаивания пыли увеличится в $1{,}64 : 1{,}05 = 1{,}6$ раз.

Делая газопровод нужной длины и диаметра, мы можем добиться очень тонкой очистки газов.



Фиг. 144.



Фиг. 145.

Здесь дается только метод рассуждения и идея, нужных для практики опытов, ибо пыль, конечно, весьма суб'ективна для генераторов и доменных печей, работающих на различных материалах.

Газоочиститель только-что разобранного типа, но представляющий отдельные устройства, изображен на фиг. 143. В нем пыль, оседающая на дно газопровода, попадает в сосуд с водой и удаляется в щель, сделанную сбоку.

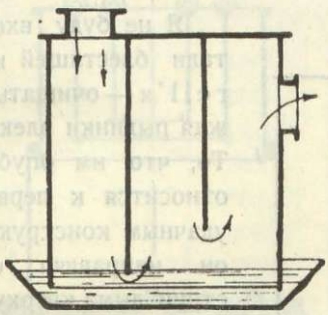
Фиг. 144 представляет правильно спроектированный очиститель.

Скорость, с которой вступают газы в очиститель, должна быть пропорционирована так, чтобы

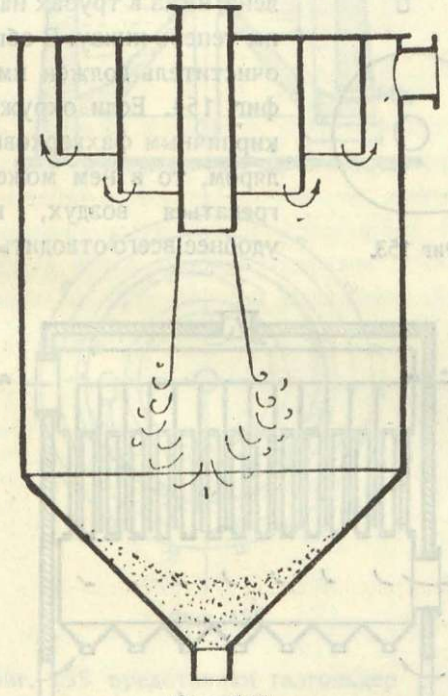
[1]) Здесь приведен пример расчета прямоугольного газопровода, т. к. высота газослива, ограниченного сверху окружностью, благодаря отсутствию опытных коэффициентов, не поддается расчету.

фонтан, направленный вниз, не коснулся бы дна газоочистителя; в конце камеры сделана перевальная стенка, благодаря которой струя в газосливе освободится от значительной части пыли, захваченной из первого отделения газоочистителя.

Число таких газосливов полезно увеличивать, как это показано на фиг. 145, 146 и 147. При небольшой высоте газослива очистка газа должна быть весьма совершенной. Устройства эти прежде своего осуществления должны быть предметом изыскания в аэродинамических лабораториях, посвя-



Фиг. 146.



Фиг. 147.

щенных вопросам газоочистителей и разработкой идей устройств, возможных с точки зрения гидравлической теории.

Очень хорошее устройство представляет газоочиститель фиг. 148. Фонтан теплого газа, направленный вниз, не достигает дна пылеуловителя. Глубину погружения этого фонтана можно вычислить на основании формулы И. Есьмана (см. стр. 26).

$$H = \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{273 + t_н}{t_э - t_н}$$

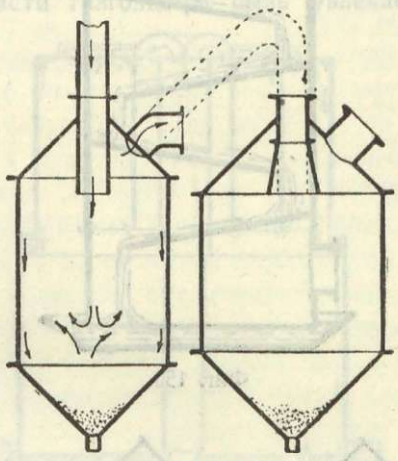
примем $t_э = 200°$ C ; $t_н = 100°$ C

$$v = \frac{\text{об'ем газа при } 200°\text{ C}}{\text{сечение патрубка газопр.}} = \sim 4 \text{ м/сек.}$$

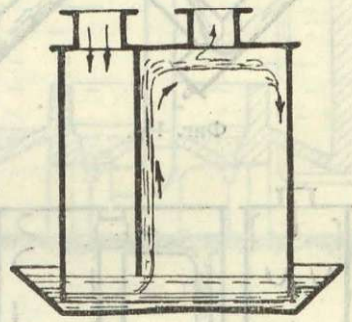
тогда $H = \frac{4^2}{2g} \frac{273 + 100}{200 - 100} = 3$ м.

Сделав высоту барабана около 5 м мы, вполне обеспечим себя от удара струи о дно газоочистителя. Если поставить ряд таких барабанов, то можно получить очень хорошую очистку.

Очень часто делают очиститель с водяным затвором (фиг. 149); он очень полезен как водяной затвор для уединения целой ветви газопроводов, но



Фиг. 148.



Фиг. 149.

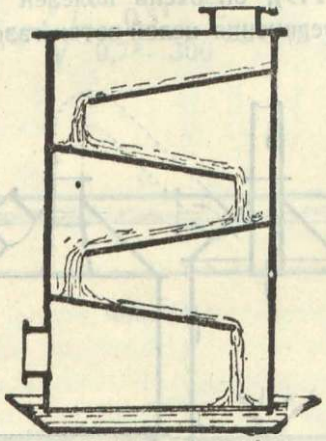
весьма плох, как очиститель, ибо правая его половина почти не работает, т. к. газ поднимается кверху тоненькой струйкой.

На фиг. 150—промыватель газа. Газ проходит под полками с водой, с значительно меняющейся скоростью. Едва ли можно достигнуть смачивания всей поверхности сделанных ступенек. Если бы это удалось, то, конечно, вода могла бы смывать пыль с полок, и очиститель работал бы порядочно. Обыкновенно же он работает очень плохо. В одном таком очистителе я снял все полки и превратил его в тип фиг. 144, и он стал работать без воды гораздо лучше.

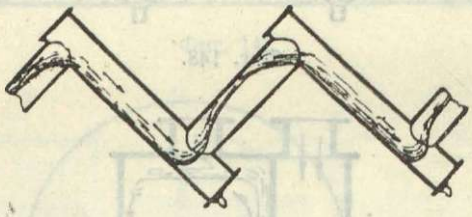
Совершенно не заслуженной популярностью пользуется газопровод из колен под углом в 45° к

горизонту (фиг. 151). Совершенно очевидно, что в восстающем колене мы будем иметь очень тонкую струйку газов весьма большой скорости, при которой осадка пыли невозможна. В нисходящих коленах теплый газ идет полной струей и опять-таки осадка мелкой пыли делается невозможной.

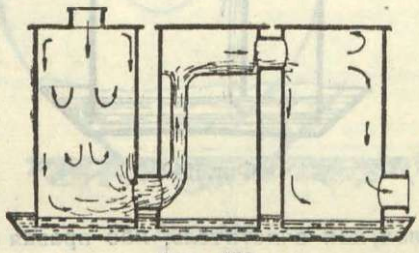
Ни сколько не лучше еще более популярное устройство газоочистителей в виде трех барабанов (фиг. 152) с переменным направлением газа вверх и вниз. В первом барабане осадке тонкой пыли мешает отвод газа с уровня воды; вместе с газом



Фиг. 150.



Фиг. 151.

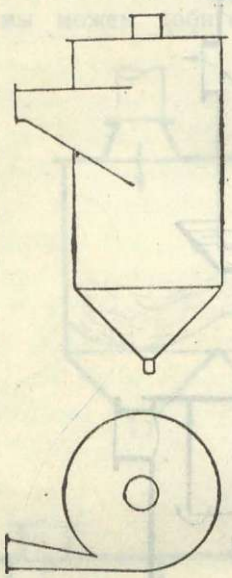


Фиг. 152.

увлекается и тонкая пыль. Во втором барабане получается тонкая струйка поднимающегося кверху теплого газа. В остальном пространстве получается очень слабая циркуляция газа, вследствие лучеиспускания стенок барабана, в которой принимает участие ничтожное количество газа. Остальной газ проходит в третий барабан, осадка в котором так же мала, как и в первом.

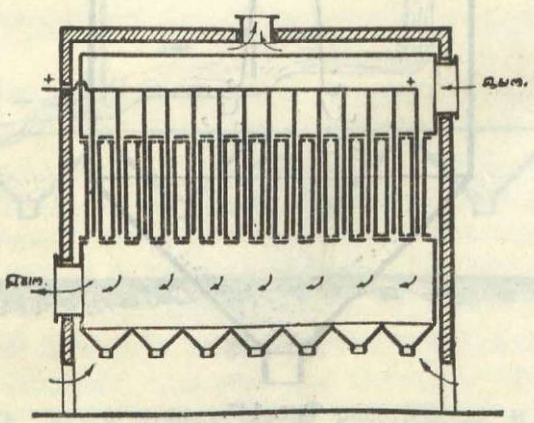
Из газоочистителей, работающих на других, кроме описанного, принципах необходимо отметить газоочиститель с центробежной очисткой, и идею Cottrell'я очистки газа в электрическом поле.

Фиг. 153 представляет тип газоочистителя с центробежной очисткой. Доменный газ подводится по касательной узкой щелью. Газ движется горизонтально вдоль круглых стен барабана, пыль направляется по винтовой линии книзу, а теплый газ кверху. Лучеиспускание стенок дает у стен слой холодных газов, стремящийся книзу и облегчающий пыли ее падение. Газ отводится из центра верхней крышки барабана. Идея такого барабана родилась среди моих учеников в заводе Юза, Екатеринославской губ. Очиститель был построен и осаждал много пыли.



Фиг 153.

Я не буду входить в детали блестящей идеи Cottrell'я — очищать газ, заряжая пылинки электричеством. То, что им опубликовано [1]), относится к первым его неудачным конструкциям, когда он направлял остывающие струи дыма кверху. Конструкция оказалась неудачной, и по имеющимся сведениям исправлена, и газ в трубах направлен им теперь книзу. В общем, его очиститель должен иметь вид фиг. 154. Если окружить его кирпичным фахверковым футляром, то в нем может подогреваться воздух, который удобнее всего отводить кверху.



Фиг. 154.

Газгольдеры.

Употребление газов доменных и коксовальных печей только тогда вступает в фазу серьезно поставленного дела, когда газы будут собираться в газгольдеры, и из них уже будут направляться в мартеновские и другие печи.

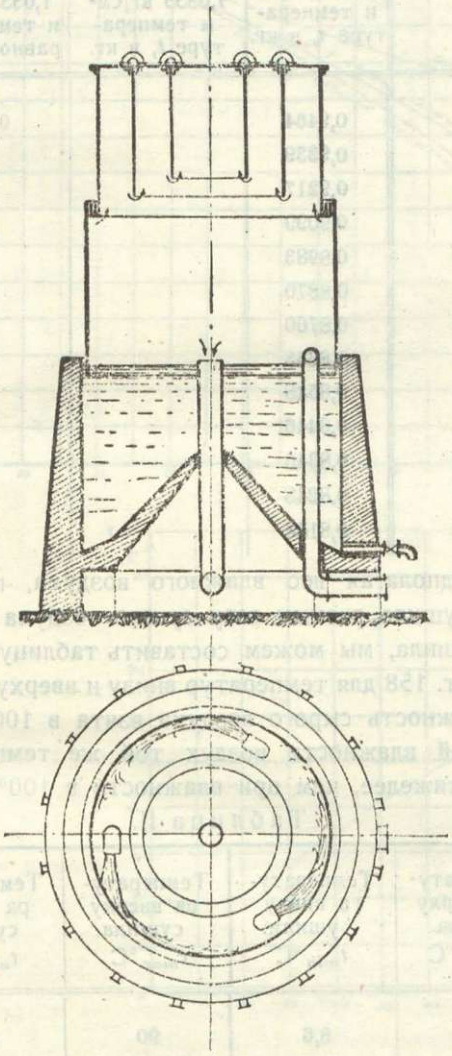
---

[1]) См. Ж. Р. М. О. 1914, II 257 и Met. und Erz, XI (II), 1914, 22 Apr. 257—278.

Емкость газгольдеров должна быть расчитана так, чтобы в случае уханья калош на доменной печи, смены фурм или других аварий, можно было бы закончить плавку.

Следовательно, запас газа должен быть по крайней мере на 2 — 3 часа, откуда следует, что газ должен находиться в газгольдере 2—3 часа.

Это время достаточное для самой тонкой очистки газа при помощи простого отстаивания, если только газгольдер был построен правильно.



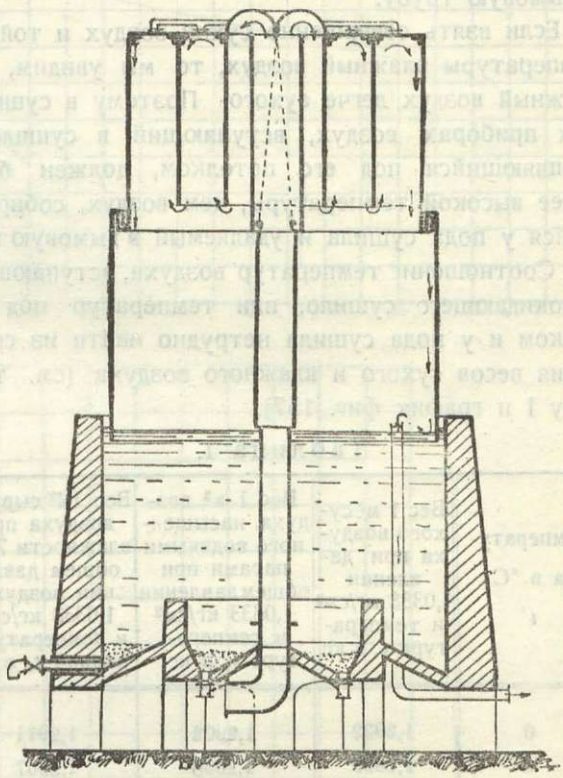
Фиг. 155.

На фиг. 155 представлен газгольдер с центробежной очисткой газа. На фиг. 156 с очисткой газа фонтаном, направленным вниз, и газосливами.

В первом типе горячая струя, следующая круглой стенке газгольдера, борется с нисходящими холодными струйками, падающими вниз, вследствие лучеиспускания стенок газгольдера и попадают последовательно в три мешка горячих газов, переливаясь из одного в другой и последовательно очищаясь от пыли.

Отвод газа происходит из центра газгольдера на уровне его водяной поверхности. Таким образом, отвод газа происходит в самом низу газгольдера, но так как над газоотводной трубой находится чистый газ без пыли, то опасности засорения газа не существует. Диаметр центрального мешка горячих газов сделан мною равным $^1/_3$ диаметра газгольдера или $^1/_9$ емкости верхнего барабана; следовательно, $^8/_9$ емкости всегда полезно работают над очищением газа от пыли.

Газгольдер фиг. 156 построен на принципе полного согласия движения пыли с конвекционными потоками, происходящими от лучеиспускания. Горячие газы проводятся, при помощи центральной телескопной трубы в купол газгольдера, и опрокидываются фонтанами вниз. Затем газосливами направляются к периферии газгольдера, при чем во внешней части газгольдера пыль увлекается вниз



Фиг. 156.

конвекционными потоками. Газ отводится из газгольдера при помощи двух-трех труб, расположенных в некотором расстоянии от внешней стенки газгольдера, посредине внешнего мешка горячих газов, как места, наиболее чистого от пыли.

Из двух описанных конструкций газгольдеров лучше, вероятно, будет вторая. Во всяком случае обе эти конструкции должны быть проверены на практике.

Мне кажется, что газгольдеры такого устройства могут вполне заменить очистку газа в приборах Тейснера.

Бассейн, в который спускается колокол газгольдера, будет заполняться пылью. Придавая его дну показанную на фиг. 155 и 156 форму, мы можем спустить из газгольдера весь шлам, оседающий на его дне.

ГЛАВА V.

Основы правильной конструкции сушил.

Теория сушки.

Быстрая и равномерная сушка легко осуществляется, когда подвергающиеся сушке предметы совершенно равномерно омываются потоком сухого теплого воздуха. Это возможно только в том случае, когда потоку теплого легкого воздуха будет дано нисходящее направление, остывший же тяжелый, влажный воздух будет удаляться снизу в дымовую трубу.

Если взять совершенно сухой воздух и той же температуры влажный воздух, то мы увидим, что влажный воздух легче сухого. Поэтому в сушильных приборах воздух, вступающий в сушило и скопляющийся под его потолком, должен быть более высокой температуры, чем воздух, собирающийся у пода сушила и удаляемый в дымовую трубу. Соотношение температур воздуха, вступающего и покидающего сушило, или температур под потолком и у пода сушила нетрудно найти из сравнения весов сухого и влажного воздуха (см. таблицу I и график фиг. 157).

Таблица I.

Температура в °C. t	Вес 1 м³ сухого воздуха при давлении 1,0333 кг/см² и температуре t, в кг.	Вес 1 м³ воздуха, насыщенного водяными парами при общем давлении 1,0333 кг/см² и температуре t, в кг.	Вес 1м³ сырого воздуха при влажности 75% общем давлении воздуха 1,0333 кг/см² и температуре равной t, в кг.
0	1,2932	1,2902	1,2911
5	1,2699	1,2658	1,2667
10	1,2475	1,2418	1,2431
15	1,2258	1,2181	1,2200
20	1,2049	1,1946	1,1972
25	1,1847	1,1709	1,1743
30	1,1651	1,1469	1,1514
35	1,1462	1,1224	1,1285
40	1,1279	1,0973	1,1050
45	1,1102	1,0710	1,0808
50	1,0930	1,0431	1,0559
55	1,0763	1,0135	1,0294
60	1,0601	0,9825	1,0022
65	1,0445	0,9484	0,9727
70	1,0292	0,9111	0,9410
75	1,0144	0,8710	0,9071
80	1,0001	0,8267	0,8703
85	0,9861	0,7774	0,8298
90	0,9725	0,7241	0,7865
95	0,9593	0,6639	0,7379
100	0,9464		0,6858
105	0,9339		
110	0,9217		
115	0,9099		
120	0,8983		
125	0,8870		
130	0,8760		
135	0,8653		
140	0,8548		
145	0,8446		
150	0,8346		
155	0,8248		
160	0,8153		

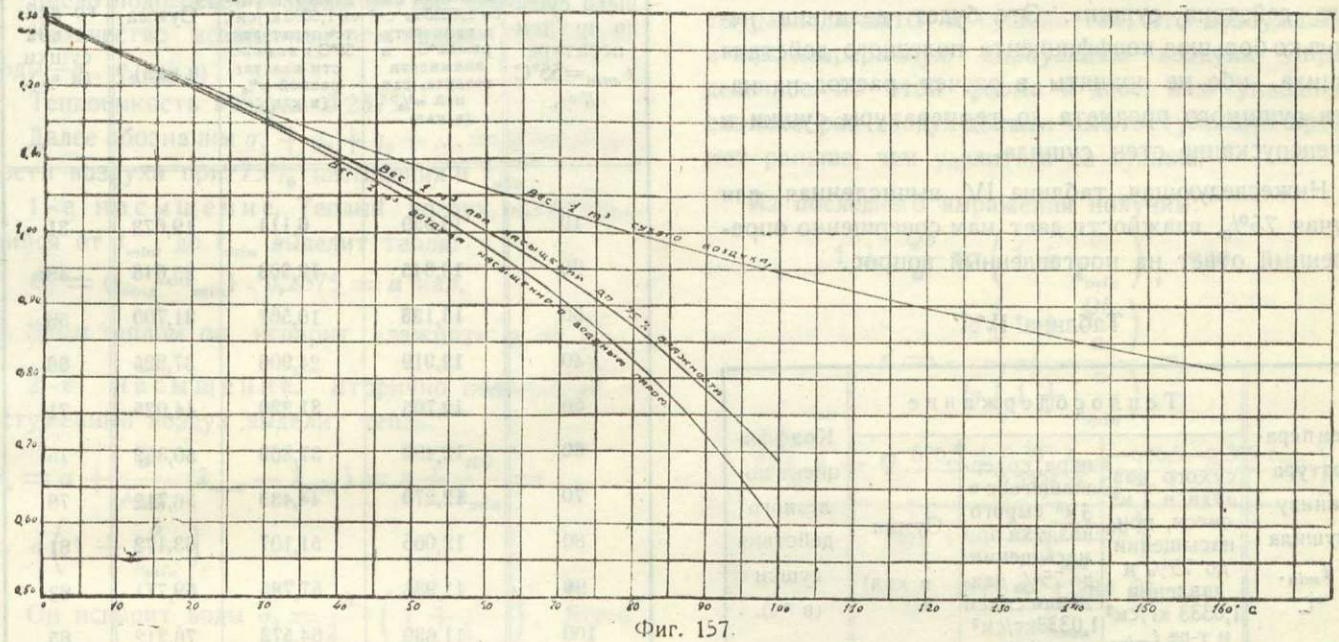
Предполагая вес влажного воздуха, покидающего сушило, равным весу сухого воздуха под сводом сушила, мы можем составить таблицу II и график фиг. 158 для температур внизу и вверху сушила.

Влажность сырого воздуха взята в 100%. При меньшей влажности воздух той же температуры будет тяжелее, чем при влажности в 100%.

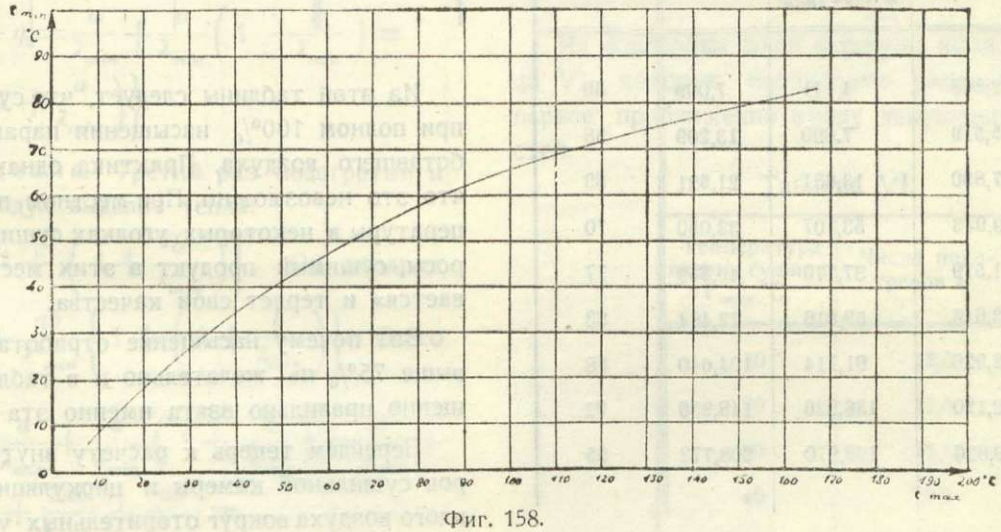
Таблица II.

Температура вверху сушила. t_{max} °C	Температура внизу сушила. t_{min} °C	Температура вверху сушила. t_{max} °C	Температура внизу сушила. t_{min} °C
10	8,6	90	61,6
15	13,4	95	63,5
20	17,9	100	65,3
25	22,2	105	67,0
30	26,3	110	68,6
35	30,2	115	70,2
40	33,9	120	71,7
45	37,4	125	73,1
50	40,7	130	74,4
55	43,9	135	75,7
60	46,9	140	76,9
65	49,7	145	78,1
70	52,4	150	79,2
75	54,9	155	80,2
80	57,3	160	81,2
85	59,5		

В руководствах по сушке продуктов сельского хозяйства, дерева и проч. материалов обыкновенно указывается максимальная температура сушки, когда продукт начинает портиться. Если принять эту температуру за температуру вступающего в сушило теплого воздуха или температуру у потолка сушила, или температуру влажного воздуха, покидающего сушило. Если насыщение воздуха влажностью меньше 100%, то такой полусырой воздух при этой температуре тяжелее воздуха, достигшего полной влажности и, следовательно, тоже опустится на под сушила и не нарушит правильности его работы.



Фиг. 157.



Фиг. 158.

сушила, то по кривой (график фиг. 158) нетрудно найти температуру воздуха внизу, при 100% влажности, одинакового с верхним удельного веса.

Таким образом, мы найдем температуру у пода

Вот некоторые, взятые из руководств температуры сушки и найденные указанным путем температуры воздуха, вступающего t_{max} и покидающего t_{min} сушило.

Таблица III.

Предметы сушки.	t_{max}°C	t_{min}°C	Предметы сушки.	t_{max}°C	t_{min}°C
Дрова	160	81,2	Картоф., овощи, фрукты	90	61,6
Мелкий лес	90	61,6	Крахмал	50	40 7
Крупный лес	50	40,7	Яйца	50	40,7
Столярный лес	40	33,9	Мясо	40	33,9
Хлеб на помол	75	54,9	Ткани	50	40,7
„ „ посев	55	43,9	Шелк	130	74,5
Кожа хром	60	46,9	Макароны	50	40,7
„ юфть	35	30,2	Сахар	130	74,5
„ подошв.	25	22,2			

Найдя распределение температур внутри сушила, решим вопрос о наивыгоднейшей температуре воздуха, покидающего сушило.

Назовем соотношение между количеством тепла в паре влажного воздуха ко всему количеству тепла во влажном воздухе—«коэффициентом полезного действия сушки». Это будет величина несколько большая коэффициента полезного действия сушила, ибо не приняты в расчет расход на нагрев сушимого предмета до температуры сушки и лучеиспускание стен сушила.

Нижеследующая таблица IV, вычисленная для случая 75%, влажности дает нам совершенно определенный ответ на поставленный вопрос.

Таблица IV.

Температура внизу сушила t_{min}. °C	Теплосодержание			Коэффициент полезного действия сушки (в %).
	сухого воздуха в 1 м³ смеси, при насыщении до 75% и давлении 1,0333 кг/см² и т-ре t_{min}.	пара, содержащегося в 1м³ сырого воздуха при насыщении до 75%, давлении смеси 1,0333кг/см² и т-ре t_{min}.	Сумма в кал)	
10	2,868	4,141	7,009	59
20	5,519	7,690	13,209	58
30	7,890	13,631	21,521	63
40	9,943	53,107	33,050	70
50	11,579	37,770	49,349	77
60	12,648	59,816	72,464	83
70	12,926	91,714	104,640	88
80	12,120	136,826	148,956	92
90	9,826	198,910	208,772	95

Полезный коэффициент сушки тем выше, чем выше температура воздуха, покидающего сушило, конечно при условии возможного насыщения воздуха влагой.

Такое парадоксальное решение этого вопроса происходит вследствие весьма быстрого увеличения влагоемкости сухого воздуха с повышением температуры.

Само собой понятно, что коэффициент полезного действия сушки тем выше, чем больше степень влажности отработавшего воздуха. Вычислим для примера зависимость коэффициента полезного действия сушки от степени влажности отработавшего воздуха при $t_{min} = 55°C$. Получим следующую таблицу (V).

Таблица V.

Относительная влажность воздуха, покидающего сушило при температуре $t_{min} = 55°C$. K%.	Теплосодержание		Сумма (в кал).	Коэффициент полезного действия сушки (в %).
	воздуха в смеси, при общем давлении смеси 1,0333 кг см² о температуре=55°C, и влажности воздуха, равной n% (в кал).	пара в смеси, при общем давлении смеси 1,0333 кг/см², температуре=55°C и влажности воздуха, равной n% (в кал).		
10	13,559	6,114	19,673	31
20	13,345	12,303	25,648	48
30	13,133	18,567	31,700	58
40	12,919	24,906	37,825	66
50	12,705	31,320	44,025	71
60	12,493	37,869	50,362	75
70	12,279	44,433	56,712	78
80	12,065	51,107	63,172	81
90	11,986	57,785	69,771	83
100	11,639	64,573	76,212	85

Из этой таблицы следует, что сушить выгоднее при полном 100% насыщении парами воды отработавшего воздуха. Практика однако показывает, что это невозможно. При местном понижении температуры в некоторых уголках сушила ниже точки росы, сушимый продукт в этих местах «распаривается» и теряет свои качества.

Вот почему насыщение отработавшего воздуха выше 75% не желательно и в таблице IV совершенно правильно взята именно эта влажность.

Перейдем теперь к расчету внутренних размеров сушильной камеры и циркуляции потоков теплого воздуха вокруг отопительных устройств и сушимых предметов.

Обозначим температуру входящего сухого воздуха или максимальную температуру сушки t_{max}.

Температуру отработавшего сухого воздуха t_{max}.

Полное теплосодержание пара

при t_{max} . . . . . λ_{max} [1])

t_{min} . . . . . λ_{min}

$$\lambda_{max} - \lambda_{min} = b.$$

[1]) λ предположим зависящим только от температуры и равным : $\lambda = 606{,}5 + 0{,}305\,t$. Это предположение неточно, так как λ кроме того зависит и от давления, но введение поправки настолько усложняет нижеследующие выводы, что приходится жертвовать точностью для получения удобной для расчетов формулы.

Количество тепла выделяемое воздухом и паром при первом охлаждении

от t_{max} до t_{min} . . . . . Θ_1

при втором . . . . . Θ_2

„ третьем . . . . . Θ_3 и т. д.

Число подогревов воздуха внутри сушила . . n.

Количество испаренной при каждом подогреве воды—q_1, q_2 q_3.... ;

Теплоемкость воздуха 0,2375.

Далее обозначим $q_1 + q_2 + q_3 + ... = Q =$ влажности воздуха при 75% насыщения и t_{min}

1-е насыщение. Теплый воздух, охлаждающийся от t_{max} до t_{min} выделит тепла:

$\Theta_1 = (t_{max} - t_{min}) \cdot 0{,}2375 = a$ кал.

Этим теплом он испарит влажноти: $q_1 = \frac{a}{\lambda_{min}}$

2-е насыщение. Вторично подогретый и остуженный воздух выделит тепла:

$$\Theta_2 = a + \frac{a}{\lambda_{min}}(\lambda_{max} - \lambda_{min}) = a + \frac{ab}{\lambda_{min}} = a\left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right).$$

Он испарит воды $q_2 = \frac{a}{\lambda_{min}}\left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right)$. Всего воды в нем $q_1 + q_2 = \frac{a}{\lambda_{min}} + \frac{a}{\lambda_{min}}\left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right) = \frac{a}{\lambda_{min}}\left\{1 + \left(1 + \frac{a}{\lambda_{min}}\right)\right\}$.

3-е насыщение. Третий раз подогретый и охлажденный воздух выделит тепла:

$\Theta_3 = a + \frac{ab}{\lambda_{min}}\left\{1 + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right)\right\}$. Он испарит воды $q_3 = \frac{a}{\lambda_{min}} + \frac{ab}{\lambda^2_{min}}\left\{1 + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right)\right\}$. Всего воды в нем:

$$q_1 + q_2 + q_3 = \frac{a}{\lambda_{min}} + \frac{a}{\lambda_{min}}\left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right) + \frac{a}{\lambda_{min}} + \frac{2ab}{\lambda^2_{min}} + \frac{ab^2}{\lambda^3_{min}} =$$

$$= \frac{a}{\lambda_{min}}\left\{1 + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right) + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right)^2\right\}.$$

. . . . . + . . .

. . . . . .

. . . . . .

n-е насыщение. n—раз подогретый и охлажденный воздух будет заключать влажности:

$$Q = \frac{a}{\lambda_{min}}\left\{1 + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right) + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right)^2 + . .\right.$$

$$\left. . . . . + \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right)^{n-1}\right\} =$$

$$\frac{a}{\lambda_{min}}\left\{\frac{\left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right)^n - 1}{\left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right) - 1}\right\} = \frac{a}{b}\left\{\left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right)^n + 1\right\}.$$

n есть число насыщений, нужное для достижения принятой влажности, т.-е. число подогревов, которые должен испытать воздух, чтобы насытиться влагой до степени 75% его влажности ранее, чем выйти из сушила.

Ниже мы увидим, что нагревательные аппараты располагаются в сушиле так, что возбуждают в нем непрерывную циркуляцию воздуха. Определенное по этой форме n дает нам указание, сколько раз воздух должен омыть сушимый предмет раньше, чем удалиться из сушила.

Из последнего выражения получим:

$$1 + \frac{Qb}{a} = \left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right)^n, \text{ или}$$

$$n = \frac{lg\left(1 + \frac{Qb}{a}\right)}{lg\left(1 + \frac{b}{\lambda_{min}}\right)} =$$

$$= \frac{lg\left(1 + Q\,\frac{606{,}5 + 0{,}305\,t_{max} - 606{,}5 - 0{,}305\,t_{min}}{0{,}2375\,(t_{max} - t_{min})}\right)}{lg\left(1 + \frac{\lambda_{max} - \lambda_{min}}{\lambda_{min}}\right)} =$$

$$= \frac{lg\,(1 + 1{,}284\,Q)}{lg\,\frac{\lambda_{max}}{\lambda_{min}}}$$

На основании этой формулы вычислена таблица VI, которую необходимо рассматривать как первое приближение в виду допущенных неточностей.

Таблица VI.

Температура вверху сушила t_{max} °C.	Число подогревов n.
10	12,0
20	11,5
30	11,1
40	10,7
50	10,3
60	9,9
70	9,6
80	9,4
90	9,2
100	9,0
110	8,8
120	8,6
130	8,4
140	8,2
150	8,1
160	8,0

Таким образом, мы получаем, что в сушиле воздух циркулирует от 8 до 12 раз, постепенно насыщаясь влажностью. Перед последним подогревом в воздухе содержится от $^{7}/_{8}$ до $^{11}/_{12}$ установленной нами влажности в 75%, т.-е. 68,5 и 65,5%. После последнего подогрева относительная влажность воздуха естественно будет меньше, при чем при t_{max} большем 100°C, воздух будет в состоянии вынести любое количество пара. Припоминая, что подогретый воздух находится под сводом сушила, а холодный, при температуре t_{min}, на поду сушила, мы приходим к выводу, что сушка внизу и вверху сушила будут существенно различны; вверху сушила осуществляется сушка более резкая, внизу более мягкая.

Некоторые материалы, например бездымный порох, при резкой сушке дают корочку, которая не гигроскопична и потому тормозит успешность сушки. Центральные волокна пороха просыхают в этом случае очень медленно. В сушилах однократного насыщения поэтому к теплому воздуху прибавляют пар: обыкновенно же один и тот же воздух прогоняют через нагревательный прибор много раз, обращая сушило в сушило многократного насыщения с принудительным движением воздуха при помощи вентилятора.

Эту разнохарактерность сушки вверху и внизу сушила многократного насыщения с естественной циркуляцией должно учитывать при отвественной сушке, например, сушке семенного хлеба. Понижение всхожести семян есть следствие спутанности наших понятий о работе сушил и поэтому малой изученности условий наиболее благоприятной сушки, сохраняющей всхожесть семян. То же касается сушки дерева, которая вообще плохо удается.

При сушке разнохарактерных керамических изделий нагрузка сушила должна учитывать разный характер сушки внизу и вверху.

Другим недостатком сушки является запаривание материала, т.-е. конденсация паров воды на вновь введенном в сушила холодном сыром материале. В табл. VII в последней графе помечена точка росы циркулирующего в сушиле воздуха. При введении в атмосферу теплого воздуха холодного предмета на его поверхности, конечно, будет садиться роса.

Если, например, в коридорное сушило для столярного леса ввести с мороза вагон, то очевидно весь лес покроется росой. Этот недостаток можно ослабить, если приемную часть сушила, куда вводится вагон с холодным сырым материалом, снабжать более значительным числом нагревательных приборов и сюда же вводить наружный воздух. Дымовой канал сушила правильнее располагать ближе к тому концу коридора, через который вагоны с сухим лесом выводятся наружу. Таким образом цифры и логика убеждают нас, что в сушилах многократного насыщения принцип обратного течения не должен иметь места.

Таблица VII.

Температура вверху сушила t_{max}	Температура внизу сушила t_{min}	Число подогревов воздуха внутри сушила n.	Приблизительная влажность воздуха перед последним подогревом при температуре $=t_{min}$.	Точка росы °C
20	17,9	11,5	68,5	13
30	26,3	11,1	68,2	21
40	33,9	10,7	68,0	28
50	40,7	10,3	67,7	34
60	46,9	9,9	67,5	40
70	52,4	9,6	67,3	45
80	57,3	9,4	67,1	50
90	61,6	9,2	66,9	54
100	65,3	9,0	66,7	58
110	68,6	8,8	66,5	62
120	71,7	8,6	66,3	65
130	74,4	8,4	66,1	68
140	76,9	8,2	65,9	71
150	79,2	8,1	65,7	73
160	81,2	8,0	65,5	75

Для того, чтобы ослабить явление запаривания, необходимо так располагать материал для сушки, чтобы он нагревался возможно скорее.

Это достигается таким его расположением, чтобы вертикальная циркуляция воздуха могла бы осуществляться беспрепятственно. Дрова надо ставить вертикально; так же вешать ткани; решета надо располагать стопами с широкими промежутками между этими последними.

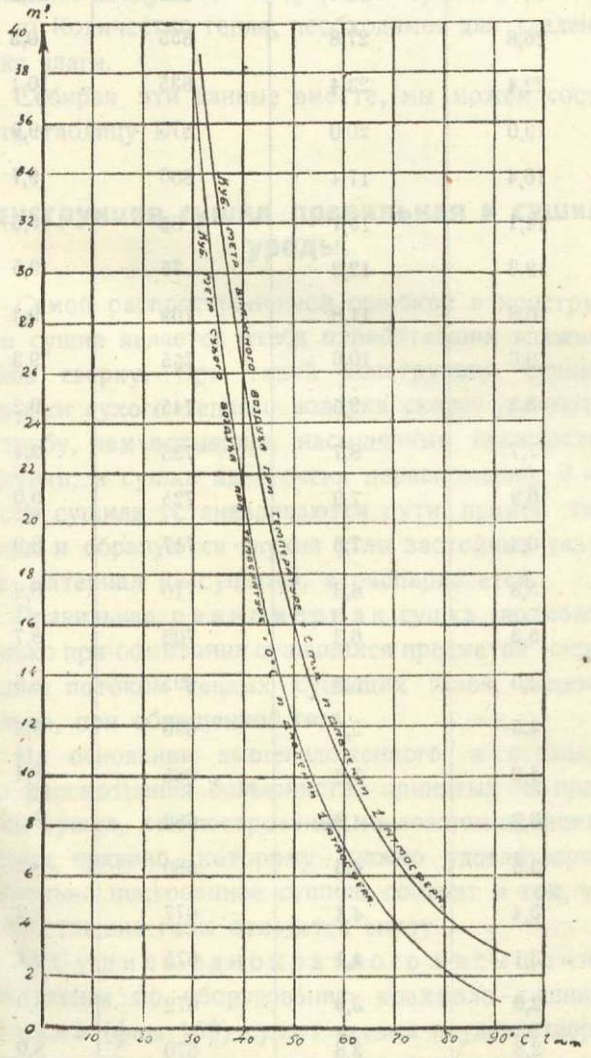
Плотное расположение материалов, подвергающихся сушке, трудная проницаемость их для вертикальной циркуляции, неправильное расположение отопительных устройств способствует запариванию и порче материалов, подвергающихся сушке.

Выяснив работу воздуха в сушилах, подсчитаем какое количество воздуха необходимо для полного удаления влаги из сушила.

В результате подсчетов мы получим табл. VIII, которая служит основанием для графика фиг. 159. На основании этих кривых, зная из таблицы II, t_{min} легко найти количество воздуха всту-

Таблица VIII.

Температура у пода сушила. t_{min} (в °С.)	Колич. сухого воздуха которое необходимо доставить в сушило для удаления 1 кг. влаги, если температура внизу сушила равна t_{min} и относительная влажность удаляемого воздуха равна 75%.		Колич. влажного воздуха, которое необходимо удалить из сушила при удалении 1 кг. влаги, если температура внизу сушила равна t_{min} и относительная влажность удаляемого воздуха равна 75%.	
	Кг.	Кубических метров при 0°С и давление в 1 атм.	Кг.	Кубических метров при температуре t_{min} и давлении в 1 атм.
10	177	137	178	143
20	91,8	71,0	92,8	77,5
30	49,7	38,4	50,7	44,1
40	27,9	21,6	28,9	26,1
50	16,0	12,4	17,0	16,1
60	9,28	7,18	10,28	10,26
70	5,34	4,13	6,34	6,73
80	2,95	2,28	3,95	5,54
90	1,47	1,14	2,47	3,15



Фиг. 159.

пающего в сушило и удаляемого из сушила, т.-е. основы для расчета нагнетательного или всасывающего вентилятора или другого прибора, например, дымовой трубы. Для расчета отопительных устройств можно воспользоваться столбцом 4 таблицы IV (стр. 66). Прибавив расход тепла на лучеиспускание, мы получим количество тепла, которое необходимо доставить в сушило.

Таким образом, мы пришли к следующим выводам:

1. Для того, чтобы увлажнить воздух в сушильной камере до 75% он должен быть подогрет от 8 до 12 раз.

2. После каждого подогрева теплый воздух подымается к потолку сушильной камеры и, насыщаясь парами воды, стынет и опускается к поду сушила.

3. Внутри сушила происходит циркуляция: сверху вниз подогретого и стынущего, снизу вверх подогреваемого воздуха.

4. Для того, чтобы возбудить такую вертикально направленную циркуляцию воздуха внутри сушила, отопительные приборы надо расположить вертикально, лучше всего придав им вид вертикальных жаровых, или труб водяного или парового отопления.

5. Вертикальная поверхность жаровых труб возбуждает вдоль нее вертикальные конвекционные потоки горячего воздуха, наполняющего сушило, и дает импульс циркуляции.

6. Сушимые предметы тоже необходимо располагать вертикально или вертикальными стопами. Так надо располагать дрова в сушиле для дров. Вертикальными стопами надо располагать решета для сушки овощей, полки для сушки кирпича и т. д.

Таким образом выясняются главные основания правильной конструкции сушил;

а) вертикальное расположение отопительных устройств и такая их конструкция, которая способствовала бы возбуждению вертикальных конвекционных потоков нагреваемого воздуха.

в) такое же расположение сушимых предметов, которое способствовало бы созданию в полости сушила между сушимыми предметами вертикальных нисходящих потоков остывших газов.

7. Количество циркулирующего воздуха в 8—12 раз должно превосходить секундный расход теплого влажного воздуха, определяемого по таблице VIII.

8. Скорости циркуляции не должны быть велики, ибо импульс всей циркуляции дается разностью весов воздуха при t_{min} и t_{max}, т.-е. величиной весьма незначительной. Поэтому вертикальные циркуляционные каналы должны быть широки и расчитаны в зависимости от об'ема циркулирующих газов.

9. Расход тепла на нагрев сушимых материалов и лучеиспускание должны быть по возможности меньше. Покрыть этот расход можно двумя путями: а) располагая отопительные устройства у стен сушила, и делая достаточный промежуток между потолком и сушимыми предметами, можно несколько поднять температуру t_{max}, в расчете на то, что воздух, омывая наружные стены, успеет остыть раньше, чем придет в соприкосновение с сушимыми предметами, б) другой путь — это настолько увеличить число циркуляций, чтобы покрыть расход на лучеиспускание.

Таблица IX.

Максимальная допустимая температура сушки. t_{max} °C	Температура отходящего сырого воздуха. t_{min} °C	Вес 1 м³ воздуха при насыщении его водяными парами до 75%, температуре t_{min} и давлении 1,0333 кг/см². в кг.	Вес 1 м³ сухого воздуха при температуре t_{max} и давлении 1,0333 кг/см². в кг.	Число кг сухого воздуха, необходимое для удаления 1 кг влаги при насыщении воздуха до 75%. в кг.	Число кг сырого воздуха, удаляемого из сушила при удалении 1 кг влаги, насыщающей воздух до 75%. в кг.	Тепло, необходимое для удаления 1 кг влажности из сушила при насыщении воздуха до 75%. кал.	Число подогревов воздуха внутри сушила.
20	17,9	1,2068	1,2049	110	111	1050	11,5
25	22,2	1,1871	1,1847	83	84	1010	11,3
30	26,3	1,1683	1,1651	66	67	975	11,1
35	30,2	1,1734	1,1462	49		940	10,9
40	33,9	1,1335	1,1279	41	42	910	10,7
45	37,4	1,1172	1,1102	34	35	880	10,5
50	40,7	1,1016	1,0930	26,8	27,8	855	10,3
55	43,9	1,0861	1,0763	22,4	23,4	835	10,1
60	46,9	1,0713	1,0601	19,0	20,0	815	9,9
65	49,7	1,0574	1,0445	16,4	17,4	800	9,7
70	52,4	1,0363	1,0292	14,1	15,1	85	9,6
75	54,9	1,0297	1,0144	12,3	13,3	75	9,5
80	57,3	1,0169	1,0001	10,8	11,8	765	9,4
85	59,5	1,0049	0,9861	9,6	10,6	755	9,3
90	61,6	0,9928	0,9725	8,5	9,5	745	9,2
95	63,5	0,9816	0,9593	7,7	8,7	735	9,1
100	65,3	0,9708	0,9461	6,9	7,9	725	9,0
105	67,0	0,9600	0,9339	6,3	7,3	717	8,9
110	68,6	0,9499	0,9217	5,8	6,8	710	8,8
115	70,2	0,9396	0,9099	5,3	6,3	702	8,7
120	71,7	0,9295	0,8983	4,9	5,9	695	8,6
125	73,1	0,9200	0,8870	4,5	5,5	690	8,5
130	74,4	0,9112	0,8760	4,2	5,2	685	8,4
135	75,7	0,9019	0,8653	3,9	4,9	682	8,3
140	76,9	0,8931	0,8548	3,6	4,6	680	8,2
145	78,1	0,8843	0,8446	3,4	4,4	677	8,2
150	79,2	0,8762	0,8346	3,1	4,1	675	8,1
151	80,2	0,8687	0,8248	2,9	3,9	672	8,0
152	81,2	0,8606	0,8153	2,8	3,8	670	8,0

10. В случае сушки дров и леса весьма часто топочные газы вводят в сушильную камеру и ими непосредственно омывают сырые дрова. Так как сушила для дров отапливаются дровами, то в продуктах горения находится значительное количество паров воды. Эти пары воды связывают определенное количество газов влажностью на 75%, это количество печных газов должно быть выключено из общего количества сушащего воздуха и газов, согласно с таблицей VIII, и введено в расчет при расчете количества циркулирующих газов.

Согласно с вышесказанным, при проектировании сушил будем исходить из следующих данных.

а) Производительность сушила в 1 сек.

б) Количество воды, испаряемое в 1 сек.

в) Наивысшая температура сушки или температура подогретого воздуха t_{max}.

г) Температура отработавшего воздуха t_{min}.

д) Количество кг сухого воздуха, вступающего в сушило в 1 сек.

е) Количество кг влажного воздуха, удаляемого в 1 сек из сушила.

ж) Количество подогревов необходимое для насыщения воздуха до 75% (об'ем сушила).

з) Количество тепла, необходимое для удаления 1 кг влаги.

Собирая эти данные вместе, мы можем составить таблицу IX.

Конструкция сушил правильная и сушила уроды.

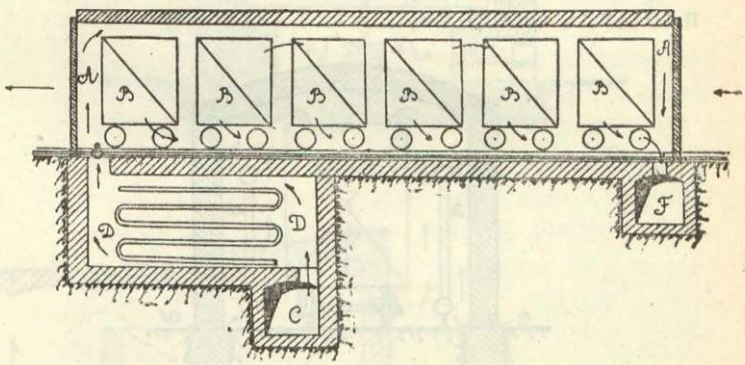
Самой распространенной ошибкой в конструкции сушил является отвод отработавших влажных газов сверху. При такой конструкции сушила, струйки сухого теплого воздуха скорее удаляются в трубу, чем остывшие, насыщенные влажностью струйки, и сушка идет очень неравномерно. В полости сушила устанавливаются пути прямой тяги вверх и образуются глухие углы застойных газов, где материал не сушится, а распаривается.

Правильная равномерная сушка возможна только при обмывании сушащихся предметов нисходящим потоком теплых сушащих газов, следовательно, при обращенной тяге.

На основании вышеизложенного, я оставляю без рассмотрения большинство принятых на практике сушил, как построенных на ложном принципе. Первое правило, которому должно удовлетворять правильно построенное сушило, состоит в том, что отработавшие газы отводятся снизу.

а) Сушило однократного насыщения. Прекрасная по оборудованию крахмало-сушилка Лемана (фиг. 160) сушит весьма неудовлетворительно, единственно потому, что насыщение в ней происходит только один раз. Устройство ее таково: в корридоре AA движутся вагонетки BB с решетками с сырым крахмалом. Вентилятор нагнетает холодный воздух через боров C в камеру, где расположены трубы парового отопления. Через отверстие E теплый воздух вступает в коридор AA и поднимается под свод его. Насыщенный парами воды остывший воздух удаляется с пода через боров.

Расчет этого сушила, не принимая в расчет потери на лучеиспускание, может быть сделан так: сухой воздух, нагретый до 50° С несет в себе количество тепла равное 11,9 кал/кг. Воздух с 75% влажности содержит при 20° С—11,03 кал/кг тепла. Следовательно температура отработавшего воздуха, не принимая в расчет лучеиспускание и нагрев крахмала и вагонеток, будет несколько выше 20° С, а, приняв их в расчет, несколько ниже 20° С. Будем считать ее в 20° С. Тогда на кг сухого воздуха из сушила будет вынесено 0,0109 кг воды. Полезный коэффициент сушки определится, как



Фиг. 160.

частное от деления количества тепла в паре на все количество тепла во влажном воздухе при 20° С

$$6{,}6 : 11{,}03 = 0{,}60 \text{ или } 60\%.$$

Количество холодного воздуха, которое должно быть нагнетаемо в сушило для удаления 1 кг воды из крахмала, будет равно 91,8 кг (см. таб. IX).

Если мы сделаем сушило многократного насыщения, то при температуре вступающего в сушило воздуха в 50° С температура отработавшего воздуха будет 40,7° С, примем в 40° С, число насыщений будет 10,3 (таб. IX). Коэффициент полезного действия сушки 70% (таб. IV). Количество сухого воздуха на 1 кг влажности крахмала 27,9 кг (таб. VIII).

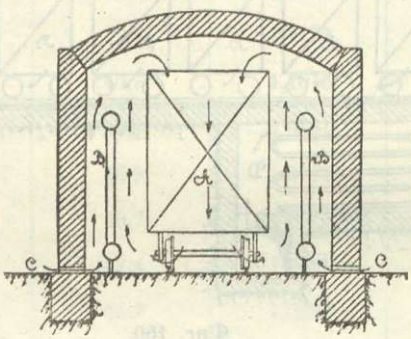
Из этого примера видна выгода сушил многократного насыщения. Коэффициент полезного действия, как мы видели выше, поднялся, а следовательно, расход на нагрев воздуха сократился в $70 : 60 = 1{,}2$ раза, в дутье в $91{,}8 : 27{,}9 = 3{,}3$ раза.

Очевидно, что производительность сушила данных размеров может быть увеличена введением многократного насыщения в 3 раза.

Какова же должна быть конструкция коридорного сушила многократного насыщения. Совершенно очевидно, что эта конструкция должна обеспечить возможность сушащим газам десятикратного насыщения, т. е. должна быть приспособлена для непрерывной циркуляции десятикратного об'ема печных газов.

Мы видели, что 1 кг паров воды при 75% влажности и 40° С, может быть вынесен 27,9 кг сухого воздуха, или согласно с таблицей VIII — 26,1 м³ влажных, отработавших сушащих газов.

Сила, движущая циркулирующий об'ем, есть функция разности весов м³ сушащих газов при t_{max} и t_{min} и не может быть значительна, и скорость циркуляции не может быть велика. Отсюда ясно, что циркуляция печных газов в сушиле должна совершаться в направлении, обеспечивающем для струи циркулирующих газов максимальную площадь сечения.



Фиг. 161.

Для коридорного сушила это будет циркуляция в плоскости нормальной к длине сушила, как показано на фиг. 161, где плоскостью циркуляции является плоскость чертежа. Максимальная площадь сечения будет горизонтальная. Нагревающие сушащие газы трубы парового отопления BB должны, очевидно, быть поставлены по сторонам поезда вагонеток A с сырым крахмалом. Собирающиеся на поду остывшие влажные печные газы (воздух) нагреваются и увлекаются этими трубами вверх. Здесь они собираются под сводом, затем опускаются мимо решет с сырым крахмалом, насыщаются парами воды и опять собираются на под коридора, опять нагреваются трубами BB и таким образом циркулируют сверху вниз и снизу вверх.

Сушило, способное выделить из сушимого материала 0,1 кг воды в секунду, должно быть рассчитано на циркуляцию $\frac{26,1 \times 10,3}{10} = 26,8$ м³ воздуха в секунду. Мы видели, что поднимающийся поток сушащих газов имеет температуру 50°, а опускающийся 40°. Вес второго по табл. I равен 1,105 кг/м³. Тот же воздух, нагретый до 50° будет весить:

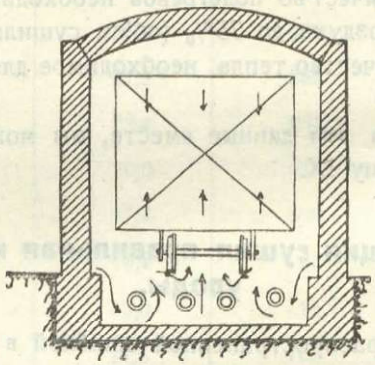
$$\frac{1,105}{\frac{1}{1+\frac{40}{273}}} \cdot \frac{1}{1+\frac{50}{273}} = 1,071 \text{ кг/м}^3.$$

Гидростатическое давление, вызывающее циркуляцию при высоте сушила в 2 м будет $\delta = 2\ (1,105 - 1,071) = 0,068$ кг/м² или мм воды, напор теплого воздуха, равен:

для воздуха в 40°С — 0,034 : 1,105 = 0,031 м;

для воздуха в 50°С — 0,034 : 1,071 = 0,032 м;

в сумме 0,063 м. За счет этого напора должны быть рождены скорости нисходящего и восходящего циркуляционных потоков воздуха при 40° С вниз и при 50° С вверх. При омывании подвергающихся сушке предметов эти скорости будут утеряны несколько раз. Допустим, четыре раза. Тогда на рождение каждой скорости придется около 0,015 м, т-е. скорость циркуляции будет около 0,5 м/сек. Откуда следует, что коридорная печь должна быть настолько широка, чтобы площадь сечения промежутков между вагонами и стенами удовлетворяла условию движения по ним циркулирующих газов со скоростью меньшей 0,5 метра в 1 секунду.



Фиг. 162.

Тому же условию должно удовлетворять и расположение решет на вагончиках AA. Решета надо располагать стопами с большими промежутками между ними.

Устраивая так коридорное сушило, мы получим внутри его правильную циркуляцию, указанную стрелками.

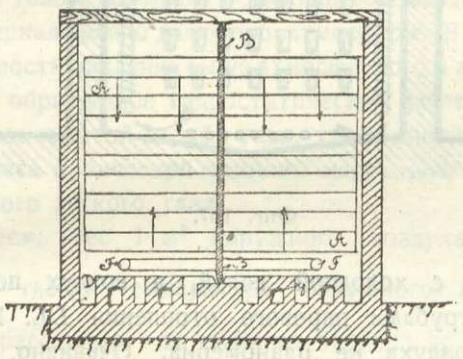
б) Из описания правильной конструкции коридорного сушила совершенно очевидна ошибка, допускаемая Клячиным в его сушиле при углевыжигательной печи его имени (фиг. 162). Он располагает нагревательные приборы в яме под рельсами. Очевидно, что струи нагретых сушильных газов будут подниматься навстречу остывших между дровами, отработавших струек и правильной

циркуляции в сушиле установиться не может, а следовательно, невозможна правильная сушка дров и равномерное углежжение.

В интересах правильной сушки, дрова в сушиле надо располагать вертикально. Дно вагонов надо делать не сплошным, а решетчатым. От этих ошибок не избавлены углевыжигательные печи Аминова и Гренделя.

в) Карусель для сушки картофеля Полевицкого (фиг. 163).

Карусель представляет колесо *AA* с вертикальной осью *BB*, на которое устанавливаются совершенно плотно 11 рядов полок с сырым резанным картофелем. Внизу расположены кирпичные боровы *DD*



Фиг. 163.

и кольцеобразная железная труба *FF*, назначение коих подогреть вступающий снизу в сушило воздух. Сырой воздух отводится с низу.

Недостаток карусели тот же, что и печи Клячина. Поднимающиеся теплые струи идут навстречу опускающимся вниз, чем нарушается правильная циркуляция. Неравномерность сушки исправляется непрерывным вращением карусели. Сушка идет медленно. Сушило все заполняют сырым картофелем, высушивают и вновь заполняют сырым картофелем, ибо непрерывная сушка не удается.

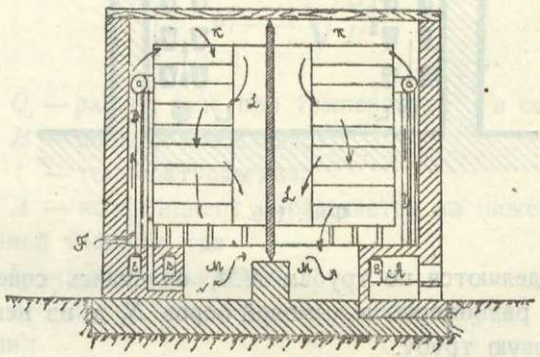
Проект этот должен быть изменен в следующем направлении (фиг. 164). (См. также часть IV гл. VII).

Топочные газы из топки *A*, борова *B* и кольца железных труб *CC* опускаются по вертикальным железным трубам *DD* в дымовой боров *E*, куда поступает и отработавший влажный воздух. Направление циркуляции показано стрелками.

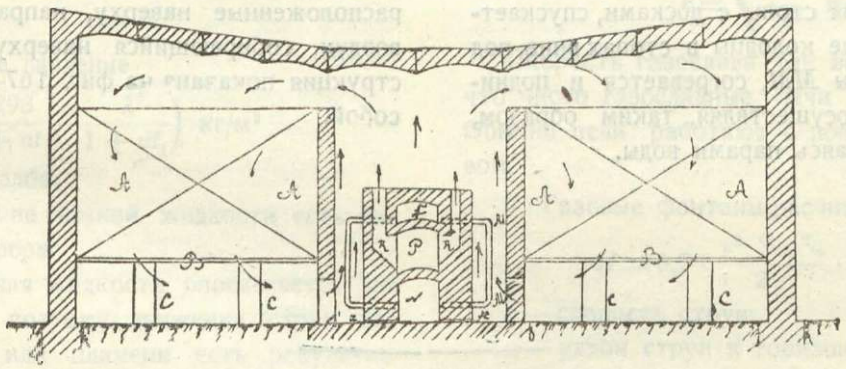
Наружный воздух вступает через отверстия *F*. Обогревается около труб *D* и поднимается к потолку сушила *KK*. Затем омывает решета с картофелем и проходит между ними в колодезь внутри карусели *LL* и в нижнюю часть сушила *MM*. Чтобы он там не застаивался, служат каналы *N*, которыми он вновь подводится к трубам *DD*.

Расчет этого сушила показывает ошибочность тесноты существующих сушил.

Сушило большой производительности должно быть сделано по возможности более просторно, только тогда в нем может установиться правильная циркуляция, достаточно мощная, чтобы обеспечить производительность сушила.



Фиг. 164.

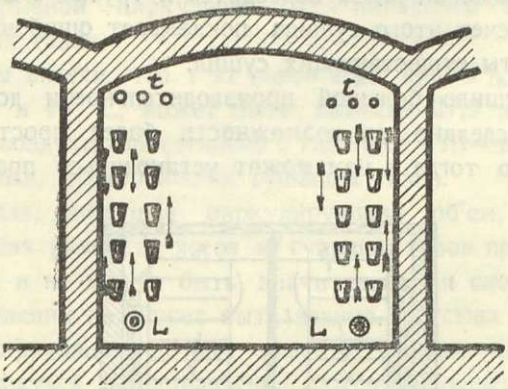


Фиг. 165.

г) Проект сушила для столярного леса. Неравномерность омывания досок теплыми струями воздуха вызывает появление в досках трещин, портящих лес. Их можно будет избежать при правильном омывании досок нисходящими струями циркулирующего в сушиле воздуха.

На фиг. 165 представлено: две стопы досок *AA*, сложенных крест-накрест с промежутками в ширину доски. Таким образом об'ем промежутков равен об'ему досок. Доски укладываются так аккуратно, чтобы сквозь всю стопу проходили бы вертикальные каналы в ширину доски, что обеспечивает беспрепятственное опускание струй остывшего влажного воздуха. Стопы досок сложены на про-

гонах *BB*, опирающихся на выступы стен и кирпичные столбы *CC*. Таким образом под стопой досок получается проход в рост человека и остывший влажный воздух может свободно циркулировать под стопой по направлению к воздухонагревателю с чугунными трубами, поставленному в среднем отделении сушила. Воздухонагреватель состоит из топки и борова *F*, из которого топочные газы



Фиг. 166.

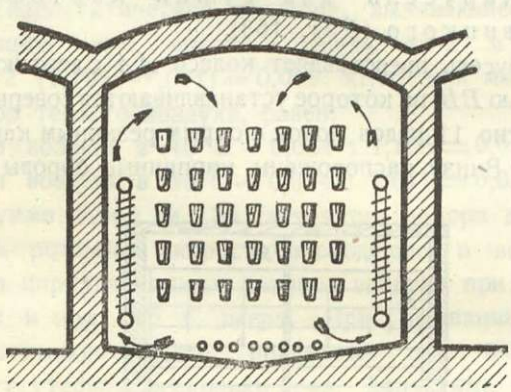
распределяются по трубам *MM*, опускаясь совершенно равномерно в дымовой боров *N*, а из него, в дымовую трубу.

Холодный воздух вступает в боров *P* и, согретый в каналах *RR*, выходит в сушило, поднимается кверху, омывая стопы с досками, спускается через вертикальные колодцы в стопах вниз, под стопы, омывает трубы *MM*, согревается и, поднимается опять вверх, осуществляя, таким образом, циркуляцию и насыщаясь парами воды.

Самый холодный влажный воздух стелется по самому поду сушила. Тут он собирается с пода отверстиями *xx* в дымовой боров *N* и вместе с дымом выносится дымовой трубой.

д) Сушило Ижевского завода для сушки тиглей для плавки стали. (Фиг. 166).

Сушило это работает без вентиляции. Влажность воздуха, заполняющего сушило, осаждается



Фиг. 167.

трубами с холодной водой, а воздух подогревается трубами парового отопления *LL*. Циркуляция воздуха не планомерна. Очевидно, горячие струи направляются кверху навстречу влажным струям остывшего воздуха. Трубы *tt*, расположенные наверху, напрасно студят теплый воздух, собирающийся наверху. Правильная конструкция показана на фиг. 167—она понятна сама собой.

---

1) Идея сушил многократного насыщения воздуха принадлежит К. К Адамецкому, но сушила, им спроектированные, отличались сложностью и распространения не получили.

Вывод формулы для определения количества насыщений сделан инж. Н. Н. Шадриным (выноска принадлежит к странице 67).

Заключение.

Основные положения гидравлической теории.

1. Движение пламени в печах подчиняется законам движения легкой жидкости в тяжелой (пламени в наружном воздухе).

2. В незамкнутой полости, заполненной теплым легким газом, давление у нижней поверхности нижнего зеркала равно давлению атмосферы. В остальной полости давление выше атмосферного. Газ испытывает обращенное гидростатическое давление, измеряемое высотой столба газа, умноженной на разность веса кубической единицы наружного воздуха и теплого легкого газа.

Имеем: вес 1 м³ наружного воздуха равен $\frac{1{,}293}{1+\alpha t}$ — где t температура наружного воздуха; H м—расстояние от нижнего зеркала до пункта где измеряется гидростатическе давление; $\frac{\lambda}{1+\alpha t_1}$ — вес 1 м³ теплого, легкого газа при температуре t_1.

Гидростатическое давление

$$\delta = H\left(\frac{1{,}293}{1+\alpha t} - \frac{\lambda}{1+\alpha t_1}\right) \text{ кг/м}^2$$

или мм водяного столба.

3. Всякое движение всякой жидкости есть результат расхода напора.

Скорость движения жидкости определяется по формуле $v=\sqrt{2gh}$, поэтому движение струи теплого, легкого газа или пламени есть результат расхода напора или высоты столба этого газа, и скорость движения определяется той же формулой.

Например: при гидростатическом давлении газа равном δ, напор будет равен:

$$\delta : \frac{\lambda}{1+\alpha t} = h,$$

а скорость истечения будет:

$$v=\sqrt{2gh}=\sqrt{2g\frac{\delta(1+\alpha t)}{\lambda}}$$

4. Пламенный поток есть обращенная река.

5. Глубина газослива определяется по формуле И. Г. Есьмана.

$$h_t = A\sqrt{\frac{Q_t^{\,2}}{B^2 t}}$$

где:

Q_t — расход газа при температуре t в секунду

B — ширина газослива;

t — температура газа;

A — коэффициент определяется из нижеприведенной таблицы, где

h_t — высота газослива;

E — длина газослива (в данном случае свода печи);

6. Для скорости газовой реки имеем формулу

$$v=\sqrt{\frac{ht}{A^3}} \text{ м/сек.}$$

Скорость газослива так велика (см. стр. 22), что чисто газосливные печи применяются редко. Обычно печи работают с подпруженным газосливом.

7. Газовые фонтаны расчитываются по формуле

$$H = 0{,}7 \cdot \frac{v^2 \operatorname{Sin}^2\alpha}{2g} \cdot \frac{273+t_н}{t_д - t_н}$$

v — скорость струи;

α — уклон струи к горизонту;

g — ускорение силы тяжести,

$t_н$ — температура неподвижной среды;

$t_д$ — температура движущейся струи фонтана.

При $\alpha = 90°$; $\operatorname{Sin}\alpha = 1$; получим:

$$H = 0{,}7\frac{v^2}{2g} \cdot \frac{273+t_н}{t_д - t_н}.$$

h_t	0,30					0,40					0,50				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
A	3,20	3,41	3,52	3,62	3,67	3,07	3,34	3,51	3,61	3,69	2,95	3,27	3,48	3,59	3,69

h_t	0,60					0,75					1,00				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
A	2,75	3,20	3,45	3,59	3,69	2,71	3,06	3,36	3,56	3,69	2,43	2,95	3,28	3,52	3,70

8. Правила деления потоков:

Стынущий горячий поток делится равномерно на нисходящие струи.

Нагревающийся холодный поток делится на восходящие струи.

Печи, в которых пламя стынет, должны работать с обращенной тягой. Только так устроенные печи способны равномерно нагревать погруженные в них предметы. Поэтому в воздухонагревателях нагревающие их дымовые газы должны быть направлены сверху вниз, а нагревающийся воздух снизу вверх.

9. Отработавшие печные газы должны направляться кратчайшим путем в дымовую трубу. Под должен быть правильно канализирован. Должно избегать мешка холодных газов на поду.

10. Мешок горячих газов рекомендуется делать только в тех случаях, когда требуется устройство сожигательной камеры.

11. Подсводовое пространство есть идеальная сожигательная камера; в интересах правильности протекания реакции горения, правильности и равномерности нагрева предметов, расположенных на поду, рекомендуется делать печи с высоким сводом.

12. Чтобы нагревание слитков в методических печах шло быстро, надо располагать слитки на трубах и под ними устраивать донный поток холодных печных газов.

В печах, где нет шлака, полезно снимать остывшие газы с пода многими вертикальными отверстиями.

13. Садочные окна, прикрытые заслонками, дают ореол печных газов у верхнего края. Дабы уменьшить вред заслонок, давление в печи надо держать атмосферное.

Таким образом механизм работы печи таков: топка накачивает топочные газы в рабочее пространство, дымовая труба удаляет печные газы из рабочего пространства.

Высота дымовой трубы должна быть достаточна, чтобы «протащить» дым через регенераторы, рекуператоры и борова.

14. Все окна печи должны быть расположены на одной высоте; иначе одно окно будет дымовой трубой нижележащего окна.

15. Окна надо делать по возможности ниже.

16. Некоторые печи и приборы, вошедшие в общее употребление, не могут иметь правильной конструкции. Например: уравнители температуры дутья, кольцевые печи для обжига извести и кирпича (камерные печи для того же назначения должны иметь перекрещивающиеся каналы).

17. Свод печей должен быть устроен сообразно своему назначению: в печах, в которых желательно сосредоточить высокую температуру в головной части печи нужно иметь понурый свод; в печах, где желательно иметь во всей печи равномерную температуру, свод нужно делать восстающий.

18. Если желательно иметь в передней части высокую температуру, в задней же только подогревать материал, то рабочее пространство полезно разделить занавеской или перевальной стенкой на две части. Высота пролета под занавеской или газосливом расчитывается по формуле И. Г. Есьмана.

19. Дымовые борова расчитываются как газосливы, площадка коих равна бесконечности. Так же расчитываются газопроводы.

20. Для осадки пыли, газ из газопровода надо отводить сверху и увеличивать сечение газопровода, тогда на дне его искусственно получается мешок холодных газов, который при пуске газопровода представляет большие опасности от взрывов. Для предупреждения взрыва в боровке должны быть устроены специальные устройства.

21. Если из газопровода газ распределяется по различным устройствам на различных высотах, то, при остановке дутья в доменную печь, или остановке газогенератора, возможно засасывание воздуха в нижнюю горелку и получение взрывчатой смеси в газопроводе. Чем ближе к домне и выше над уровнем пола будет сделано ответвление, тем безопаснее устройство.

22. Выдавливание холодного воздуха теплым газом сверху вниз и теплого газа холодным воздухом снизу вверх может быть допущено как безопасное. Недопустимо выдавливание в обратном направлении.

23. Взрывчатая смесь в газопроводе совершенно безопасна при сжигании ее под большим давлением, порождающим скорость струи в горелке, бо́льшую скорости горения взрывчатой смеси.

24. Слитие отдельных струй дымовых газов должно производиться под острыми углами по пути друг к другу. Правильное слияние достигается в том случае, если струи встречаются под прямыми углами, но боковые струи открываются в общий боров при помощи газосливов, зеркало коих совпадает с подом общего борова, а свод с зеркалом газовой реки.

25. Правила устройства сушил многократного насыщения изложены на стр. 69.

ПРИЛОЖЕНИЕ.

К теории движения газов в металлургических печах.

Предисловие.

Настоящая статья является отчасти дальнейшим развитием и дополнением заметки под таким же приблизительно заглавием, появившейся на страницах «Ж. Р. М. О.» в 1910 году [1]), отчасти же ее повторением, — повторением, допущенным с целью дать в одной статье по возможности все, что относится к гидравлике газового потока в печи, и в виду того, что ссылки на прежнюю работу затруднили бы если не всех, то многих читателей, так как Журнал Р. М. О. за 1910 год стал библиографической редкостью.

Рассмотрению подлежит случай такого движения нагретых газов в металлургических печах, когда эти газы, при соответственном их с размерами печи количестве, не занимают всего поперечного сечения в рабочем пространстве ее, но скользят по своду, не касаясь пода; при этом такое движение газов уподобляется, в некоторой степени, движению воды в канале, если последний представить себе обращенным вверх дном, роль которого в данном случае играет свод печи; газовая струя, движущаяся таким образом, имеет свободную поверхность, лежащую у пода печи и выше него.

Очевидно, что для такого случая все обычные формулы гидравлики для движения жидкости по трубам, как предполагающие всегда сплошное их заполнение, теряют значение и их применение может повести к крупным ошибкам; наоборот, составив формулы для указанного выше движения газа в открытом обращенном вверх дном канале, умея найти положение и вид кривой свободной поверхности этого движения и задавая, в соответствии с этим, положение пода в печи, возможно избежать как мертвых пространств в ней, так и излишнего ее сужения, мешающего свободному проходу газов, то-есть возможно задать правильные размеры печи, другими словами, расчитать печь.

Возможность вести расчеты металлургических печей при подобного рода представлении о характере движения в них газов, указал впервые в металлургии проф. В. Е. Грум-Гржимайло. Это движение, с гидравлической точки зрения, приводит при известного рода предположениях и допущениях к сравнительно простым расчетным формулам, вывод которых и составляет предмет настоящей статьи.

Проверочные расчеты многих печей, находящихся в действии, указывают на правильность и пригодность предлагаемых ниже формул, а это в свою очередь дает основание думать, что как основное представление о характере движения газов, так и предположения, делаемые для вывода и необходимого с практической точки зрения упрощения формул, вполне допустимы и достаточно оправдывают появление настоящей статьи.

Основные положения.

Для возможности применения уравнений гидравлики к движению газов необходимо предположить, что температура их во время движения остается неизменною. Тогда движение каждой движущейся частицы газа зависит только от трех переменных: высоты ее положения, скорости и давления. Предположение об изменении температуры вводит немедленно еще одну переменную и зависимость между всеми четырьмя переменными настолько усложняется, что представить диференциальные уравнения движения в простом, удобном для интегрирования виде не представляется возможным.

Дело усложняется в этом случае еще и тем обстоятельством, что характер изменения температуры в печи является сам по себе весьма мало исследованным и подверженным таким случайностям, которые исключают возможность какой-либо строгой закономерности.

Эти причины и привели к решению вывести уравнения изучаемого движения для постоянной температуры, т.-е. для идеального случая с тем, чтобы впоследствии, в случае нужды, снабдить окончательные формулы каким-либо практическим коэффициентом. При большой разнице температур

[1]) И. Г. Есьман. К вопросу о движении газов в металлургических печах, Ж. Р. М. О. 1910, № 6, стр. 319.

различных отдельных полостей печи не представит труда рассматривать движение в этих полостях совершенно отдельно, задаваясь в каждой из них особой, постоянной для нее температурою.

Несомненно также, что такое же предположение о постоянстве температуры необходимо допустить по тем же причинам и для неподвижной части печных газов, расположенных, согласно с характером изучаемого движения, под свободной поверхностью движущегося потока.

Наконец, весьма естественно предположить, что как окружающий печь холодный воздух, так и движущиеся в нем сильно нагретые продукты горения, являются постоянными газами и подчиняются поэтому, при постоянной температуре, закону Бойля-Мариотта.

Таким образом, предположения, которые введены во все дальнейшие выводы, могут быть формулированы следующим образом:

1. Температура движущегося газа на рассматриваемом участке печи изменяется настолько незначительно, что ее возможно при изучении движения заменить некоторою среднею постоянною для всего участка и для всей массы движущегося газа, при чем, очевидно, все процессы расширения и сжатия газа необходимо считать изотермическими.

2. Температура той части газа, находящегося в канале, которая не принимает участия в движении, точно так же повсюду одинакова и газ этот не смешивается с газом движущимся.

3. Газы, находящиеся в печи, равно как и воздух, окружающий печь, подчиняются закону Бойля-Мариотта.

При сделанных предположениях основные законы гидростатики дают ряд зависимостей для покоющейся части газа.

Так как этот находящийся в покое газ подвержен исключительно одной силе тяжести, направленной по вертикали вниз, то, очевидно, изменение гидростатического давления в газе, завися только от силы тяжести, может изменяться только в том же вертикальном направлении и должно быть одинаковым для всех точек, лежащих в одной горизонтальной плоскости. Если две точки в покоющемся газе удалены друг от друга по вертикали на бесконечно малое расстояние dz, то разница, гидростатических давлений в этих двух точках dp будет равна весу столба газообразной жидкости, лежащей между рассматриваемыми точками при площади сечения его, равному единице. Обозначая вес единицы об'ема газа через Δ и предполагая его вследствие малости расстояния постоянным для всего столба высотою dz, мы, согласно указанному выше, можем написать

$$dp = -\Delta dz \quad \ldots\ldots\ldots (a)$$

Знак — указывает на уменьшение давления с увеличением высоты z.

Кроме написанного уравнения, предположение третье позволяет нам написать еще характеристическое уравнение для газа постоянной температуры:

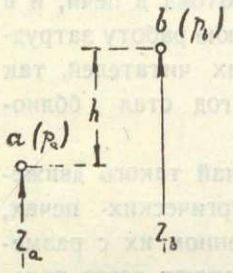
$$pV = \text{Const.} = k,$$

где V есть удельный об'ем газа. Замечая, что удельный об'ем и вес единицы об'ема являются величинами обратными одна другой, характеристическое уравнение для постоянного газа возможно переписать в виде

$$\frac{p}{\Delta} = k \quad \ldots\ldots\ldots (b)$$

Исключая при помощи этого уравнения Δ в уравнении (a), имеем

$$\frac{dp}{p} = -\frac{dz}{k} \quad \ldots\ldots\ldots (1')$$



Фиг. 1.

Если для какой-либо точки a рассматриваемого газа (фиг. 1) давление p_a и вес единицы об'ема Δ_a известны, то известна по уравнению (b) и постоянная k для всего об'ема газа:

$$k = \frac{p_a}{\Delta_a}$$

Интегрируя при этом уравнение (1'), можем определить давление для любой точки b газа, если только известна разность h вертикальных расстояний z_a и z_b обеих точек над координатною горизонтальною плоскостью. В самом деле:

$$\ln p_b - \ln p_a = \ln \frac{p_b}{p_a} = -\frac{1}{k}(z_b - z_a) =$$

$$= -\frac{\Delta_a}{p_a} h$$

Представляя это уравнение в виде показательной функции, разлагая ее в ряд, имеем:

$$\frac{p_b}{p_a} = e^{-\frac{\Delta_a}{p_a} h} = 1 - \frac{\Delta_a}{p_a} h + \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta_a}{p_a} h\right)^2 - \ldots\ldots.$$

Обычно член $\frac{\Delta_a}{p_a} h$ представляется весьма малою дробью по сравнению с единицею, так что уже третьим членом написанного ряда возможно пренебречь. В самом деле, в метрических мерах при 0° и атмосферном давлении, Δ_a равно для воздуха 1,288 кг, а величина $\frac{1}{k} = \frac{\Delta_a}{p_a}$ имеет значение $\frac{1.288}{10.000}$; для нагретых газов величина $\frac{1}{k}$ будет соответственно

еще меньше. В то же время высота h в простых металлургических печах не превосходит обычно 50—60 метров (дымовая труба); таким образом максимальная величина $\frac{h}{k}$ достигает значения $\frac{1{,}288 \times 60}{10.000} = 0{,}0077$, что оправдывает вполне наше решение пренебречь половиною квадрата этой величины по сравнению с единицею. При сделанных предположениях окончательно имеем

$$p_b = p_a - \Delta_a h \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

Полученное уравнение совпадает по виду с уравнением гидростатики тяжелой капельной жидкости, т.-е. жидкости постоянной плотности, из чего необходимо заключить, что при малых h и, следовательно, малых разностях давлений вес единицы об'ема возможно повсюду считать одинаковым независимо от давления.

Рассуждая подобным же образом и с теми же допущениями о постоянстве веса единицы об'ема газа для случая движения газовой струи и предполагая это движение установившимся, возможно для него непосредственно написать уравнение Бернулли в той форме, которая ему придается для жидкости капельной, характеризующейся постоянством удельного веса.

Тем не менее гораздо целесообразнее прийти к этому виду уравнения, исходя из общей дифференциальной формы его с тем, чтобы возможно было отдать себе отчет в степени точности этого вывода.

Как известно, уравнение живых сил для случая жидкого тела, подверженного действию одной только силы тяжести, может быть написано в дифференциальной форме в следующем виде:

$$dz + \frac{dp}{\Delta} + d\left(\frac{v^2}{2g}\right) = 0 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (c)$$

Здесь z есть вертикальная координата, т.-е. возвышение рассматриваемой частицы над координатною горизонтальною плоскостью, p и Δ, по-прежнему, давление и вес единиц об'ема в точке нахождения частицы, v — скорость движения и $\frac{v^2}{2g}$ — скоростной напор.

Выражая в уравнении (*c*) вес Δ через p и k при помощи уравнения (*b*) и интегрируя его в пределах, соответствующих двум каким-либо положениям рассматриваемой части a_1 и a_2, получим

$$z_2 - z_1 + k \ln \frac{p_2}{p_1} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} = 0,$$

или

$$\ln \frac{p_2}{p_1} = -\frac{1}{k}\left[z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}\right]$$

$$\frac{p_2}{p_1} = e^{-\frac{1}{k}\left[z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}\right]}$$

Разложив вторую часть равенства в ряд, имеем

$$\frac{p_2}{p_1} = 1 - \frac{1}{k}\left[z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}\right] + \frac{1}{2}\cdot\frac{1}{k^2}\left[z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}\right]^2 - \ldots$$

Отбрасывая третий член ряда, заменяя во втором члене k через $\frac{p_1}{\Delta_1}$ и группируя члены, соответствующие начальному и конечному положению движущейся частицы, окончательно получаем уравнение Бернулли в виде, аналогичном уравнению капельной жидкости.

$$z_2 + \frac{p_2}{\Delta_1} + \frac{v_2^2}{2g} = z_1 + \frac{p_1}{\Delta_1} + \frac{v_1^2}{2g} \quad . \quad . \quad . \quad (2)$$

Здесь Δ_1, фигурирующее, как усматривается из вывода в первой и во второй части одинаково, соответствует весу единицы об'ема движущегося газа в начальном его положении.

Ошибка, допущенная при отбрасывании третьего и следующих членов ряда, очевидно будет меньше величины

$$\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{\Delta_1}{p_1}\right)^2\left[z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}\right]^2.$$

Температура в металлургических печах обыкновенно бывает не меньше 1000°, давление весьма близко к атмосферному, соответствующему 10000 кг на квадратный метр, удельный вес продуктов горения весьма близок к удельному весу воздуха, один кубический метр которого при 0° и атмосферном давлении весит 1,29 кг; коэффициент расширения газов равен $\frac{1}{273}$ таким образом величина $\frac{p_1}{\Delta_1}$ для печей не меньше

$$\frac{10000}{1{,}29}\left[1 + \frac{1}{273}\cdot 1000\right] \cong 28400 \text{ метров.}$$

$z_2 - z_1$ не превосходит обыкновенно в печах величины 10—20 метров (напр., доменные газопроводы) и лишь для дымовых труб может достигать 50—60 метров. Скорости движения газов изменяются незначительно и в редких случаях превосходят 10—20 метров в секунду; только американские конструкции печей составляют в этом исключение и в них допускают в последнее время скорости до 50 метров в секунду. Принимая, что крайним верхним и нижним пределом скорости является $v_2 = 20$ метров и $v_1 = 0$ и что, кроме того, предельная разность высот (60 метров) совпадает с пре-

дельною разностью скоростных напоров (чего на самом деле не бывает), нетрудно убедиться, что величина

$$z_2 - z_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}$$

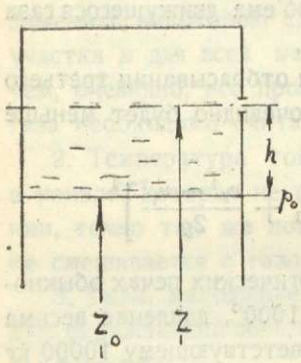
не превосходит 80 метров. Отсюда следует, что допускаемая при замене точного уравнения движения приближенным ошибка не превосходит при нагретых выше 1000° газах величины

$$\frac{1}{2}\left(\frac{80}{28400}\right)^2 = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{355}\right)^2$$

Пользуясь выведенными выше формулами (1) и (2), возможно себе составить понятие о характере движения газов в печах, что и будет сделано для различных практически интересных случаев в нижеследующих главах.

Истечение газа из отверстий.

Предположим, что сосуд (фиг. 2), снизу совершенно открытый и сообщающийся с наружным воздухом, заполнен неподвижным газом нагретым, а потому и более легким, чем наружный холодный воздух; вес единицы об'ема газа обозначим через Δ, а наружного воздуха через Δ_i. Горизонтальная поверхность раздела, отделяющая газ от воздуха, т.-е. свободная поверхность газа, расположена на высоте z_0 над горизонтальною координатною плоскостью. Рассмотрим распределение давления в подобной газовой среде. В виду неподвижного состояния об'ема газа, к нему возможно применить уравнение (1) гидростатики, которое и даст нам искомое распределение давления по высоте сосуда в зависимости от известного давления в какой-либо одной из точек его. Такою точкою с известным давлением возможно считать любую точку свободной поверхности, где давление равно давлению наружного воздуха. Обозначим его через p_0, имеем для произвольной точки газа с вертикальною координатою z



Фиг. 2.

$$p = p_0 - \Delta\,(z - z_0) \quad \ldots\ldots\ (a)$$

Но для наружного воздуха давление точно также изменяется с изменением координаты z и, будучи равным p_0 на высоте z_0, будет с увеличением z равно

$$p' = p_0 - \Delta_i\,(z - z_0) \quad \ldots\ldots\ (b)$$

Сравнивая выражения (a) и (b), мы видим, что давление, будучи одинаковым для воздуха и газа на высоте z_0 свободной поверхности последнего, начинает изменяться с увеличением высоты и притом разность p и p' все время положительна:

$$p - p' = (z - z_0)\,(\Delta_i - \Delta) = h\,(\Delta_i - \Delta)$$

Таким образом разность давлений на горизонтальной плоскости внутри и снаружи сосуда растет пропорционально увеличению высоты h возвышения взятой горизонтальной плоскости над свободною поверхностью газа. По образному выражению, введенному в практику печей проф. Грум-Гржимайло, печь набирает давление по мере увеличения ее высоты.

Если в печи на высоте h проделать отверстие, то газ устремится, благодаря положительной разнице давлений, изнутри наружу.

Предполагая, что размеры печи по сравнению с размерами отверстия весьма значительны, возможно пренебречь скоростями, образующимися в об'еме газа заполняющем печь при истечении из открывшегося отверстия. Точно так же возможно допустить, что убыль газа вследствие истечения через отверстие пополняется соответственным притоком, благодаря чему положение свободной поверхности газа не изменяется и движение имеет установившийся характер. Применяя при этих допущениях уравнение Бернулли в форме, данной ему равенством (2), для двух точек, лежащих на высоте z,—одной впереди отверстия, т.-е. с давлением p', и с другой позади отверстия, с давлением p,—возможно написать

$$z + \frac{p}{\Delta} + \frac{v_c^2}{2g} = z + \frac{p'}{\Delta} + \frac{v^2}{2g}$$

Здесь через v обозначена скорость в отверстии непосредственно при выходе в наружный воздух и через v_c скорость в сосуде, которая, согласно сделанному выше допущению, может быть принята равною нулю. По исключению в обеих частях уравнения z имеем:

$$v = \sqrt{2g\frac{p - p'}{\Delta}} = \sqrt{2gh\,\frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta}} = \sqrt{2gh\,(\lambda - 1)} \quad \ldots\ldots\ (3$$

Здесь через λ обозначено отношение Δ_i к Δ,—об'емных весов холодного и нагретого газа.

Об'ем газа, вытекающего через отверстие в секунду, при площади отверстия равной F и коэффициенте расхода μ, будет равен:

$$Q = \mu\,Fv = \mu F\sqrt{2gh\,(\lambda - 1)} \quad \ldots\ (4)$$

Истечение газа из отверстия может соответствовать так-называемому истечению под уровень, если горячий газ течет в помещение, наполненное газом той же температуры, но лишь меньшего да-

вления, обусловленного меньшею толщиною слоя этого газа. Пусть имеется полость горячего газа с об'емным весом Δ и рядом с ней другая, где свободная поверхность такого же газа лежит выше на $h_1 - h_2$ (фиг. 3). Требуется найти разность давлений на уровне $c-c$ обеих полостей, обусловливающую течение газа из одной полости в другую. Назовем давление в холодном газе, об'емного веса Δ_i, на уровне $a-a$ через p_i, тогда, очевидно, давления горячего газа на соответствующих уровнях будут равны

$$\left.\begin{aligned} p_a &= p_i \\ p_b &= p_i - \Delta_i\,(h_1 - h_2) \\ p_c &= p_i - \Delta h_1 \\ p_c' &= p_b - \Delta h_2 = p_i - \Delta_i\,(h_1 - h_2) \end{aligned}\right\} \quad \ldots \quad (a)$$

откуда

$$\frac{p_c - p_c'}{\Delta} = \frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta}\,(h_1 - h_2) = (\lambda - 1)\,h$$

где λ, попрежнему, обозначает отношение Δ_i к Δ.

Но согласно формуле (3) указанная разность давлений обусловливает собою скорость течения через отверстие, которая, очевидно, попрежнему будет равна:

$$v = \sqrt{2gh\,(\lambda - 1)} \quad \ldots \ldots \quad (3)$$

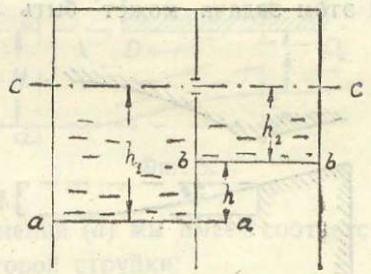
Таким образом при истечении под уровень расположение отверстий по высоте в горячем газе, не играет роли, а только лишь разность уровней обеих свободных поверхностей газа. Это как раз соответствует тому, что наблюдается в гидравлике капельной жидкости. Формулы (3) и (4) оказываются одинаково пригодными для истечения как в полость холодного газа, так и в полость горячего при соответственном лишь изменении значения h.

Как видно из формулы (4) высота h зависит от Q, F и μ и если изменится какая-либо из трех этих величин, например, вследствие изменения количества притекающего газа или же изменения площади отверстия и сопротивления в нем (напр., вследствие прикрывания заслонки), то в полости положение свободной поверхности под отверстием, т.-е. высота h будет изменяться до тех пор, пока не будет соответствовать формуле (4).

Если вместо сосуда вообразить себе печь (напр., в роде употребляемых на фарфоровых заводах), наполненную горячими продуктами горения, поступающими через особые отверстия из топки в определенном количестве в секунду Q и предположить, что для выхода газов в дымовую трубу в куполе печи имеется отверстие определенного сечения, прикрываемое заслонкою, то очевидно к этому случаю вполне применимы все вышеприведенные рассуждения и формулы (3) и (4).

Предполагая, что в правильной конструкции вся печь до самого пода должна быть заполнена горячими газами, мы из формулы (4) имеем возможность определить необходимое для этого расстояние h от пода до отверстия: при большей высоте печи под не будет прогреваться, при меньшей высоте—на поду давление газов будет больше давления наружного воздуха на той же горизонтали, что поведет к выходу этих газов в окружающее печь рабочее пространство через все рабочие отверстия, находящиеся у пода.

Топка, где образуются горячие газы, направляющиеся в печь, точно так же до известной степени аналогична рассмотренному сосуду, наполненному легким газом, так как низ топки через колосниковую решетку сообщается с атмосферой и имеет, следовательно, на этом уровне давление, равное наружному. По мере поднятия газов, разность между внутренним и наружным давлениями будет возрастать и, чем больше требуется давление в топке при выходе в печную полость, по сравнению с давлением наружного воздуха, тем, очевидно, больше должна быть высота топочной полости.



Фиг. 3.

В применении к горячим газам формулу (4) возможно упростить в том случае, если удельный об'ем газов считать одинаковым с удельным об'емом воздуха той же температуры. При этом очевидно,

$$\Delta = \Delta_i \frac{1 + \alpha t_i}{1 + \alpha t}$$

где t_i есть температура наружного воздуха, а t температура газов

$$(\lambda - 1) = \frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} = \frac{\alpha\,(t - t_i)}{1 + \alpha t_i} = \frac{t - t_i}{\frac{1}{\alpha} + t_i}$$

принимая, что $\frac{1}{\alpha} = 273$ и, наконец, делая предположение,—не влекущее за собой большой ошибки,—что $t_i = 0$, имеем окончательно

$$\lambda - 1 = \frac{t}{273}$$

При этом формула (4) принимает вид

$$Q = \mu F \cdot \sqrt{\frac{2g}{273}} \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{h} = 0{,}268\,\mu F \sqrt{h}\sqrt{t}.$$

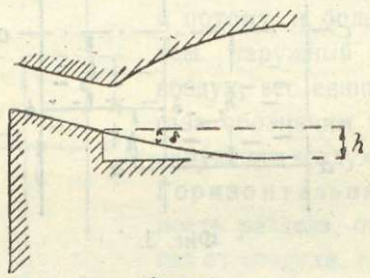
Коэффициент расхода μ зависит в высокой степени от формы отверстия. Соответственных опытов в этом направлении совершенно не имеется в литературе и о величине этого коэффициента возможно судить лишь по аналогии с такими данными, которые найдены для воды, так как имеются указания и наблюдения, что коэффициенты истечения для воздуха обыкновенной температуры и воды мало отличаются между собою. Принимая, что те же коэффициенты остаются и для газов высокой температуры, и что для большинства случаев отверстие представляет собою цилиндрическую насадку, возможно считать, что в среднем

$$\mu = 0{,}60.$$

При этом

$$h = \frac{273}{2g}\frac{Q^2}{\mu^2 F^2 t} = 26{,}5\,\frac{Q^2}{F^2 t} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Несколько отличное от описанного применение формулы истечения газов представляется в случае, которому возможно дать название «газового фонтана»; при этом задача может быть формулирована в следующем виде. Из отверстия вытекает струя горячего газа с наклоном вниз под углом δ в неподвижную среду менее нагретого воздуха (фиг. 4); при заданной скорости истечения v требуется определить, на какой глубине под отверстием должен быть расположен под печи, чтобы струя горячего газа могла его коснуться.



Фиг. 4.

Благодаря тому, что вытекающая струя движется свободным движением, каждая частица ее будет двигаться, не подвергаясь давлению со стороны соседних, а лишь испытывая давление со стороны неподвижной среды. Это последнее давление сведется к силе, направленной снизу вверх, подобно давлению жидкости на тело в нее погруженное. В результате частица горячего газа будет двигаться с начальною скоростью v под влиянием двух сил: силы тяжести и силы указанного давления.

Принимая с точностью, более чем достаточною для практики, как то выяснено выше, что вес единицы об'ема как движущегося, так и неподвижного газа не изменяется с высотою, необходимо считать, что равнодействующая сил, действующих на движущуюся частицу, постоянна. При этом, очевидно, частица будет описывать параболу, вершина которой и является искомою наинизшею точкою, лежащею ниже отверстия на глубине, определяемой известною формулою

$$h = -\frac{v^2 \sin^2 \delta}{2j}$$

В формуле j обозначает ускорение равнодействующей. Знак минус взят в виду желания заменить в обычной формуле высоту вершины параболы глубиною.

Вес движущейся частицы горячего газа, принимая ее об'ем равным единице, равен Δ.

Давление со стороны более холодного газа, равное весу этого газа в об'еме движущейся частицы, направленное противоположно силе тяжести, будет равно Δ_i.

Равнодействующая сила, отнесенная к единице об'ема, равна $\Delta - \Delta_i$, замечая, что масса единицы об'ема движущегося газа равна $\frac{\Delta}{g}$, имеем, что ускорение найденной равнодействующей силы будет

$$j = g \cdot \frac{\Delta - \Delta_i}{\Delta} = g(1-\lambda).$$

При этом

$$h = -\frac{v^2 \sin^2 \delta}{2g}\frac{1}{1-\lambda} = \frac{v^2 \sin^2 \delta}{2g}\frac{1}{\lambda - 1}$$

Выражение $\frac{1}{\lambda - 1}$ для печных газов и воздуха попрежнему может быть выражено через соответствующие температуры, при чем

$$h = \frac{v^2 \sin^2 \delta}{2g}\frac{273 + t_i}{t - t_i} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5')$$

Таким образом глубина h тем больше, чем меньше разнится температура печи от температуры струи.

Предполагая, как самый невыгодный случай, которому должна удовлетворять печь, что температура t_i есть температура наружного воздуха и принимая, что она равна нулю, получим еще более простое выражение

$$h = \frac{v^2 \sin^2 \delta}{2g}\frac{273}{t} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5')$$

В этом уравнении v, в свою очередь, может быть выражено по формуле (3), в зависимости от обстоятельств, обусловливающих истечение из камеры с горячим газом, разобранных уже выше. Для правильного применения формулы (3) необходимо иметь в виду, что даваемая ею скорость является теоретическою и для применения в фор

муле (5′) должна быть снабжена коэффициентом скорости, зависящим от формы отверстий; для отверстия, представляющего форму цилиндрической насадки, наиболее часто встречающего на практике, этот коэффициент может быть принят равным 0,64.

Истечение через водослив.

Явление истечения через водослив (точнее газослив) возможно себе представить при движении газов наиболее правильным образом в следующем виде:

Имеется нисходящий, установившийся поток нагретого газа неограниченных в ширину размеров с весьма медленным движением со скоростью v_0 (см. фиг. 5). Поток, достигнув горизонтального порога DD_1 одинаковой повсюду ширины B в направлении перпендикулярном к плоскости чертежа, переливается через последний слоем некоторой толщины, после чего уходит вверх; размеры и устройство выходного отверстия таковы, что весь газ может уйти так называемым свободным движением, т.-е. без повышения давления впереди отверстия и образования подпора. В этом случае движение газа будет аналогично движению капельной жидкости по водосливу, если последний повернуть в плоскости чертежа на 180°.

Газ, до входа на порог не имеющий горизонтальной составляющей скорости, начнет, благодаря разности давлений и высоте, приобретать скорость с соответственным утонением газового слоя; если длина порога DD_1 достаточно велика, то на нем в результате установится, начиная с некоторого сечения, течение параллельными струйками.

Рассмотрим два сечения через газовый поток; одно ab в том месте, где газ еще не имеет горизонтальной составляющей скорости, а другое cd— там, где возможно уже считать, что движение совершается параллельными струйками, при чем скорость этого движения равна v.

Для движения всего описанного газового потока, по аналогии с жидкостью капельною, возможно было бы, конечно, непосредственно применить уравнение Даниила Бернулли для двух указанных сечений.

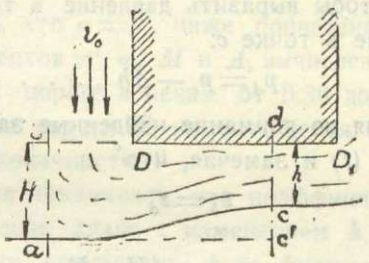
Однако для лучшего усвоения происходящих при движении явлений и понимания сущности образования скорости, разобьем весь поток на элементарные струйки и рассмотрим движение наиболее из них характерных, а именно струйки bd горизонтальной, движущейся вдоль поверхности порога, и струйки ac, движущейся по свободной поверхности.

Как известно, уравнение Бернулли (ур. 2) выражает собою равенство полных напоров для первого и второго положения движущейся частицы, понимая под полным напором сумму напоров или высот геометрической, пьезометрической и скоростной.

Если пренебречь скоростью вертикального движения v_0, весьма малою по сравнению со скоростью горизонтального движения v, то уравнение Бернулли для двух рассматриваемых частиц напишется соответственно в виде:

$$\left.\begin{aligned} z_b+\frac{p_b}{\Delta}&=z_b+\frac{p_d}{\Delta}+\frac{v^2}{2g}\\ z_a+\frac{p_a}{\Delta}&=z_c+\frac{p_c}{\Delta}+\frac{v^2}{2g}\end{aligned}\right\}\quad\ldots\ldots(a)$$

здесь значки при z и p обозначают соответственно те точки, для которых эти последние величины должны быть взяты; Δ—вес единицы об'ема движущегося газа, принимаемый одинаковым для всего об'ема газа согласно с уже указанным выше.



Фиг. 5.

Из уравнений (a) мы имеем соответственно для первой и второй струйки:

$$\left.\begin{aligned} \frac{v^2}{2g}&=z_b-z_d+\frac{p_b-p_d}{\Delta}\\ \frac{v^2}{2g}&=z_a-z_c+\frac{p_a-p_c}{\Delta}\end{aligned}\right\}\quad\ldots\ldots(b)$$

Из последних равенств видно, что разность напоров геометрического и пьезометрического в начальном и конечном положении каждой струйки идет на образование скорости; при этом, несомненно, пренебрегается сопротивлениями движению, что в последствии придется компенсировать введением численного коэффициента.

Для нахождения входящих в выражения (b) давлений обратим внимание на то, что ниже свободной поверхности движущегося газа находится неподвижный газ или воздух, к об'ему которого возможно применить уравнение гидростатики. Точно так же необходимо считать, что и в об'еме нагретого газа, до входа его на водослив, возможно применить уравнение гидростатики, благодаря весьма малой скорости движения v_0.

Приняв это во внимание, давление движущегося газа в точке a возможно считать равным давлению неподвижного газа в той же точке

$$p_a=p_i\quad\ldots\ldots\ldots(c)$$

Давление в точке b, согласно с ур. (1) будет при этом равно:

$$p_b = p_i - \Delta H \quad \ldots\ldots\ldots (d)$$

H—вертикальное расстояние свободной поверхности газа от плоскости порога, может быть названо геометрическим напором на водосливе.

Таким же точно образом давление движущегося газа в точке c, равное давлению в той же точке неподвижного газа, будет равно, согласно фигур 1 и 5 и уравнению (1).

$$p_c = p_i - \Delta_i cc' = p_i - \Delta_i (H-h) \quad \ldots\ldots (e)$$

где Δ_i есть вес единицы об'ема неподвижного газа и h—высота слоя движущегося газа в сечении cd. Так как, далее, движение в сечении cd по заданию предполагается параллельное, то давления в нем следует считать распределенными по законам гидростатики, а это позволит нам применить ур. (1) для того, чтобы выразить давление в точке d через давление в точке c:

$$p_d = p_c - \Delta h \quad \ldots\ldots\ldots (f)$$

Принимая во внимание найденные зависимости (c), (d), (e), (f) и замечая, что

$$z_b = z_d$$

и

$$z_a - z_c = -(H-h)$$

мы можем первое уравнение (b) переписать в виде

$$\frac{v^2}{2g} = \frac{p_i - \Delta H - p_c + \Delta h}{\Delta} =$$

$$= \frac{p_i - \Delta H - p_i + \Delta_i (H-h) + \Delta h}{\Delta} =$$

$$= \frac{\Delta_i (H-h) - \Delta (H-h)}{\Delta} = (H-h)\frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} \quad \ldots (g)$$

и второе:

$$\frac{v^2}{2g} = -(H-h) + \frac{p_i - p_i + \Delta_i (H-h)}{\Delta} =$$

$$= (H-h)\frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} \quad \ldots\ldots (g)$$

Таким образом разность напоров,—а следовательно, и скорость v для струек bd и ac—оказалось одинаковою и нетрудно аналогичным образом убедиться, что и для всех промежуточных струек она точно так же не будет отличаться от величины найденной нами для крайних струек. Отсюда следует, что при движении свободном от сопротивлений найденная нами скорость v есть скорость всего рассматриваемого нами потока на водосливе. Из равенства (g) имеем

$$v = \sqrt{2g(H-h)\frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta}} = \sqrt{2g(H-h)(\lambda - 1)} \quad (6)$$

где, попрежнему, $\lambda = \frac{\Delta_i}{\Delta}$.

При этом теоретический об'ем газа Q_t, протекающий через порог толщины h и ширины B в одну секунду будет равен

$$Q_t = Bh\sqrt{2g(H-h)(\lambda - 1)} \quad \ldots\ldots (7)$$

Введя, согласно Буссинеку предположение, что высота h на пороге водослива соответствует при установившемся движении наибольшему возможному Q_t для данного H, имеем

$$\frac{dQ_t}{dh} = \left(\sqrt{H-h} - \frac{h}{2\sqrt{H-h}}\right) B\sqrt{2g(\lambda-1)} = 0.$$

Это приводит нас к уравнению:

$$h = {}^2/_3 H \quad \ldots\ldots\ldots (8)$$

$$H = {}^3/_2 h \quad \ldots\ldots\ldots (8')$$

Вводя эти значения для h и H в уравнение (7), получим

$$Q_t = {}^2/_3\sqrt{{}^1/_2}\, BH\sqrt{2gH(\lambda-1)}$$

$$Q_t = \sqrt{{}^1/_2}\, Bh\sqrt{2gh(\lambda-1)}.$$

Полученные формулы являются теоретическими, так как в них не приняты во внимание сопротивления движению. Аналогично с практикою водослива для капельных жидкостей, сопротивления возможно учесть введением некоторого практического коэффицента; при этом предыдущие формулы примут вид:

$$Q = {}^2/_3\sqrt{{}^1/_3}\, \mu' BH\sqrt{2gH(\lambda-1)} =$$

$$= m' BH\sqrt{2gH(\lambda-1)} \quad \ldots\ldots\ldots (9')$$

$$Q = \sqrt{{}^1{}_2}\, \mu Bh\sqrt{2gh(\lambda-1)} =$$

$$= m\, Bh\sqrt{2gh(\lambda-1)} \quad \ldots\ldots\ldots (9)$$

где коэффициенты μ и μ' могут оказаться не равными между собою, так как с переходом к действительному течению газа уравнение (7) точно так же должно быть снабжено некоторым коэффициентом, который может несколько изменить зависимость (8) и (8').

Представим формулу (9), имеющую вид более удобный для практических применений, нежели формула (9'), в более простом виде, придерживаясь снова уже сделанных нами выше допущений, что движущаяся часть газа и неподвижная имеют один и тот же химический состав, при чем отношение весов заменяется отношением абсолютных температур; допуская затем, попрежнему, что размеры печи должны удовлетворять наименее выгодному случаю (h наименьшее), когда под движущеюся струею находится слой холодного наружного воздуха, температуру которого возможно принять равною нулю, мы получим:

$$\lambda - 1 = \frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} = \frac{t}{273}$$

где t есть температура (по Ц) печных газов. При этом

$$Q = m\ Bh\sqrt{2gh}\sqrt{\frac{t}{273}} = MB\sqrt{h^3 t}. \quad . \quad . \quad (10)$$

$$h = A\sqrt[3]{\frac{Q}{B^2 t}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (11)$$

Полученною формулою возможно пользоваться для определения того максимального расстояния от пода до порога, которое может быть допущено конструктором при заданной величине Q без опасения не получить непосредственного прикосновения горячих газов к поду.

Как видно высота h вдвойне зависит от температуры печных газов: как явным образом, так и неявным через Q.

Для конкретного суждения о том, какие численные и значения может иметь коэффициент A, возможно прибегнуть к аналогии с движением воды и воспользоваться для этого опытами Базена.

При движении газа вместо воды, возможно, с одной стороны, ожидать некоторого уменьшения сопротивления вследствие большей по сравнению с водою подвижности газа и, с другой стороны, появления некоторого добавочного сопротивления на свободной поверхности от трения между движущеюся и неподвижной частью газа, которыми при движении воды считают возможным принебрегать вследствие большой разницы удельных весов воды и воздуха.

Совпадение размеров, вычисленных по формуле (11) при этих предположениях о величине численных коэффициентов, с наблюдаемыми на практике, дает основание предполагать, что вводимая аналогия между водою и газами вполне допустима и что, следовательно, обе указанные причины, изменяющие сопротивление в газе по сравнению с водою, компенсируют друг друга. Как известно, по Базену для водослива, имеющего в направлении движения ширину E и для случая, когда скорость подхода может быть принята равною нулю, возможно для коэффициента m' принять

$$m' = {}^2/_3\sqrt{{}^1/_3}\,\mu' = \left(0{,}70 + 0{,}185\,\frac{H}{E}\right)\left(0{,}405 + \frac{0{,}003}{H}\right)$$

Считая, что $\mu = \mu'$, ниже приведена таблица I коэффициентов m', m, M и A, вычисленная для высоты h на пороге в печах от 0,30 до 1,00 метра при ширине порога E, изменяющейся от 0,50 метра до бесконечности.

Таблица показывает, что коэффициент A меняется довольно слабо с изменением h, что облегчает задачу определения h из формулы (11), так как для этого возможно задаться приблизительным

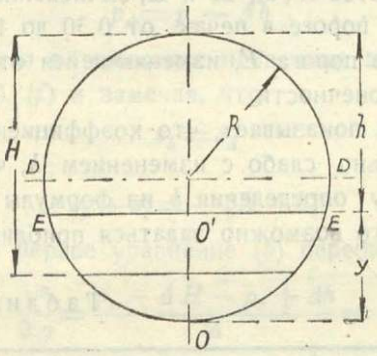
Таблица I.

h	0,30					0,40					0,50				
H	0,45					0,60					0,75				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
m'	0,357	0,323	0,306	0,295	0,288	0,378	0,333	0,310	0,296	0,287	0,400	0,343	0,314	0,298	0,286
m	0,655	0,594	0,562	0,541	0,529	0,695	0,611	0,569	0,544	0,527	0,735	0,630	0,576	0,547	0,525
M	0,175	0,159	0,151	0,145	0,142	0,186	0,164	0,152	0,146	0,141	0,197	0,169	0,154	0,147	0,141
A	3,20	3,41	3,52	3,62	3,67	3,07	3,34	3,51	3,61	3,69	2,95	3,27	3,48	3,59	3,69
h	0,60					0,75					1,00				
H	0,90					1,125					1,50				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
m'	0,424	0,353	0,320	0,299	0,286	0,455	0,371	0,328	0,303	0,286	0,535	0,398	0,340	0,307	0,285
m	0,785	0,649	0,588	0,549	0,525	0,835	0,681	0,603	0,556	0,525	0,983	0,731	0,625	0,564	0,524
M	0,220	0,174	0,157	0,147	0,141	0,224	0,183	0,162	0,149	0,141	0,263	0,196	0,168	0,151	0,140
A	2,75	3,20	3,45	3,59	3,69	2,71	3,06	3,36	3,56	3,69	2,43	2,95	3,28	3,52	3,70

значением A с тем, чтобы определив при этом h, найти из таблицы более точное и окончательное значение A.

Некоторые производства требуют прохода газов во вращающемся пространстве цилиндрического сечения. Задача определения допустимого наибольшего h в данном случае усложняется тем обстоятельством, что ширина водослива B, прежде постоянная, теперь делается зависимою от H и h; зависимость эта настолько сложного характера, что решение задачи, не представляя в теоретическом отношении особой трудности, является все же почти бесполезным для практического применения. Тем не менее и здесь возможны более простые решения, если только допустить некоторые упрощения, сущность которых будет видна из дальнейшего изложения.

Так как распределение давлений не зависит от вида поперечного сечения потока, то, очевидно, что



Фиг. 6.

скорость на подобного рода водосливе кругового сечения будет выражаться попрежнему формулою (6), и теоретический об'ем газа будет равен

$$Q_1 = F\sqrt{2g(H-h)(\lambda-1)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7')$$

где F есть площадь живого сечения струи на водосливе.

Для того, чтобы выразить эту площадь через высоту h, заменим нижнюю полуокружность сечения (фиг. 6) параболою таким образом, чтобы вершина этой параболы совпадала с нижнею точкою круга, а ветви ее проходили через концы горизонтального диаметра DD. Уравнение этой параболы, очевидно, напишется в виде.

$$x^2 = R(2R-h)$$

где x горизонтальная ее координата.

При этом, принимая во внимание выражение для площади сегмента параболы EOE, будем иметь

$$F = \pi R^2 - {}^2/_3 \overline{EE} \times \overline{OO'} = \pi R^2 - {}^4/_3 \sqrt{R}(2R-h)^{3/2}. \quad (12)$$

Для удовлетворения условия максимального расхода, очевидно, должно быть попрежнему справедливо равенство

$$\frac{dQ_1}{dh} = 0.$$

Имея в виду, что R постоянно, мы видим, что это равенство дает:

$$\frac{d}{dh}\left[\pi R^{3/2} - {}^4/_3 (2R-h)^{3/2}\right]\sqrt{H-h} = 0.$$

$$2\sqrt{2R-h}\sqrt{H-h} - \frac{\left[\pi R^{3/2} - {}^4/_3 (2R-h)^{3/2}\right]}{2\sqrt{H-h}} = 0.$$

$$4(H-h)\sqrt{2R-h} = \pi R^{3/2} - {}^4/_3 (2R-h)^{3/2}$$

Если допустить, что газы входят на порог сечением, весьма близким к кругу, то

$$H \sim 2R$$

и тогда

$$\frac{16}{3\pi}(2R-h)^{3/2} = R^{3/2}$$

откуда

$$h = \sim 0{,}65H \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13')$$

$$H = 1{,}54h \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (13)$$

С небольшою погрешностью возможно принять, что зависимость между H и h, данная формулами (13') и (13), будет близко осуществляться также и в том случае, если H не будет вполне точно равно диаметру трубы, а только лишь будет приближаться к этой величине. Имея это в виду, вставляя значения (13) и (12) в формулу (7') и, наконец, делая все прежние допущения относительно величины члена $\frac{A_i - A}{A} = \lambda - 1$, возможно найти зависимость между h и Q. Эта зависимость, хотя и несколько более сложного характера, нежели та, которая получена выше (11) для водослива прямоугольных печей, но все же дает возможность определять h в каждом частном случае, решая задачу постепенным приближением. Несомненно, необходимо при этом снабдить формулу численным коэффициентом, который за неимением других данных (не только для газа, но и для воды) по необходимости следует брать таким же, как то дано выше для прямоугольного водослива на основании опытов Базена.

Решение задачи о водосливе кругового сечения приведено здесь в виде примера, для указания, каким образом возможно решить задачу в частном случае.

Кроме случая движения по полному водосливу, т.-е. такому, в котором движение не зависит совершенно от подпора снизу, возможно себе также вообразить в практике печей случаи, когда движение газа в печи уподобляется движению по непол-

ному водосливу, т.-е. когда обстоятельства движения позади водослива начинают влиять на скорость на самом водосливе. Этот случай может быть также разрешен сравнительно весьма просто применением формул для движения по неполному водосливу капельной жидкости с соответственною их переработкою. Так как, однако, для применения этих формул весьма важно ознакомиться в начале с обстоятельствами равномерного и неравномерного движения газов в печных каналах, то мы и обратимся сначала к их изучению с тем, чтобы вернуться впоследствии и к неполному водосливу.

Равномерное движение газа.

Равномерное движение в открытом канале, как известно, может осуществляться вполне правильно только при постоянном уклоне дна, а в данном случае потолка печи, и призматической ее форме повсюду одинакового сечения. Кроме того, необходимо придать потолку достаточную длину для того, чтобы подобное равномерное движение могло установиться вслед за входом газа в печь через входное отверстие на потолок и необходимом при этом изменении скорости.

Выделим в струе газа, движущейся при указанных условиях, участок длиною l двумя нормальными к направлению движения сечениями ab и cd (фиг. 7). Так как движение равномерное, то толщина e газовой струи, соответствующая обычному понятию глубины потока капельной жидкости, будет одинакова по всей длине l. Угол наклона печи к горизонтальной линии повсюду одинаков и равен i_0.

По заданию, для равномерного движения, мы имеем, что средние скорости в обоих сечениях одинаковы. Кроме того, необходимо предположить, вследствие тождественности всех условий для движения в обоих рассматриваемых сечениях, что и распределение скоростей в них будет также одинаково, т.-е. что не только скорости средние, но и скорости отдельных элементарных струек точно так же не будут изменяться. Это обстоятельство позволяет вычислить падение энергии струи при переходе от первого сечения ко второму по энергии для любой из элементарных струек, аналогично с тем, как это принято в гидравлике капельной жидкости.

В самом деле, падение энергии w_{ac} для струйки ac и w_{bd} для струйки bd будут соответственно равны:

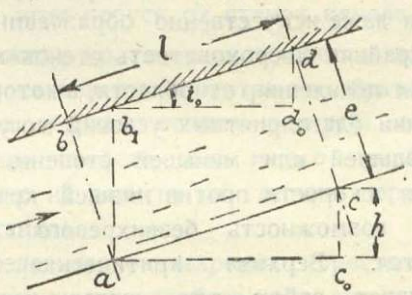
$$\left.\begin{aligned} w_{ac} &= \left(\frac{p_a}{\Delta}+\frac{v_{ac}^2}{2g}\right)-\left(h+\frac{p_c}{\Delta}+\frac{v_{ac}^2}{2g}\right)=\frac{p_a-p_c}{\Delta}-h \\ w_{bd} &= \left(\frac{p_b}{\Delta}+\frac{v_{bd}^2}{2g}\right)-\left(h+\frac{p_d}{\Delta}+\frac{v_{bd}^2}{2g}\right)=\frac{p_b-p_d}{\Delta}-h \end{aligned}\right\} \ldots (a)$$

Здесь v_{ac} и v_{bd} обозначают скорости обеих струек, одинаковые в обоих сечениях, h есть превышение точки d над точкою b вследствие уклона свода; это превышение будет иметь и точка c над точкою a вследствие одинаковой повсюду толщины e. Рассуждая аналогично тому, как это было указано в предшествующей главе, и применяя те же обозначения для неподвижного газа p_i и Δ_i, можно написать

$$\left.\begin{aligned} p_a &= p_i \\ p_c &= p_i-\Delta_i h \end{aligned}\right\} \ldots\ldots (b)$$

Делая вполне естественное предположение, что движение газа происходит параллельными струйками, необходимо принять также вытекающее из этого предположения следствие, что давления во взятых сечениях, нормальных к направлению движения, будут распределяться по законам гидростатики. Основываясь на этом и на равенствах (b), необходимо, очевидно, написать:

$$\left.\begin{aligned} p_b &= p_a-\Delta a b_1 = p_i-\Delta e\cos i_0 \\ p_d &= p_c-\Delta e\cos i_0 = p_i-\Delta_i h-\Delta e\cos i_0 \end{aligned}\right\} \ldots (c)$$



Фиг. 7.

Внося значения уравнений (b) и (c) в уравнения (a) и замечая, что

$$h = l\sin i_0 \ldots\ldots\ldots (d)$$

имеем:

$$\left.\begin{aligned} w_{ac} &= \frac{\Delta_i l\sin i_0}{\Delta}-l\sin i_0=\frac{\Delta_i-\Delta}{\Delta}l\sin i_0 \\ w_{bd} &= \frac{\Delta_i-\Delta}{\Delta}l\sin i_0 \end{aligned}\right\} \ldots (e)$$

Падение энергии на единицу веса движущейся струи или так называемое падение напора, данное уравнением (e), затрачивается на преодоление сопротивлений движению, сводящихся в данном случае к трению.

Несмотря на существование опытов над сопротивлением газов в трубах, нельзя считать законы этого сопротивления достаточно изученными. Однако, эти опыты указывают все же, что законы сопротивления движению газов аналогичны с таковыми же для капельных жидкостей в особенности в тех случаях, когда термодинамические процессы

не оказывают влияния на движение, что как раз имеет место в рассматриваемом нами случае движения газа при неизменной температуре. Это заключение позволяет думать, что и для движения газов в открытых каналах существует подобная же аналогия.

Основываясь на этом, необходимо прийти к заключению, подтверждаемому также и опытными наблюдениями, что движение газов, подобно жидкостям капельным, должно подчиняться различным законам, в зависимости оттого, происходит ли это движение с образованием или без образования вихрей.

Опыты и теоретические исследования Hagen'a, Reynolds'a, Poiseuil'я, Darcy доказали, что при движении жидкости по трубам безвихревое движение устанавливается при скоростях, меньших некоторой определенной для данной трубы скорости, называемой обыкновенно критическою. Ближайшее рассмотрение вопроса указывает на существование двух критических скоростей—верхней и нижней. Первая разделяет область движений абсолютно безвихревых, при которых вихри даже искусственно образованные затухают и крайняя шероховатость стенок не может повлечь их появления, от области, в которой вихри при наличии благоприятных условий могут возникать в большей или меньшей степени. По мере увеличения скорости против низшей критической скорости возможность безвихревого движения уменьшается. Верхняя критическая скорость характеризует собою тот предел, за которым безвихревое движение не возникает ни при каких обстоятельствах и даже при полном отсутствии шероховатости стенок движение протекает с вихрями.

Опыты и теоретические соображения, касающиеся определения величины критической скорости, указывают, что она зависит не только от размеров трубы, но и от плотности движущейся жидкости и ей обратно пропорциональна. Это дает основание предполагать, что в то время, как величины критических скоростей для жидкостей капельных получаются весьма небольшие, практически не имеющие никакого интереса, для газов, плотность которых значительно меньше, они могут в некоторых случаях возрасти до пределов, встречающихся на практике. Это обстоятельство, на которое до сего времени, насколько известно, нигде не было обращено внимание, может иметь весьма большое значение, так как может повести к применению обычных формул гидравлики предполагающих вихревое движение для случаев, когда на самом деле вихрей не образуется и само движение протекает по совершенно отличным от обычного случая законам. Устранение ошибки при этом возможно лишь при внимательном изучении каждого отдельного случая.

Величина критических скоростей дана Reynolds'ом для капельных жидкостей на основании теоретических соображений применением закона подобия; в виду этого следует с полным основанием предположить, что те же формулы не потеряют своего значения и для жидкостей газообразных. Как известно, формулы Reynolds'a имеют следующий вид:

$$\left.\begin{aligned} v_l &= \frac{0{,}204}{d}\cdot\frac{\eta}{\gamma} \\ v_h &= \frac{1{,}29}{d}\cdot\frac{\eta}{\gamma} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots (14)$$

где v_l и v_h—соответственно нижняя и верхняя критические скорости в метрах, d—диаметр трубы в метрах, η—коэффициент вязкости жидкости в абсолютных единицах, γ—вес единицы об'ема жидкости в граммах на куб. сант. Приведенные формулы для критических скоростей указывают на то, что разница между нижнею и верхнею скоростями сравнительно весьма значительна; в промежутке между ними действительное движение будет протекать по вихревому или безвихревому закону в зависимости от большей или меньшей шероховатости стенок данной трубы. Таким образом промежуточная скорость, соответствующая действительному переходу от вихревого движения к безвихревому, является функцией степени шероховатости стенок трубы. Она может быть названа предельною скоростью. Biel[1]) предлагает для определения предельной скорости v_n пользоваться формулою:

$$v_n = \frac{\varepsilon}{\sqrt{d}}\cdot\frac{\eta}{\gamma} \quad \ldots\ldots (14')$$

где, d η и γ имеют прежнее значение, а ε есть некоторый опытный коэффициент шероховатости равный 17 для гладких оцинкованных труб, 5,6 — для труб негладких чугунных; для каналов кирпичных у Biel'я значений не дается, но имея в виду даваемую им классификацию степени шероховатости, наиболее вероятным следует для этого случая признать коэффициент равным приблизительно 3. При этом значение ε и при даваемых Biel'ем значениях $\frac{\eta}{\gamma}$ для воздуха возможно получить значения предельных скоростей для разных диаметров и температур приведенные в таб. II.

---

[1]) Biel. Druckhöhenverlust bei der Fortleitung tropfbarer und gasförmiger Flüssigkeiten. Mitteilungen über Forschungsarbeiten, Heft 44.

Таблица II.

t	$\frac{\eta}{\gamma}$	ε	d													
			0,004	0,006	0,008	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
12°	0,16	17	43	35	30	27	19	13,5	11	9,5	8,5	6	4,3	3,5	3	2,7
		3	7,7	6,2	5,3	4,8	3,5	2,4	1,9	1,7	1,5	1,0	0,76	0,62	0,52	0,48
1200°	2,36	17	632	515	442	393	280	199	164	140	135	87	63	52	44	39
		3	114	91	78	71	52	35	28	25	22	15	11	9,1	7,8	7,1

При желании применить эту таблицу для труб некруглой формы или для каналов открытых, как то имеет место для рассматриваемого нами случая движения газов в металлургических печах, возможно считать, что величины предельных скоростей одинаковы для всякой формы сечения каналов, если только их гидравлический радиус R равен гидравлическому радиусу соответствующей круглой трубы, для чего, как известно, диаметр последней должен определяться уравнением:

$$d = 4R.$$

Так, например, для газовой струи в печи шириною в 1 метр и толщиною в 0,3 метра, имеющей нижнюю свободную поверхность, средней гидравлический радиус будет равен $\frac{0{,}3}{0{,}3+0{,}3+1{,}0} = 0{,}187$ м, что соответствует трубе диаметром в 0,750 м и предельной скорости около 8 метров [1]) согласно таблице для $t = 1200°$. Величина полученной скорости близка к тем, которые встречаются в металлургических печах; таким образом при рассчетах, касающихся движения газов в металлургических печах может оказаться необходимым, в противоположность тому, что мы имеем для капельных жидкостей, применять формулы не только вихревого, но и безвихревого движения в зависимости от размеров печей, температуры и физико-химических свойств данных продуктов горения.

Цифры вышеприведенной таблицы для критических скоростей не были проверены опытом для газов вообще и для сильно нагретых в особенности, а потому на них следует смотреть, как на первое приближение в попытке подойти ближе к рассматриваемому вопросу; тем не менее эти таблицы в связи с приведенными рассуждениями дают возможность сделать ряд следующих заключений:

а) При движении газов в металлургических печах, как и при движении жидкостей в трубах и каналах, должна существовать некоторая скорость, которую возможно назвать нижнею критическою скоростью и которая является верхним пределом для области движения исключительно безвихревого, и некоторая другая скорость, предельная безвихревая, которая является нижним пределом движения исключительно вихревого. Для скоростей, лежащих в пределах этих двух скоростей, движение совершается для отдельных элементарных струек частью с вихрями и частью без вихрей в зависимости от удаления этих струек от стенок канала.

б) Нижняя критическая скорость зависит от размеров канала (приблизительно обратно пропорциональна гидравлическому радиусу), от физико-химических свойств газа и его температуры и совершенно не зависит от степени шероховатости стенок канала.

в) Предельная безвихревая скорость зависит от физико-химических свойств газа, его температуры и размеров канала (приблизительно обратно пропорциональна корню квадратному из гидравлического радиуса), так и в значительной мере от степени шероховатости стенок канала.

г) Для некоторых газов при известной температуре, размерах или степени шероховатости стенок величины нижней критической скорости и предельной безвихревой могут получиться близкими к практически возможным в металлургических печах.

д) Для расчетов при скоростях ниже нижней критической следует принять формулы безвихревого движения, при скоростях выше предельной — формулы вихревого движения; при скоростях промежуточных необходимо брать некоторые средние значения из обеих категорий формул и притом тем ближе к каждой из них, чем ближе к пределам самые скорости.

Возвращаясь к выводу формулы для равномерного движения газа по наклонному потолку, оказывается после указанного необходимым рассмотреть оба случая движения вихревого и безвихревого.

[1]) Предполагается для простоты, что вязкость и вес единицы об'ема продуктов горения в печи и воздуха одинаковы.

Для вихревого движения, более полно разработанного в гидравлике как с теоретической, так и с экспериментальной стороны, является наиболее удобным принять для потери напора на трение в канале весьма распространенный вид формулы, согласно которому эта потеря выражается членом, пропорциональным квадрату средней скорости v, расстоянию между взятыми сечениями l и обратно пропорциональным первой степени гидравлического радиуса R; в связи с равенством (*e*) (стр. 89) после сокращения на l обеих частей равенства это дает:

$$k\frac{v^2}{R}=\left(\frac{\Delta_i-\Delta}{\Delta}\right)\sin i_0=(\lambda-1)\ \sin i_0 \quad . \ . \ (15)$$

где k есть коэффициент, находимый опытом.

Для установления численного значения этого коэффициента возможно воспользоваться данными Biel'я, статья которого уже цитирована выше и который, на основании весьма обстоятельных исследований и разбора существующих опытов, нашел возможным предложить формулу для k, об'единяющую все жидкости как капельные, так и газообразные, для чего коэффициент k он предполагает функцией от выражения $\frac{\eta}{\gamma}$, значение которого выяснено уже выше. По Biel'ю возможно принять:

$$k=0{,}001\left[a+\frac{f}{\sqrt{R}}+\frac{b}{v\sqrt{R}}\cdot\frac{\eta}{\gamma}\right] \quad . \ . \ . \ (16)$$

Здесь a есть некоторый постоянный коэффициент, равный 0,12; η—абсолютная вязкость движущейся жидкости, выраженная в абсолютных единицах; γ — вес одного кубического сантиметра газа в граммах; таким образом, например, для воздуха при 1200° и обыкновенном давлении при η равном 0,000548 величина $\frac{\eta}{\gamma}$ будет иметь значение 2,36; затем величины f и b, одинаковые для всех жидкостей, зависят от степени шероховатости стенок и могут быть приняты следующими:

	b	f
а) для гладкого цемента с песком и очень гладкого бетона . .	0,46	0,036
б) для гладких камней и обыкновенного бетона	0,27	0,054
в) для обыкновенного камня .	0,27	0,072
г) для необработанного камня; простой каменной кладки	$<0{,}27$	$>0{,}072$

Нетрудно видеть, что наиболее пригодным для печных каналов не особенно тщательной кладки следует считать случай «в». Принимая в дальнейшем эти значения коэффициентов и заменяя, кроме того, вес одного куб. сантиметра газа в граммах γ через вес одного куб. метра в килограммах Δ, при чем $\gamma=0{,}001\ \Delta$, получим следующее выражение для 1000 k:

$$1000\,k=0{,}12+\frac{0{,}072}{\sqrt{R}}+\frac{0{,}27\,.\,0{,}548}{\Delta}\frac{1}{v\sqrt{R}}=$$
$$=0{,}12+\frac{1}{\sqrt{R}}\left[0{,}072+\frac{0{,}148}{v\Delta}\right]$$

или с достаточною точностью:

$$1000\,k=0{,}12\left[1+\frac{0{,}6}{\sqrt{R}}\left(1+\frac{1}{v\Delta}\right)\right] \quad . \ . \ (16')$$

Принимая во внимание, что вязкость η слабо меняется с температурою и что, следовательно, принятое в формуле для k значение ее пригодно с достаточною для практики точностью для всех температур, имеющих место в металлургических печах, и что, кроме того, как вязкость, так и удельный вес воздуха и продуктов горения высокой температуры близки между собою, возможно считать полученную формулу (16′) пригодною для различного рода вычислений.

Здесь уместно осветить несколько значение величины R при движении газов в печи. В то время как при движении капельной жидкости для определения R берут лишь смоченный периметр, считая сопротивление на свободной поверхности ничтожно малым по сравнению с сопротивлением самого русла, в рассматриваемом нами случае движения газа, наоборот, будет более целесообразным и близким к истине брать полный периметр живого сечения, включая сюда, следовательно, и ширину канала по свободной поверхности; при этом, очевидно, принимаем, что неподвижная часть газа в печи, лежащая под движущейся струею, более холодная, а значит и более тяжелая (в 7—8 раз), представляет такое же сопротивление движению, как и стенка канала. Это допущение, очевидно, тем ближе будет к истине, чем менее будет увлекаться неподвижный об'ем движущимся потоком, т.-е. чем он меньше и чем ближе прилегает к твердому поду печи, что, конечно, и должно иметь место при правильно расчитанных и сконструированных печах.

Таким образом, для канала прямоугольного сечения шириною B при толщине движущейся струи e гидравлический радиус должен быть взят равным:

$$R=\frac{Be}{2(B+e)}=\frac{1}{2}\frac{1}{\frac{1}{B}+\frac{1}{e}}=\frac{1}{2}\frac{e}{1+\frac{e}{B}}$$

Для случая равномерного безвихревого движения возможно воспользоваться формулами, данными Пуазейлем и проверенными соответственными опытами как названного ученого, так и других для движения жидкостей капельных. Для жидкостей

газообразных исследований не имеется, тем не менее характер явления и полная аналогия между движениями жидкостей капельных и газообразных, особенно ясно подмеченная Билем в его цитированном уже выше сочинении, заставляют с весьма большею долею вероятности заключить, что формулы Пуазейля применимы вполне и для движения газов. К этому же приводят и теоретические выводы, дающие возможность прийти к формуле безвихревого движения тождественной по виду с формулою Пуазейля, исходя из уравнений движения Навье, применимых безразлично для жидкости капельной и газообразной. Формула Пуазейля имеет вид:

$$1000w = \frac{32\,lv}{9{,}81d^2} \cdot \frac{\eta}{\gamma} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (17)$$

где w есть потерянный напор в метрах, l — длина трубы в метрах, v — средняя скорость движения в м/сек, d –диаметр трубы в метрах, η и γ имеют те же значения, как и в формуле (16).

Для атмосферного воздуха температуры около 1200°, попрежнему, $\frac{\eta}{\gamma}$ может быть заменено выражением $\frac{0{,}548}{\Delta}$; точно так же d для каналов не кругового сечения может быть заменено через $4R$, где R есть гидравлический радиус.

При этих обозначениях, сличая уравнение (′) (стр. 89) с уравнением (17,) получим после сокращения на l:

$$\frac{0{,}032}{9{,}81} \cdot \frac{0{,}548}{\Delta} \cdot \frac{v}{16R^2} = \frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta} \sin i_0 = (\lambda - 1) \sin i_0$$

или с вполне достаточным приближением:

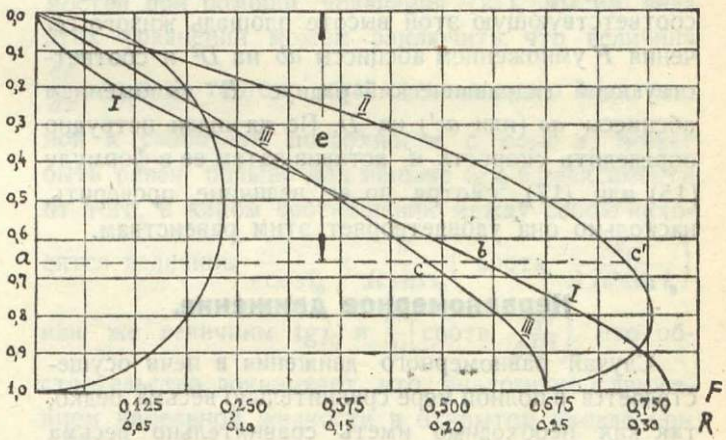
$$v = 9000\,(\Delta_i - \Delta)\,R^2 \sin i_0 = 9000\,\Delta\,(\lambda - 1)\,R^2 \sin i_0 \quad (18)$$

Формулы (18) и (15), последняя в совокупности с формулою (16) или (16′) и, наконец, формулы (14) и (14′) дают возможность решать различного рода задачи на равномерное движение в печи. Очевидно, что при этом, попрежнему, возможно в большинстве случаев практики металлургических печей, когда состав неподвижного и движущегося об'ема газа одинаков, пользоваться упрощенным выражением для $\lambda - 1 = \frac{\Delta_i - \Delta}{\Delta}$, принимая $t_i = 0$, при чем $\lambda - 1 = \frac{t}{273}$.

Из задач на равномерное движение наиболее характерными являются две.

Первая задача. Даны поперечные размеры печи и уклон ее потолка. Определить тот об'ем продуктов горения, который необходим для того, чтобы при движении они могли заполнить все сечение печи, не оставляя места неподвижному холодному об'ему на поду и чтобы в то же время давление на поду, соответствующему свободное поверхности канала, было равно наружному атмосферному во избежание прорыва печных газов наружу через рабочие отверстия печи. При подобной постановке задачи гидравлический радиус печи является заданным размерами печи и задача сводится к определенной скорости газов печи v по формуле (15) и (18). Приняв окончательно то из значений для скорости v, которое соответствует пределам, указанным формулами (14) и (14′) и зная площадь поперечного сечения печи, нетрудно определить необходимый об'ем продуктов горения, а по ним и требующийся об'ем горючего.

Вторая задача. Дан об'ем горючего и соответственный об'ем продуктов горения, протекающий в одну секунду. При заданной ширине печи прямоугольного сечения и уклоне потолка требуется определить положение свободной поверхности газового потолка и по ней задать соответственно положение пода печи. Задача эта, являясь по существу вполне определенной, тем не менее приводит к решению довольно сложного уравнения. В виду этого рекомендуется решать ее попытками, аналогично с приемами, употребляемыми в практике расчета водяных каналов. Ход решения может быть при этом нижеследующий. По об'ему газов Q, задаваясь определенною скоростью v, определяют соответствующую площадь живого сечения F и по ней, зная ширину печи, определяют глубину потока e и гидравлический радиус R. Затем, выбирая формулу (15) или (17), в зависимости от величины заданной скорости v и формул (14) и (14′), вставляют в них найденные значения R; правильно заданная скорость v должна этим уравнениям удовлетворять.



Фиг. 8. I—кривая для F; II — кривая для R: III — кривая для R при полном периметре.

При решении задач второго типа приходится иной раз иметь дело с печами непрямоугольного сечения. Очевидно в этом случае для определения R необходимо иметь закон изменения ширины печи

по свободной поверхности вместе с высотою газового потока. Здесь еще более уместен способ решения попытками. Укажем, для примера, способ нахождения положения свободной поверхности для печи круглого сечения диаметра D (подобные печи встречаются в некоторых производствах). В этом случае весьма удобно пользоваться заранее составленною диаграммою, дающею величину площади живого сечения и гидравлического радиуса в зависимости от толщины e движущегося потока. На фиг. 8 изображена половина сечения круглой печи и рядом даны кривые площади и гидр. радиуса для диаметра печи равного единице. Гидравлический радиус вычислен в двух предположениях: а) что для его вычисления необходимо принимать во внимание весь периметр живого сечения, включая и горизонтальную линию свободной поверхности, и б) что линия свободной поверхности исключается.

Задаваясь наперед какой-либо высотою e для данного секундного об'ема газа, находят по диаграмме соответствующую этой высоте площадь живого сечения F умножением абсциссы ab на D^2 и соответствующий гидравлический радиус R умножением абсциссы ac (или ac') на D. По площади нетрудно определить скорость и, вставив затем ее в формулу (15) или (17), смотря по ее величине, проверить, насколько она удовлетворяет этим равенствам.

Неравномерное движение.

Случай равномерного движения в печи осуществляется в полной мере сравнительно весьма редко, так как необходимо иметь сравнительно весьма большую длину, чтобы успела установиться надлежащая скорость равномерного движения и успели сгладиться все те обстоятельства, которые сопровождают вход газов в печь. Точно так же весьма часто в конце печи имеются пороги и другие преграды, которые не дают возможности образоваться равномерному движению на всем протяжении печи.

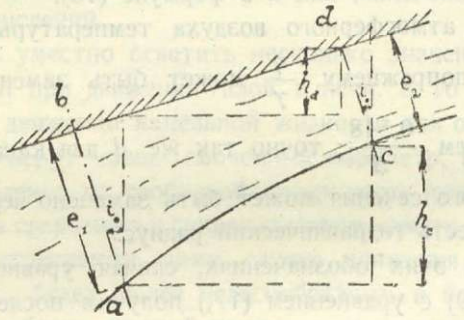
Для исследования неравномерного движения в его общем виде, рассмотрим печь с восстающим сводом, наклоненным к горизонту под углом i_0 (фиг. 9), по которому газ движется ускоренно, так как вследствие сравнительно небольшой длины свода движение еще не могло сделаться равномерным; начальная скорость и секундный об'ем газа, а, следовательно, и толщина газовой струи в начальном сечении канала, заданы условиями входа. Неравномерность движения будет иметь, очевидно, следствием, что уклон свободной поверхности i_1 будет величиною переменною, как равным образом, и глубина потока e. Определение зависимости i_0 или e от заданных условий и является ближайшею целью задачи о неравномерном движении.

Нетрудно показать, что аналогично с движением равномерным величина напора, теряемая на приращение скорости и на сопротивления, будет одинаковою для всех элементарных струек.

Возьмем два сечения рассматриваемой струи ab и cd и примем, что движение в обоих сечениях происходит струйками между собою близко параллельными, благодаря чему давления в сечениях распределяются по законам гидростатики. Напишем уравнение Бернулли для струйки ac и bd. Называя величину напора, теряемого на сопротивления соответственно w_{ac} и w_{bd}, имеем:

$$\left.\begin{aligned} \frac{p_a}{\Delta}+\frac{v_a^2}{2g}&=\frac{p_c}{\Delta}+\frac{v_c^2}{2g}+h_c+w_{ac}\\ \frac{p_b}{\Delta}+\frac{v_b^2}{2g}&=\frac{p_d}{\Delta}+\frac{v_d^2}{2g}+h_d+w_{bd}\end{aligned}\right\}\quad\ldots\quad(a)$$

Здесь значки у p и v соответствуют точкам, к которым они относятся, значение h_c и h_d видно из чертежа.



Фиг. 9.

На основании рассуждений, примененных уже выше, возможно, очевидно, написать ряд следующих равенств:

$$\left.\begin{aligned} p_a&=p_i\\ p_c&=p_i-\Delta_i h_c\\ p_b&=p_i-\Delta e_1\cos i_0\\ p_d&=p_c-\Delta e_2\cos i_0=p_i-\Delta_i h_c-\Delta e_2\cos i_0\end{aligned}\right\}\quad(b)$$

Кроме того, из чертежа усматривается, что

$$\begin{aligned} h_c&=e_1\cos i_0+h_d-e_2\cos i_0=\\ &=l\sin i_0+(e_1-e_2)\cos i_0\end{aligned}\quad\ldots\quad(c)$$

При этих равенствах из уравнений (a) имеем:

$$\left.\begin{aligned} \frac{v_c^2}{2g}-\frac{v_a^2}{2g}+w_{ac}&=\frac{\Delta_i h_c}{\Delta}-h_c=h_c\left(\frac{\Delta_i}{\Delta}-1\right)=\\ &=\left[l\sin i_0+(e_1-e_2)\cos i_0\right]\left(\frac{\Delta_i}{\Delta}-1\right)\\ \frac{v_c^2}{2g}-\frac{v_b^2}{2g}+w_{bd}&=\frac{-\Delta\cos i_0(e_1-e_2)+\Delta_i h_c}{\Delta}-h_d=\\ &=\left[l\sin i_0+(e_1-e_2)\cos i_0\right]\left(\frac{\Delta_i}{\Delta}-1\right)\end{aligned}\right\}\quad\ldots\quad(d)$$

Имея в виду, с одной стороны, полученные зависимости, одинаковые для всех элементарных струек и, с другой стороны, замечая, что сопро-

тивления w_{ac} и w_{bd} должны рассматриваться, как функции скоростных напоров, необходимо прийти к заключению, что уравнение Бернулли может быть аналогично написано и для средней скорости течения полной струи; называя средние скорости в сечениях *ab* и *cd* соответственно через v_1 и v_2 и полное сопротивление на пути от сечения *ab* до сечения *cd* через w, мы будем иметь:

$$\left.\begin{aligned}&\frac{v_2^2}{2g}-\frac{v_1^2}{2g}+w=\\&=\left[l\sin i_0+(e_1-e_2)\cos i_0\right]\left[\frac{\Delta_i}{\Delta}-1\right]=\\&=\left[l\sin i_0+(e_1-e_2)\cos i_0\right](\lambda-1)\end{aligned}\right\}\ldots(19)$$

Выражение w зависит от переменной скорости; поэтому уравнение удобно представить в дифференциальном виде, взяв расстояние l между сечениями *ab* и *cd* бесконечно малым dx; при этом член w может быть взят в том виде, какой ему придан уравнениями (15) и (17) для равномерного движения в зависимости от того, будет ли скорость v больше или меньше предельной критической.

Соответственно с этим, уравнение (19) превратится в одно из следующих двух:

$$\left.\begin{aligned}(\lambda-1)(\sin i_0\,dx-\cos i_0\,de)&=\frac{v\,dv}{g}+\frac{kv^2}{R}\,dx\\(\lambda-1)(\sin i_0\,dx-\cos i_0\,de)&=\frac{v\,dv}{g}+k_1\,\frac{v}{\Delta R^2}\,dx\end{aligned}\right\}.\ (20)$$

Знак минус перед de необходимо поставить в виду того, что при увеличении x, e согласно чертежу уменьшается.

Из этого уравнения представляется возможным исключить v при помощи уравнения расхода

$$Q=Fv=\text{Const}\ldots\ldots(21)$$

где F, очевидно, может быть выражен при заданных размерах печи через e и x. При этом в результате получается дифференциальное уравнение, дающее зависимость толщины газовой струи от x при заданной степени шероховатости печи; это уравнение является, следовательно, уравнением свободной поверхности струи в прямоугольной координатной системе (x, e).

Интегрирование этого уравнения, не представляя математических трудностей, особенно для случая постоянной ширины печи B, когда $F=Be$, приводит все же к довольно сложным выражениям, неудобным для практических приложений. Тем не менее и дифференциальный вид уравнения может указать на возможность существования прыжка в газовой струе, подобно тому, как это имеет место в струе капельной жидкости. В самом деле, из уравнения (21) в применении к каналу прямоугольной формы, после дифференцирования и умножения на $\frac{v}{e}$ имеем:

$$v\,dv+\frac{v^2}{e}\,de=0.$$

После подстановки найденного таким образом значения $v\,dv$ в уравнении (20) и некоторых простых преобразований, получим соответственно для вихревого и безвихревого движения:

$$\frac{de}{dx}=\frac{(\lambda-1)\sin i_0-\frac{kv^2}{R}}{(\lambda-1)\cos i_0-\frac{v^2}{e}}=tg\,i_0\,\frac{\lambda-1-\frac{kv^2}{R\sin i_0}}{\lambda-1-\frac{v^2}{e\cos i_0}}$$

и

$$\frac{de}{dx}=\frac{(\lambda-1)\sin i_0-\frac{k_1 v}{\Delta R^2}}{(\lambda-1)\cos i_0-\frac{v^2}{e}}=tg\,i_0\,\frac{\lambda-1-\frac{k_1 v}{\Delta R^2\sin i^0}}{\lambda-1-\frac{v^2}{e\cos i_0}}$$

Замечая, что R есть также функция e, что v весьма легко исключается из полученных зависимостей при помощи уравнения (21), мы из вида этих уравнений можем заключить, что величина $\frac{de}{dx}$, то-есть тангенс угла, составляемого касательной к свободной поверхности с осью x, может быть равен, больше или меньше $tg\,i_0$ в зависимости от того, в каком соотношении между собою находятся величины $\frac{1}{e\cos i_0}$ и $\frac{k}{R\sin i_0}\left(\text{соотв. }\frac{k_1}{\Delta R^2\sin i_0}\right)$ или же величины $tg\,i_0$ и $\frac{ke}{R}\left(\text{соотв. }\frac{k_1 e}{\Delta R^2}\right)$. Это обстоятельство доказывает, что, аналогично с движением капельной жидкости в открытом канале, при соблюдении некоторых условий, касающихся уклона потолка, степени шероховатости стенок, поперечных размеров печи (а следовательно и скорости), возможно образование прыжка.

Эта возможность сохраняется, очевидно, и при обратном уклоне потолка (понуром своде), и при отсутствии уклона, т.-е. горизонтальном своде.

Нам кажется, что подобное обстоятельство может на практике повести к неожиданным результатам и об'яснить плохое действие и отсутствие достаточного обогревания некоторого пространства печи, сконструированной на первый взгляд во всех отношениях вполне удовлетворительно. К сожалению, сложность выражения для $\frac{de}{dx}$ делает бесполезным в практическом отношении вывод каких-либо общих зависимостей, пригодных для проверки печных конструкций при всевозможных условиях. Задача может быть удобно доведена до конца лишь в каждом частном случае при известных размерах печи и, особенно, при заданном расположении входных отверстий относительно потолка ее. Здесь мы

считаем достаточным ограничиться только лишь указанием на возможность подобного рода явлений в печи.

На практике, в большинстве случаев, достаточно лишь знать толщину газовой струи, движущейся по потолку, в начале и конце свода с тем, чтобы руководиться этим при общем расположении пода печи; как то указывалось неоднократно выше, последний для возможности его непосредственного обогревания горячими газами не должен помещаться ниже свободной поверхности газового потока.

В этом случае следует интегрировать уравнение (20) по всей длине печи, или, еще проще, воспользоваться непосредственно уравнением (19), заменив лишь в нем l через L, длину всей печи, и w через w_L — сопротивление на всей длине печи.

Предполагая непрерывное изменение живого сечения и скорости при движении и параллельность струй в каждом сечении, возможно, очевидно, для w_L написать следующие выражения, соответственно для вихревого и безвихревого движения:

$$w = \int_0^L \frac{kv^2}{R}\,dx$$

$$w_L = \int_0^L \frac{k_1 v}{AR^2}\,dx$$

Так как обычно размер печи, а следовательно, и скорости будут отличаться между собою незначительно в начале и конце печи, то написанные интегралы могут быть с достаточною для практики точностью заменены их средними значениями, вычисленными по средним значениям под'интегральной функции; при этом:

$$\left.\begin{aligned} w_L &= L\left(\frac{kv^2}{R}\right)_{cp} \\ w_L &= kL\left(\frac{v}{R^2}\right)_{cp} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots (22)$$

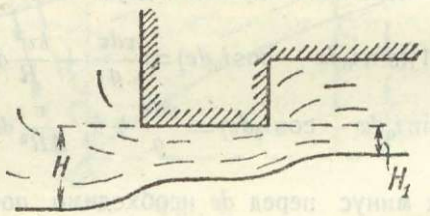
при чем средние величины могут быть найдены или как средние арифметические между их крайними значениями, или, точнее, могут быть вычислены по средней арифметической скорости из соответствующих формул. Применяя этот последний способ для случая прямоугольного сечения постоянной ширины B, когда F зависит от одной переменной e, заменяя скорость v через Q из формулы (21), окончательно получим соответственно для вихревого и безвихревого движения:

$$\left.\begin{aligned} (\lambda-1)\,[L\sin i_0 + (e_1-e_2)\cos i_0] &= \\ = \frac{Q^2}{B^2}\left[\left(\frac{1}{e_2^2}-\frac{1}{e_1^2}\right)+\frac{k_{cp}L}{4R_{cp}}\left(\frac{1}{e_1}+\frac{1}{e_2}\right)^2\right] & \\ (\lambda-1)\,[L\sin i_0 + (e_1-e_2)\cos i_0] &= \\ = \frac{Q^2}{2gB^2}\left(\frac{1}{e_2^2}-\frac{1}{e_1^2}\right)+k_1\frac{LQ}{2R_{cp}^2 B}\left(\frac{1}{e_1}+\frac{1}{e_2}\right) & \end{aligned}\right\} \quad \ldots (23)$$

Эти уравнения, заключая две переменные величины, могут послужить для определения одной из них по заданной другой, при чем решение уравнения, попрежнему, наиболее удобно вести методом постепенного приближения. Если бы канал был большой длины и показалось бы желательным произвести вычисления более точным образом, то его возможно было бы разбить по длине на участки определенной длины и для каждого из них последовательно вычислить одну из величин e по заданной другой. При этом, очевидно, весьма удобно и возможно было бы принять во внимание и падение температуры, так как не представлялось бы затруднительным принять ее неодинаковою для различных участков.

Уравнение (23) применимо одинаково, как для i_0 положительного, так и отрицательного, то-есть как для восходящего, так и для нисходящего свода.

Равным образом оно позволяет решать вопросы и о движении газовой струи, подпертой в конце канала, данного уклона порогом некоторой высоты. При этом высота струи, переливающейся через порог, должна быть определена по формулам, данным на стр. 87.



Фиг. 10.

С задачей о неравномерном движении тесно соприкасается также и вопрос о движении жидкости по несовершенному водосливу, т.-е. такому случаю движения через порог, при котором струя его покидающая движется не свободным движением, а является подпертой и тем самым влияет на расход на водосливе.

Этот случай неравномерного движения, при котором поверхность дна потока не только не представляется прямою линиею, но даже не является и плавною кривою, считается одним из наиболее сложных даже в гидравлике капельной жидкости и до сих пор не во всех подробностях исследован теоретически: тем более возможно ожидать усложнений при рассматриваемом нами движении.

Нам кажется, что здесь вполне уместно было бы ограничиться формулою вида, данного Дюбуа:

$$Q = \mu B \cdot \left(H + \frac{H_1}{2}\right)\sqrt{2g(H-H_1)}$$

где μ — практический коэффициент, равный в зависимости от меньшей или большей ширины порога от 0,40 до 0,42; B — длина ребра водослива, счи-

таемая в направлении перпендикулярном к движению; H и H_1 — высота соответственно верхнего и нижнего уровней над порогом водослива (фиг. 10). Эта формула выведена в предположении, что об'ем жидкости, движущейся через водослив выше нижнего уровня, может быть найден по формуле совершенного водослива, а остальной об'ем жидкости по формуле истечения через заполненное отверстие; полный об'ем находится сложением этих двух об'емов, что и выражено формулою Дюбуа. Имея это в виду, нетрудно применить эту последнюю для движения газа, воспользовавшись для этого всеми теми рассуждениями, которые были приведены выше в соответствующих главах.

При этом формула в случае газа должна принять нижеследующий вид:

$$Q=\mu B\cdot\left(H+\frac{H_1}{2}\right)\sqrt{2g(H-H_1)}\sqrt{(\lambda-1)}\quad\ldots\quad(24)$$

Комбинации простых случаев движения.

В настоящей главе, в виде иллюстрации применения выведенных выше формул, будут даны схемы решения некоторых случаев движения газов, которые могут иметь применение на практике. При этом, для простоты, нами повсюду будет предполагаться лишь одно вихревое движение.

1) Дымовая труба. Обычно наблюдаемый на практике случай движения газов в вертикальной дымовой трубе является движением по сплошь заполненной трубе, а потому выведенные выше формулы свободного движения не могут быть непосредственно к нему применены. Тем не менее, как видно из дальнейшего, при некоторых условиях обстоятельства движения могут изменяться в пользу их применения.

Предположим, что непосредственно пред вступлением в дымовую трубу, высотою h и постоянного поперечного сечения F, газ имеет некоторую скорость v_1, которая в трубе переходит в скорость v, удовлетворяя уравнению расхода

$$Q=Fv=F_1v_1$$

Уравнение Бернулли, написанное для сечения первого, непосредственного предшествующего входу в трубе, и для сечения второго, выходного, лежащего на высоте h над первым, примет при прежних обозначениях следующий вид:

$$\frac{p_1}{\Delta}+\frac{v_1^2}{2g}=h+\frac{p_2}{\Delta}+\frac{v^2}{2g}+\frac{khv^2}{R}$$

Давление p_1 внизу трубы определяется по условиям движения, предшествующим дымовой трубе (см., напр., следующий пример). Имея в виду наиболее полно оттенить характер явления, предположим наиболее простой случай, что давление p_1 равно давлению наружного воздуха p_i на том же уровне (например, вследствие наличия рабочего отверстия в печи)

$$p_1=p_i$$

Давление p_2 при выходе наружу должно равняться давлению наружного воздуха на той же высоте:

$$p_2=p_1-\Delta_i h.$$

Таким образом имеем:

$$\frac{v^2}{2g}-\left(\frac{F}{F_1}\right)^2\frac{v^2}{2g}+\frac{kLv^2}{R}=-h+\frac{\Delta_i}{\Delta}h=h(\lambda-1)\quad(25)$$

Полученное уравнение заключает одно неизвестное v, которое и может быть из него определено.

Особенно простой вид получит выражение для v в том случае, если $F=F_1$, т.-е. $v=v_1$, тогда, очевидно, весь свободный напор в дымовой трубе, величина которого определяется второю частью уравнения (25), идет только на преодоление трения в трубе; при этом, имея в виду, что $h=L$,

$$v=\sqrt{\frac{1}{k}}\sqrt{R}\sqrt{\lambda-1}\quad\ldots\quad(26)$$

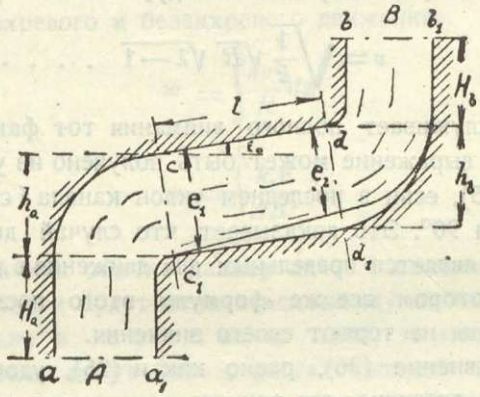
Заслуживает полного внимания тот факт, что то же выражение может быть получено из уравнения (15), если в последнем уклон канала i считать равным 90°. Это доказывает, что случай дымовой трубы является предельным для движения в канале, при котором все же формулы этого последнего движения не теряют своего значения.

Уравнение (26), равно как и (25), удовлетворяется, очевидно, для данного поперечного размера труб, а, значит, и данного R только при вполне определенном об'еме протекающего газа, а, следовательно, при вполне определенной температуре, как его самого, так и окружающего воздуха, которая устанавливает значения Q, k и λ.

Таким образом труба, работающая удовлетворительно при некоторой температуре, при изменении ее или не будет в состоянии пропустить данного количества газов при давлении атмосферном («печь дымит») в полости печи, или же не будет сплошь заполнена. Отсюда следует также заключить, что предвидя постепенное охлаждение газов в дымовой трубе, будет ошибочным проектировать ее повсюду одинакового сечения без сужения кверху. Если вследствие изменившихся условий труба не будет сплошь заполнена газом, то в ней возможно или беспорядочное движение последнего, отдельными, между собою несвязанными струйками с неподвижными промежутками, или же, что более вероятно и естественно, газ будет двигаться сплошною струею, прикасающеюся к одной из стенок трубы в зависимости от какой-либо случайной несимметричности в трубе (напр., ветер с одной сто-

роны, более сильное охлаждение и т. п.). Подобный поток делается еще более определенным, если, как то обычно и бывает, дымовая труба кверху суживается, т.-е. ее стенки несколько наклонны кверху и угол i_0 не равен 90°, а несколько меньше. Тогда в полной мере является применимою формула (15) и положение свободной поверхности потока определяется вполне.

Положение свободной поверхности в трубе определяет также и величину неподвижного об'ема более холодного газа. С весьма большою долею вероятности возможно предположить, что этот об'ем не будет совершенно неподвижным, а, напротив, будет иметь медленное движение книзу, постепенно нагреваясь и смешиваясь с горячим потоком. Некоторые опыты над дымовыми трубами домовых печей указывают на полную возможность такого движения вниз и проникновения в печную полость холодного воздуха, например, при работе небольшого количества из большой серии печей, дымоходы которых соединены в одну общую дымовую трубу.



Фиг. 11.

В виду изложенных обстоятельств проверка действия дымовой трубы при различных вероятных условиях ее работы при помощи формул свободного течения может представить интерес и оказать пользу в определении размеров как ее самой, так и тех регулирующих приспособлений, которые должны быть на ней поставлены для восстановления всякий раз ее правильного действия.

2) Дымовая труба, печь и топочная камера. Имеется свод длиною l (фиг. 11) с уклоном i_0, в которой газ в заданном секундном количестве Q, при известной температуре, поступает из вертикальной печной полости A высотою H_a; из печи газ уходит в вертикальную трубу высотою H_b. Рассматриваемая система каналов окружена наружным воздухом одинаковой повсюду температуры; для удобства обслуживания печи и возможно полного устранения выбивания пламени через рабочие отверстия, расположенные вдоль пода, давление в них по возможности не должно быть больше давления наружного воздуха; с другой стороны невозможно также допустить засасывания в печь через рабочие отверстия холодного наружного воздуха. Совокупность этих двух требований приводит к необходимости в нижней точке рабочего отверстия, т.-е. точке наименьшего давления держать его равным давлению наружного воздуха. Однако, при расчете печи будет более удобным и наглядным предположить, что на поду печи имеется слой неподвижного холодного газа и воздуха некоторой конечной толщины. Определив затем толщину газовой струи и положение ее нижней свободной поверхности, возможно под печи c_1d_1 расположить от нее сколь угодно близко, уменьшив до нуля пространство неподвижного газа.

Истечение в начальном сечении свода cc_1 является истечением под уровнем, рассмотренным выше.

Если обозначить давление наружного воздуха в aa_1 (где предполагается в печи топочное отверстие и где скорость газа еще равна нулю) через p_i, то при обозначениях чертежа, очевидно, возможно написать следующее уравнение:

$$(\lambda-1)H_a=\frac{v_c^2}{2g}+\frac{k_a l_a v_a^2}{R_a}+\zeta_c\frac{v_c^2}{2g}$$

Здесь v_c — скорость в сечении cc_1, v_a — скорость в вертикальном (призматическом) канале A, R_a его гидравлический радиус, l_a длина, k_a соответствующий коэффициент трения, $\zeta_c\frac{v_c^2}{2g}$ выражает собою высоту ,теряемую на местные гидравлические сопротивления в закруглении и др. Предполагая для простоты в нашем частном случае, что $l_a=H_a$; $v_a=v_c$ (т.-е. $F_a=F_c$) возможно, очевидно, на основании составленного выше выражения написать:

$$Q=F_a\sqrt{\frac{1}{\frac{1}{2g}+\frac{k_a H_a}{R_a}+\zeta_c}}\sqrt{(\lambda-1)H_a}\ . \quad (a)$$

Коэффициент ζ_c может быть определен по данным и формулам, существующим для воды, так как имеющиеся наблюдения указывают на допустимость подобного рода приема. Уравнение (a) дает возможность при заданных H_a и Q определить попытками поперечные размеры канала A и, вместе с тем, и толщину газовой струи e_1 при входе на наклонный свод.

Для дальнейшего движения газов по своду необходимо применить уравнения неравномерного движения, данные в предшествующей главе. Если ограничиться временно лишь определением толщины струи e_2 в конечном сечении свода dd_1, то возможно непосредственно применить уравнение (23), которое решается попытками.

При известной толщине e_2 становится также известной и соответствующая ей скорость v_2, с которою газ покидает свод и вступает в вертикальную трубу B. Совершенно аналогично с уравнением, написанным выше для канала A, принимая, что в точке d_1, и на верхнем уровне трубы $b—b_1$ внутреннее давление равно наружному, возможно, очевидно, написать при обозначениях фиг. 11:

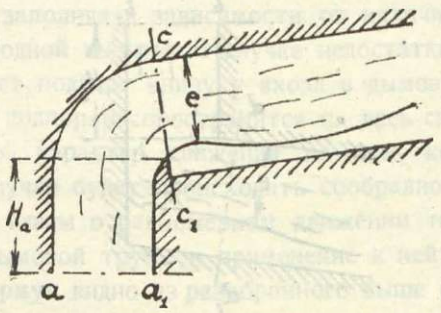
$$(\lambda-1)(H_b+h_b)=\frac{h_b l_b v_b^2}{R_b}-\frac{v_2^2}{2g}+\zeta_b\frac{v_b^2}{2g}+\frac{v_b^2}{2g} \quad . (b)$$

здесь значками b обозначены все величины, относящиеся к трубе B.

Уравнение (b), решаемое попытками, дает возможность определить необходимую длину l_b и соответствующих высот H_b+h_b трубы при заданных поперечных ее размерах, т.-е. R_b и v_b.

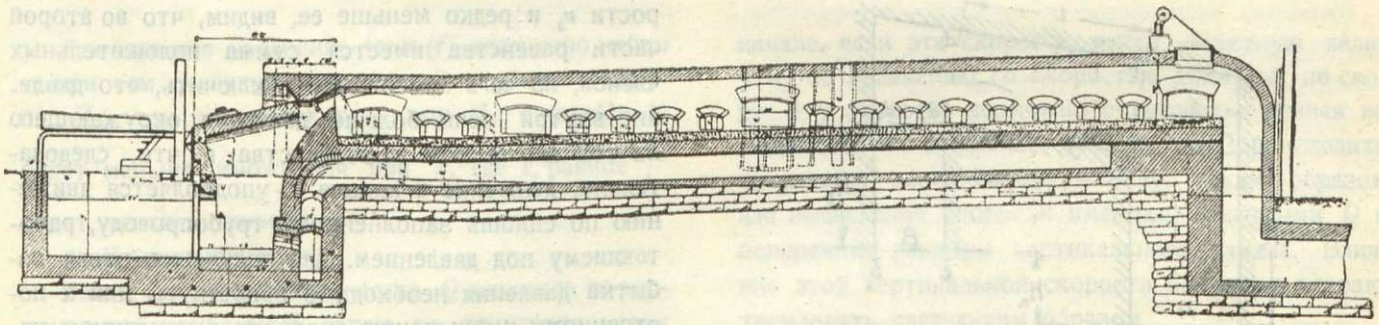
Нетрудно видеть, что задавая $v_b=v_2$, делая закругление внизу трубы настолько плавным, чтоб ζ_b возможно было считать равным нулю, и предполагая, наконец, что $H_b+h_b=l_b$, мы делаем движение в трубе независимым от ее высоты, что доказывает, что в этом случае для удаления печных газов не требуется особой тяги в трубе. Очевидно, этот несколько парадоксальный вывод необходимо об'яснить тем, что скорость $v_b=v_2$, требующаяся для удаления газов, уже образовалась в самой печной полости. Во всех остальных случаях из совокупности всех написанных уравнений усматривается, что степень шероховатости стенок, уклон свода i_0, его поперечные размеры не являются величинами произвольными, но связаны вполне определенным образом с размерами обеих вертикальных труб, подводящей и отводящей горячие газы и, кроме того также и с температурою и об'емным весом движущегося газа.

При желании найти точную кривую нижней свободной поверхности газового потока, кроме двух ее крайних точек, определяемых толщиною струи e_1 и e_2 в начале и конце свода, необходимо прибегнуть к решению уравнения неравномерного движения по своду для последовательных его сечений, что весьма удобно может быть достигнуто попытками. При этом полезно обратить внимание, что при некоторых соотношениях вертикального канала A и размеров и уклона свода скорость входа на свод в сечении ee_1 будет настолько велика, что окажется больше скорости равномерного движения по своду и, следовательно, не только не будет увеличиваться при движении по своду, а, наоборот, станет уменьшаться и газовая струя начнет утолщаться (фиг. 12). При этом явлении весьма легко может получиться, вместо плавного утолщения струи—внезапное, то-есть так называемый прыжок—более или менее удаленный от входного сечения cc_1 и сопровождающийся, подобно



Фиг. 12.

прыжку водяному, энергичным вихревым движением на свободной поверхности. Образование прыжка, очевидно, более возможно при расположении узкого, т.-е. соответствующего большей скорости, входного сечения не у пода, а у свода печи, как то, например, имеет место в конструкции печи Путиловского завода, изображенной в качестве одного из примеров в статье проф. В. Е. Грум-Гржимайло «Гидравлический метод рассчета пламенных печей» [1]) (см. фиг. 13).



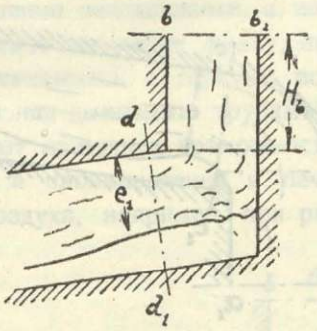
Фиг. 13.

Явление прыжка, особенно сравнительно удаленного от выходного отверстия (что возможно проверить, решая уравнение неравномерного движения предыдущей главы), может оказать весьма неблагоприятное влияние на степень обогрева пода под отверстием до места образования прыжка. Очевидно, предметы, помещенные в это пространство на поду печи, будут слабо нагреваться, а так как

[1]) Журнал Р. Мет. Общ. 1911 г., 1 ч., 199.

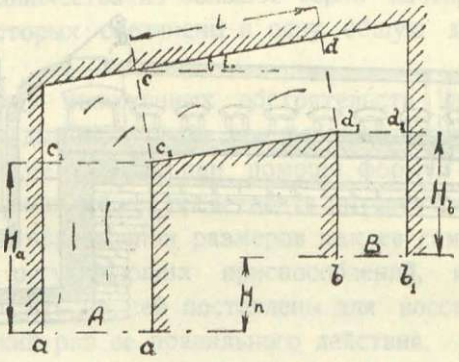
на этом входном участке печи, кроме того, весьма вероятно еще окончание реакции горения, незаконченной в топочной полости, то становится возможным осаждение копоти на холодных плохо прогреваемых предметах.

Несомненно, что движение газа в каналах, не снабженных плавными переходами, будет отличаться от описанного выше появлением значительных сопротивлений в закруглениях. В особенности значительны могут быть сопротивления за сечением dd_1, если за ним не будет плавного перехода, как например, изображено на фиг. 14. В этом случае,



Фиг. 14.

очевидно, газ, движущийся в сечении dd_1, не направится непосредственно в трубу, а, стремясь сохранить приобретенную скорость, будет двигаться до вертикальной стенки и лишь затем направится вверх, при чем вероятно вся энергия, соответствующая прежней скорости, будет потеряна на вихревые движения, благодаря чему необходимо предвидеть соответствующий напор на образование скорости в нижнем сечении трубы в вертикальном направлении.



Фиг. 15.

3) Топочная камера, печь и нисходящий отводной канал.

Газ в секундном об'еме Q поднимается по вертикальной трубе A (фиг. 15) на высоту H_a до сечения c_1c_2, затем переходит в канал с уклоном i_0 и длиною L и уходит по вертикальной направленной вниз трубе B, высотою H_b.

В этом примере мы встречаемся с движением газа по вертикальной трубе вниз. Необходимое для этого давление в вертикальном сечении $d—d_1$ в канале L на высоте H_b над выходным течением $b—b_1$ трубы B может быть найдено из соответственным образом написанного уравнения Бернулли.

Аналогично с предыдущим, очевидно, получим для двух сечений $d—d_1$ и $b—b_1$:

$$\frac{v_2^2}{2g}+\frac{p_d}{\Delta}+H_b=\frac{v_b^2}{2g}+\frac{p_b}{\Delta}+\frac{k_b H_b}{R_b}\cdot\frac{v_b^2}{2g}+\zeta_b\frac{v_b^2}{2g} \quad . (c)$$

здесь v_2 и v_b соответственно скорости в конце канала в сечении $d—d_1$ и в трубе B, p_d—давление в точке d_1 и p_b—давление в сечении $b—b_1$; два последних члена уравнения соответствуют потерям на трение в трубе и в закруглении при переходе от сечения $d—d_1$ со скоростью v_2 к сечению $b—b_1$ со скоростью v_b.

В полученном уравнении (c) возможно выразить давление p_b на уровне $b—b_1$ через давление наружного воздуха p_i на уровне $d_1—d$, пользуясь тем, что при выходе из вертикального канала в атмосферу давление p_b внутри канала и снаружи должно быть одинаковым.

При этом, очевидно, имеем:

$$p_b=p_i+\Delta_i H_b \quad . . . . . (d)$$

Подставляя эти значения в уравнение (c), получим

$$\frac{p_d-p_i}{\Delta}=H_b(\lambda-1)+\frac{k_b H_b}{R_b}\cdot\frac{v_b^2}{2g}+\frac{v_b^2}{2g}-$$

$$-\frac{v_2^2}{2g}+\zeta_b\frac{v_b^2}{2g} \quad . . . . . (e)$$

замечая, что скорость v_b обыкновенно равна скорости v_2 и редко меньше ее, видим, что во второй части равенства имеется сумма положительных членов, из чего необходимо заключить, что давление внутри печи больше давления окружающего на той же высоте пространства и что, следовательно, движение в канале L уподобляется движению по сплошь заполненному трубопроводу, работающему под давлением. Для получения этого избытка давления необходимо прибегнуть или к постоянному уменьшению скорости в наклонном канале и переводу ее в давление, или же к поддерживанию избытка давления по всей длине этого канала.

Первый способ увеличения давления за счет скорости, как это указывает обширная практика движения воды, не может быть признан надежным и не дает надежных, наперед учитываемых результатов вследствие стремления жидкости сохранить прежнюю большую скорость с переходом в винтовое и затем вихревое движение. Таким образом остается лишь второй способ.

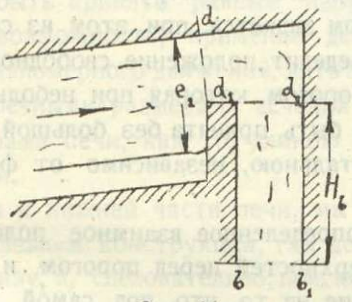
Все же и при этом расположении печных каналов возможно представить себе случай, когда движение газов в канале L должно совершаться при существовании нижней свободной поверхности, Этот случай будет иметь место тогда, когда газы на этом канале имеют значительную температуру и затем быстро ее теряют при переходе в вертикальный канал (например, от прикосновения к холодным болванкам). Если свободную поверхность газовой струи сильно нагретой опустить ниже отверстия d—d_1 (фиг. 16), то можно достичь в точке d_1 требуемой уравнением (*e*) разности давлений p_d—p_i.

В самом деле, называя вертикальное расстояние свободной поверхности газа от точки d_1 через x и вес единицы об'ема сильно нагретого газа через Δ_a, получим, что давление p_a на уровне свободной поверхности, равное для движущейся и неподвижной части газа, будет удовлетворять уравнению.

$$p_d = p_a - \Delta_a x$$
$$p_i = p_a - \Delta_i x$$

откуда

$$\frac{p_d - p_i}{\Delta} = \frac{\Delta_i - \Delta_a}{\Delta} x = (\lambda - \varepsilon) x \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (f)$$



Фиг. 16.

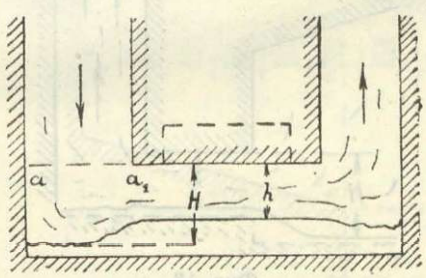
Сопоставляя уравнение (*e*) и (*f*), возможно найти x, при чем очевидно, что оно может быть и меньше H_b, так как множитель при H_b, т.-е. $(\lambda—1)$ будет меньше множителя при x, где ε, равное $\frac{\Delta_a}{\Delta}$ будет меньше единицы.

4) Порог в печи.

Газ в секундном количестве Q движется по вертикальной трубе вниз, затем по горизонтальному или слабо наклонному каналу и, наконец, выходит в вертикальную, направленную вверх трубу (фиг. 17).

Наиболее просто этот случай разрешается теоретически при соблюдении трех условий: a) что скорость опускания вниз газа ничтожно мала, b) что свод горизонтален, и c) что на выход газа в дымовую трубу и на преодоление сопротивлений при входе в нее от перемены направления требуется напор не больше того, который получается при свободном движении газовой струи по своду, т.-е. без подпора со стороны дымовой трубы. При соблюдении этих условий получается случай вполне тождественный с описанным выше для движения жидкости по водосливу с широким порогом. Проверка соблюдения первых двух условий может быть сделана непосредственно, что же касается третьего условия, то проверка его возможна лишь после вычисления по формуле водослива (стр. 87) величины h—толщины газовой струи на своде. Зная ее, нетрудно вычислить из данной высоты дымовой трубы, достаточно ли ее сечение в связи с высотою h для пропуска газов. Если достаточно или если имеется запас высоты, то газ будет двигаться по дымовой трубе свободным движением, заполняя ее сплошь или не заполняя в зависимости от наличия избытка свободной высоты. В случае недостатка высоты газ будет подперт внизу у входа в дымовую трубу и этот подпор распространится на весь свод, обусловливая характер движения на нем, которое в этом случае будет происходить сообразно с формулами главы о равномерном движении газа. Действие дымовой трубы и применение к ней выведенных формул видно из разобранного выше случая 1.

Несколько сложнее представляется влияние скорости опускания газа в подводящем вертикальном



Фиг. 17.

канале, если эта скорость имеет заметную величину по сравнению со скоростью движения по своду. Эту скорость возможно определить, приняв во внимание, что движение вниз может происходить по сплошь заполненному каналу; таким образом для вычисления скорости имеются заданными Q и поперечные размеры вертикального канала. Влияние этой вертикальной скорости возможно охарактеризовать следующим образом.

Дойдя в вертикальном движении до сечения $a\,a_1$, газ начнет отчасти изменять направление, отчасти же по инерции, благодаря присущей ему скорости, будет продолжать движение до полного уничтожения последней, при чем естественно ожидать развития беспорядочного местного движения, которое поглотит значительную часть всего скоростного напора. Наиболее естественным будет считать, что половина напора будет потеряна и только лишь другая половина будет восстановлена в виде образования, некоторой высоты H_k струи при входе на свод печи.

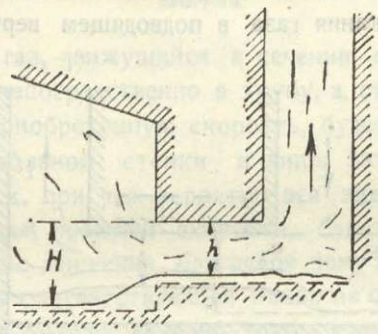
Для вычисления этой высоты, происходящей от скоростного напора, возможно воспользоваться выше данной формулою газового фонтана, положив в ней $\delta = 90°$. При этом H_k получится равною

$$H_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{273 + t_i}{t - t_i}.$$

Если, например, принять для v значение в 5 метров в секунду и положить $t_i = 0$ и $t = 1000°$, то

$$H_k = \frac{1}{2} \cdot \frac{5^2}{19{,}62} \cdot \frac{273}{1000} = 0{,}17 \text{ м.}$$

Так как толщину струи на своде обыкновенно надо считать не меньше 0,30 м., то напор H на водосливе, необходимый для образования такой толщины струи, должен быть не меньше $1{,}5 \times 0{,}30$, т.-е. 0,45 м. Это показывает, что высота H_k, образуемая уничтожением скорости в вертикальном направлении, покрывается с избытком естественною высотою H, образующеюся перед водосливом, а потому при обычных размерах печей особого практического значения не имеет.



Фиг. 18.

Наконец, необходимо рассмотреть неточность, вносимую наклоном свода к горизонту. Практика водослива для воды, особенно опыты Базена и Рафтера показали, что наклон порога водослива начинает влиять на расход только при сравнительно значительном уклоне, превосходящем 1 : 5 и выше. При тех же условиях, которые встречаются на практике, обычно влиянием этого уклона возможно без заметной погрешности пренебречь.

В результате рассмотрения всех условий движения в данном случае как при точном выполнении требований главы об истечении через водослив, так и при отступлениях от нее, указывают, что при размерах печей, встречаемых на практике, обычно возможно пользоваться формулами водослива, рассматривая всю длину свода печи как широкий порог водослива и применяя, следовательно, формулу (11), для определения толщины газовой струи на своде.

Дальнейшим развитием задачи о водосливе является рассмотрение движения газа по своду, имеющему местное углубление, указанное на фиг. 17 пунктиром, что, в результате, превращает свод в камеру с двумя порогами, в начале и в конце. Очевидно, что если углубление будет иметь сравнительно небольшую длину, так что газовая струя будет «проскакивать» под ним, не нарушая покоя находящегося в углублении горячего газа, то сущность явления не изменится и формула (11) может попрежнему найти применение. Очевидно также, что возможная для этого длина углубления зависит в высокой степени от скорости движения газов. Каких-либо конкретных данных на этот предмет совершенно не имеется. При большой длине углубления, очевидно, задача сводится к определению обстоятельств движения по трем отдельным частям печи: по переднему порогу, представляющему неполный или полный водослив в зависимости от положения его нижней кромки на большей или меньшей высоте над кромкою заднего порога, по заднему порогу, представляющему полный водослив и, наконец, среднюю часть, представляющую собой канал с неравномерным, подпертым задним порогом движением (фиг. 18). Очевидно, что высота струи на заднем пороге определяется попрежнему по формуле (11). Высота струи H непосредственно перед порогом задается при этом из соотношения (8); она определит положение свободной поверхности перед порогом, которая при небольшой длине печи может быть принята без большой погрешности горизонтальною, независимо от формы свода самой печи.

Вполне определенное взаимное положение свободных поверхностей перед порогом и на пороге дает указание на то, что под самой печи и под ниже порога должны быть сделаны не на одной высоте, а как указано на фиг. 18 пунктиром, если не желают получить под порогом об'ема неподвижного, холодного газа.

5) Печь с двумя потоками газа, горячим и охлажденным.

На поду печи *о—о* (фиг. 19) лежат болванки, подлежащие подогреву. Горячие газы, движущиеся по понурому своду печи, прикасаясь к холодным болванкам, значительно охлаждаются, при чем направляются вертикально вниз в нижнее отделение печи, где вновь приобретают горизонтальное направление и направляются в нижний вертикальный канал для дальнейшего отвода в дымовую трубу.

Весьма важным условием правильного действия подобной печи является то, чтобы на уровне пода *о—о*, там, где имеется ряд рабочих отверстий для передвижения болванок, давление внутри печи и снаружи было одинаково. При этом не будет как выбивания пламени из печи, так и засасывания наружного воздуха в печь.

При соблюдении этого условия печь делится горизонтальною линиею $o—o$, на две части, которые возможно рассматривать вполне самостоятельно. В верхней имеется движение газов более нагретых из пространства топки с давлением, равным наружному, по своду печи до пода, тоже имеющего давление, равное наружному, а в нижней части движется газ охлажденный, из пространства точно так же с давлением равным наружному, через дымовую трубу в наружное пространство. Очевидно, что как в первой части, так и во второй, необходимо для осуществления движения расположить входное отверстие ниже выходного, т.-е. топочное отверстие ниже уровня $o—o$ и этот последний, в свою очередь, ниже отверстия дымовой трубы.

Понурый свод верхней части почти обусловливается тем, чтобы получить уменьшение поперечных размеров последней по мере уменьшения количества движущегося по своду газа, по мере того, как он уходит вниз через промежутки между болванками. С другой стороны, понурый свод приводит к движению по сплошь заполненному каналу печи перед сечением $a—a$.

Так как давление в нижней точке этого сечения может быть принято равным наружному, то получается возможность, применив данные выше уравнения равномерного движения, дать зависимость между поперечными размерами сечений $a—a$ и другими размерами печи, как то, длиною свода и высотою топки.

Переходя к нижней части печи, мы видим, что здесь, по условиям конструкции, газ должен отсасываться книзу, а, следовательно, повсюду давление должно быть меньше наружного и, таким образом, движение не может иметь свободной поверхности, но должно совершаться по сплошь заполненным каналам.

Если задаться поперечными размерами каналов нижней части печи, то станет возможным определить высоту дымовой трубы, необходимую для получения движения газа в желаемом об'еме.

В самом деле, называя давление наружное и вместе с тем и внутреннее на уровне $o—o$ через p_0 и в верхнем сечении дымовой трубы, лежащем на высоте H над уровнем $o—o$, через p_h мы имеем

$$p_h = p_0 - \Delta_i H$$

где Δ_i попрежнему вес единицы об'ема наружного воздуха.

Если скорость движения газов вниз между болванками, являющаяся в то же время начальною скоростью для нижней части печи в сечении $o—o$, обозначить через v_0, а скорость в верхнем сечении дымовой трубы через v_h и, наконец, вес единицы об'ема газов нижней части печи, более холодных, через Δ_a, то, очевидно, возможно на основании уравнения Бернулли написать:

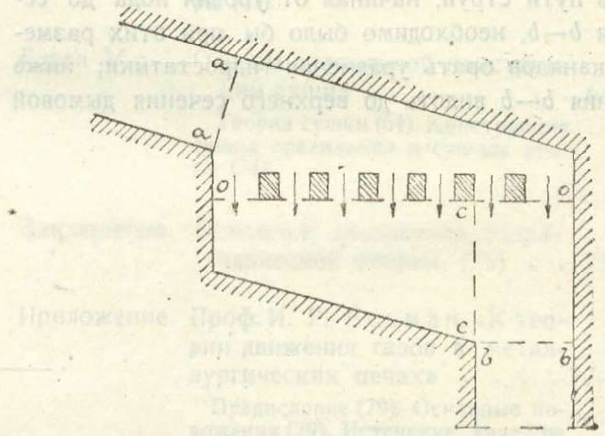
$$\frac{p_0}{\Delta_a} + \frac{v_0^2}{2g} = H + \frac{p_h}{\Delta_a} + \frac{v_h^2}{2g} + \xi$$

или, заменяя p_h через найденное для него значение,

$$\frac{v_0^2}{2g} = H - \frac{\Delta_i}{\Delta_a} \cdot H + \frac{v_h^2}{2g} + \xi$$

$$(\lambda_a - 1) H = \frac{v_h^2}{2g} + \xi - \frac{v_0^2}{2g}.$$

Здесь под ξ понимают все сопротивления, которые необходимо преодолеть газовой струе при движении по каналам; из них сопротивление трения может быть вычислено по выше данным формулам, а сопротивления в коленах и закруглениях по формулам, существующим для воды; некоторого внимания заслуживают сопротивления, могущие появиться непосредственно при вступлении газа в рассматриваемую часть печи ниже уровня $o—o$.



Фиг. 19.

Вертикальная скорость вступления v_0 должна резко изменить свое направление на горизонтальное; затем снова горизонтальное направление изменяется резко на вертикальное. При этих изменениях скорость не имеет надлежащего направления стенками, в виду чего неизбежно образование местных вихревых движений, при чем обе скорости необходимо считать потерянными и включить их в вышеуказанную величину ξ. Для уменьшения этой последней, а вместе с тем также и высоты дымовой трубы и степени разрежения в каналах, нежелательной вследствие возможности засасывания через неплотности стенок наружного воздуха, следует по возможности уменьшить обе указанные скорости; особенно просто это достигается увеличением поперечных размеров горизонтального канала ниже уровня $o—o$. Это уменьшение скорости желательно также из соображений равномерности движения в нем. В самом деле, при заметной горизонтальной скорости очевидно, что

струйкам, движущимся вертикально ближе к правому на чертеже краю печи, не придется совершенно терять своей скорости для того, чтобы войти в отверстие b—b отводящего канала, в то время, как крайним левым струйкам до входа в сечение $b-b$ придется переменить три раза скорость по направлению. В результате движение при этом установится с некоторым нарушением первоначальных предположений и равенство давлений на горизонтальной линии $o-o$ достигнуто не будет. Приняв, что при величине скорости в сечении $b-b$ равной v возможно пренебрегать скоростными напорами, в 10 раз меньшими напора $\frac{v^2}{2g}$, найдем, что для возможности этого необходимо сделать величину горизонтальной скорости движения перед $b-b$ примерно в 3 раза меньше скорости v, при чем площадь сечения $c-c$ должна быть в 3 раза больше площади b—b.

При желании найти распределение давления вдоль пути струи, начиная от уровня пода до сечения b—b, необходимо было бы при этих размерах каналов брать уравнения гидростатики; ниже сечения b—b вплоть до верхнего сечения дымовой трубы необходимо было бы пользоваться уравнениями Бернулли; при этом первая часть уравнения могла бы быть написана для того сечения x—x, в котором желательно определить давление p_x, а другое—для верхнего сечения трубы:

$$\frac{v_x^2}{2g}+\frac{p_x}{\Delta_a}+H_x=\frac{v_h^2}{2g}+\frac{p_h}{\Delta_a}+H+\xi_{x-h}.$$

Здесь H_x—вертикальное расстояние рассматриваемого сечения x—x от уровня $o-o$, положительное или отрицательное, смотря по тому, выше или ниже o—o это сечение расположено; ξ_{x-h}—высота, теряемая на сопротивления на пути от x—x до верха трубы. При заданных размерах каналов и об'еме протекающего газа все величины, входящие в написанное уравнение, являются известными, за исключением искомого давления p_x.

Величина давления p_x, и, в особенности, разность между внутренним давлением p_x и наружным давлением на том же уровне, укажет необходимую степень разрежения в печи и может служить показателем большей или меньшей целесообразности ее конструкции.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Часть II. Гидравлическая теория движения пламени в печах.

Стр.

Глава I. Законы движения печных газов . . . . . 3—28

Демонстрация движения пламени как движения легкой жидкости в тяжелой (4). Пламенный поток есть обращенная река (6). Приложение к пламени законов гидростатики (8). Связь между напором, давлением и скоростью в потоках капельных жидкостей и газов (13). Приложение к пламени законов истечения жидкости через отверстие в дне сосуда (16). Приложение теории водосливов к расчету отражательных печей (18). Нормальная скорость водосливов (22). Пламенные печи, основанные на идее газосливов с подпрудой (22). Приложение к пламени теории гидравлических фонтанов (25).

Глава II. Основы правильной конструкции печей . . . . . 29—53

О делении потоков горячих газов (29). Вертикальные регенераторы (31). Лежачие регенераторы (32). Регенеративные воздухонагреватели (33). Уравнители температуры дутья (35). Вознухонагреватели с чугунными трубами (36). Камерные печи кирпичного и керамиковых производств (36). Цементационные печи (37). Печи для приготовления ковкого чугуна (37). Кольцевые печи (37). Муфельные печи (39). Вертикальные печи для закалки отжига и отпуска (40). Горизонтальные закалочные печи (41). Печи для отжига котельных

Стр

листов (41). Печи для нагрева слитков с обыкновенной колосниковой решеткой (42). Нагревательные печи Сименса (43). Колодцы с отоплением (44). Печи для нагревания слитков (45). Коридорные печи (51).

Глава III. Основной принцип устройства безопасных газопроводов . 53—58

Глава IV. Основной принцип правильного устройства пылеуловителей . . . . . 58—63

Газоочистители (59). Газгольдеры (62).

Глава V. Основы правильной конструкции сушил . . . . . 64—74

Теория сушки (64). Конструкция сушил правильная и сушила уроды (71).

Заключение. Основные положения гидравлической теории (75) . . 75—76

Приложение. Проф. И. Г. Есьман. «К теории движения газов в металлургических печах» . . . . 77—104

Предисловие (79). Основные положения (79). Истечение газа из отверстий (82). Истечение через водослив (85). Равномерное движение газа (89). Неравномерное движение (94). Комбинации простых случаев движения (97).

ЧАСТЬ III.

ПОСТРОЙКА ПЕЧЕЙ.

ГЛАВА I.

Огнеупорные материалы.

Динас и его производство.

В одном из сочинений, посвященных вопросу фабрикации огнеупорного кирпича [1]), рассказывается грустная история одного германского завода динаса, построенного на месторождении весьма чистых песчаников. Завод, несмотря на великолепное качество материала, не смог приготовить ни одного кирпича хорошего динаса и был ликвидирован.

Для уральских заводов это очень старая и давно известная история. Урал так богат кварцем, что для динаса употребляется, часто, исключительно молочно-белый кварц, по составу почти химически чистый кремнезем и, однако, хорошим динасом Уральские заводы не хвастают. Мало того: для получения сносного динаса некоторые Уральские заводы по примеру заводов округа St. Etienne, во Франции, прибавляют в чистый кварц, менее чистый кварцевый песок [2]) или просто готовят динас из железистого кварца [3]). Опыт показывает, что химически менее чистый динас является в печи Мартена более огнестойким, чем динас, приготовленный почти из горного хрусталя.

Отсюда очевидно, что причина малой огнестойкости динаса лежит не в плавкости его составных частей. Этим я не хочу сказать, что динас в мартеновской печи нельзя расплавить. Напротив того, при некоторой неосторожности в обращении с воздухом, температура плавления кремневой кислоты достигается в печи легче [4]), чем это было бы желательно, и получить потоки расплавленного динаса, со свода, очень нетрудно. Труднее, конечно, расплавить чистый кварцевый песок при наварке пода мартеновской печи; у меня имелись куски наварки пода кислой печи Обуховского завода; в данном случае под, очевидно, подвергался поверхностному плавлению, а между тем в нем по анализу оказалось 97,4 SiO_2!

Отсюда, ясно, что чистоту динаса должно считать его необходимым качеством; и, однако, заводчики сознательно вводят в шихту динаса менее чистые примеси, и достигают огнестойкости динаса путем порчи его химического состава.

Непосредственный опыт указывает, что динас в мартеновской печи разрушается не только путем плавления, но еще и другим каким-то способом.

Действительно, если мы посмотрим на выломки свода, то увидим, что разрушение динаса двояко: 1) поверхность динаса оплавлена, но 2) кроме того, кирпичи динаса на некотором расстоянии от оплавленной поверхности разбиты трещинами.

Трещины эти не случайны, так как наблюдаются почти на каждом кирпиче, им же следует приписать и внезапный обрыв целого участка свода в $^1/_4$ и $^1/_2$ кирпича, что нередко бывает при быстром повышении температуры печи. Если мы будем внимательно наблюдать разрушение простенков и пролетов головок мартеновской печи, то увидим, что собственно плавление головок наблюдается редко. Износ их идет каким-то особенным путем; плавлению предшествует механическое разрушение; головки сперва осыпаются и потом плавятся. Если следить за разрушением новой печи, то можно подметить в высшей степени странное явление: арочки, перекрывающие пролеты, во время первых плавок выдвигаются в печь карнизом на $^1/_4$—$^1/_2$ кирпича. Очевидно при разогреве печи появляется какая-то сила, выпирающая арочки вперед из-за простенков. Это, конечно, не сила естественного расширения кирпича, ибо она не могла бы сказаться так резко, как уступ 7—12 см ширины.

Такое осыпание кладки головок мартеновской печи продолжается только первые десять плавок. Когда печь, по выражению плавильщиков, «ошла-

---

[1]) Friedich Wernike. Die Fabrication der feuerfesten Steine 1905, стр. 4.

[2]) Нижне-Салдинский зав. б. Демидова.

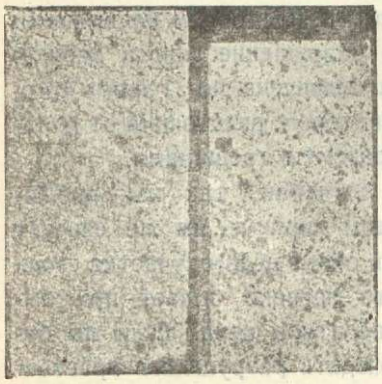
[3]) Алапаевский зав. б. насл. Яковлевых.

[4]) Предположение Ле-Шателье (Introduction de la Metallurgie 393), что кремневая кислота имеет две точки плавления 1600° (A. Day & Stepherd), когда находится в состоянии кварца и около 1800°, когда находится в состоянии тридимита или христобалита, прекрасно об'ясняет оплавления динаса при обжиге, при пуске печи и наварке пода мартеновских печей (см. ниже).

куется», разрушение головок останавливается или идет значительно более медленным темпом. Разрушение кладки простенков на первых плавках, до «ошлакования» печи, так серьезно, что длина компании печи всецело зависит от удачи первых плавок.

О явлениях, происходящих в динасе при неосторожном нагреве во время первых плавок, не трудно составить понятие, если ввести в рабочее пространство мартеновской печи динасовый кирпич; этим путем нередко делают пробы динаса, но обыкновенно, как бы старательно мы не подогревали динас пред посадкой, как бы медленно не подвигали его от окна печи к пролетам, динас не выдерживает быстрого нагрева и растрескивается в какую-то рыхлую массу, значительно увеличиваясь в об'еме.

Для всех фабрикантов динаса это явление хорошо известно. Если во время обжига динаса пустить в печь избыток воздуха, то получается пламя, отдельные языки которого имеют температуру, близкую к теоретической температуре горения. Если такое пламя охватит обжигаемый динас, то он весь растрескается и увеличится в об'еме на 30%. На фиг. 1, изображены два кирпича динаса Днепровского заводе, один из них нормальных размеров, другой же кирпич раздутый во время обжига. Как видно из фотографии, весь кирпич разбит трещинами [1]).



Фиг. 1.

Итак динас может быть разрушен в мартеновской печи резким повышением температуры, при чем материал его разбивается массой мелких трещин и обращается в рыхлую массу. Эта рыхлая масса не имеет никакой прочности, как строительный материал, и легко осыпается, а затем плавится. Отсюда следует, что динас, обращающийся в свою рыхлую разновидность под влиянием резкого под'ема температуры, является материалом непригодным для кладки мартеновских печей и задача фабриканта динаса заключается в том, чтобы дать мартеновским мастерам динас, спокойно переносящий неизбежные в печи резкие перемены температур.

Итак, динас должен удовлетворять двумя условиям: не должен плавиться, и не должен переходить в свою рыхлую разновидность.

В чем-же заключается этот процесс обращения динаса в рыхлую разновидность и как предупредить динас от этой метаморфизации?

Как известно кремнезем встречается в природе в трех кристаллических формах: 1) кварц, уд. веса 2,65; 2) тридимит (асманит), уд. веса 2,33; 3) христобалит, уд. веса 2,32.

Исследуя под микроскопом динас Алапаевского завода из регенераторов, в 1904 году, я заметил, что в некоторых образцах такого кирпича зерна кварца исчезли и заменились двойниками какого-то минерала, который по догадке должен быть тридимитом или асманитом (фиг. 2).

Посланные мною образцы этого кирпича были исследованы в Горном Институте В. И. Соколовым и описаны в записках Минералог. Об-ва, при чем кристаллы эти были определены, как двойники асманита (тридимита).

После этого мною были исследованы имеющиеся в продаже сорта динаса, при чем оказалось, что динас может быть: 1) чисто кварцевый, 2) отчасти метаморфизованный или 3) вполне метаморфизованный в тридимит.

Фиг. 2

Условия выделки динаса у нас и на Юге Франции таковы.

Материалом для выделки динаса на Урале является обыкновенно жильный кварц, в остальных районах очень чистые кварциты. Кварц или кварцит обыкновенно обжигается для удобства размола. Температура обжига, в среднем 1000°—1200°С, на структуру кварца или кварцита влияния не имеет.

Мною исследовались кварциты Днепровского завода. Взятые в 1908 г. два образца сырого кварцита (темносерый и светлосерый) имели удельный вес 2,66 и 2,67.

Одновременно взятый образец обожженного при 1000°—1200° кварцита был исследован под микроскопом. На шлифе в обыкновенном свете видны зерна кварца, разбитые трещинами. Тот же шлиф в поляризованном свете показывает, что кварцит своей структуры не переменил; разбитые трещи-

[1]) В Пермском Пуш. заводе мне показали удивительную сосульку, получившуюся при обжиге динаса. Со свода печи, сложенного из динаса, опустился конус около 18 см длины молочно белого цвета, состоявший почти из чистого кремнезема. Печь шла на сухих дровах и холодном воздухе.

нами зерна кварца прекрасно вращают плоскость поляризации и окрашиваются всеми цветами радуги. Удельный вес кварцита уменьшился с 2,66 и 2,67, до 2,59, что надо об'яснить увеличением об'ема растрескавшихся зерен кварца.

Благодаря обжигу кварц и кварцит делается очень хрупким и размол его идет гораздо легче, чем сырого кварца, а особенно кварцита; на этом роль обжига и кончается, откуда следует, что для выделки динаса совершенно безразлично, обжигается ли кварцит перед размолом или нет.

Крупность размола различна. Заграничный динас прессуется из материала крупностью до 5 мм. русский динас гораздо чаще делается из мелкого зерна (до $1^1/_2$ мм — 2 мм). Ниже мы увидим, чего следует держаться. Размолотый материал смачивается известковым молоком, при чем количество извести бывает обыкновенно $1^1/_2$—2%. Кроме извести нередко прибавляется разболтанная в воде огнеупорная [1]) глина до 2—$2^1/_2$%.

Очень редко, и совершенно напрасно, в шихту прибавляется портландский цемент. Количество примесей различно в зависимости от степени чистоты шихты; при очень чистой шихте примесей больше, при менее чистой—меньше. В конце-концов, в динасе принято иметь около 94 — 96% SiO_2, откуда следует, что сумма весов примесей равна 4—6%.

Шихте очень полезно дать вылежаться сутки—двое перед прессовкой; кроме того полезно формовать шихту с таким количеством воды, чтобы при прессовке она выдавливалась бы из кирпича; только при такой степени влажности шихты есть уверенность, что все зернышки кварца смочены известковым молоком.

Прессовка динаса бывает или очень сильная, или слабая. Сильно прессовать динас не следует.

Чем слабее прессование и сочнее шихта, тем больше пористость динаса, что увеличивает его огнестойкость (см. ниже). Сушка динаса может вестись чрезвычайно быстро, без всякого вреда для дела.

Процесс обжига, напротив того, является операцией крайне деликатной. Находившиеся в материале примеси и введенные известь и глина в сумме дают около 4 — 5%; присоединив к себе столько же кремнезема, они образуют около 8 — 12%, по весу, стекла или шлака, который смачивает зерна кварца и перекристаллизовывает их в тридимит.

Процесс образования этого шлака требует значительного времени и высокой температуры. Начинается он с образования легкоплавкого силиката железа в тех местах, где есть крупинки железа (от дробильных приборов) или его окиси; с повышением температуры к этому шлаку присоединяется CaO и SiO_2, засим кремнекислый глинозем и другие примеси.

О температуре образования этого силиката можно получить совершенно ясное представление из нижеследующих температур плавления некоторых силикатов:

$FeO\ SiO_2$	1150°C
$3\ FeO\ SiO_2 + CaO\ SiO_2$.	1030°C
$CaO\ SiO_2$	1512°C
$2\ CaO\ SiO_2 + MgO\ SiO_2$.	1270°C
$MnO\ SiO_2$	1218°C
$7\ MnO\ SiO_2 + CaO\ SiO_2$.	1184°C

Образовавшиеся пятна темного железистого силиката, вначале очерченные весьма резко, начинают расползаться по кирпичу; делаются все крупнее и крупнее, светлее и светлее, и, в конце концов переходят в мраморовидную окраску динаса. Очень часто, у нас почти всегда, на этом процесс обжига кончается.

В результате мы получаем кварцевый динас; таков динас Днепровского завода уд. в. 2,50; Лысьвенского завода уд. в. 2,50; Симского завода, Нижне-Салдинского, Алапаевского, Богословского, Мотовилихинского и вероятно всех других Уральских заводов.

Под микроскопом мы видим растрескивающиеся зерна кварца сцементованные стеклом (фиг. 3 динас Лысьвенский, в поляризованном свете). Очевидно, процесс переработки зерен кварца идет очень энергично; зерна кварца растрескиваются и растворяются в стекле; но, как показывает поляризованный свет, пока кварц остается кварцем.

Фиг. 3.

Удельный вес динаса в этой стадии 2,50. Если сопоставить удельные веса:

Сырой кварцит . . .	2,66	2,67
Обожж. кварцит	2,59	
Кварцевый динас	2,50	Днепр. завода,
Тридимит	2,33	

то мы увидим, что каждое зерно увеличилось в об'еме при получении кварцевого динаса на:

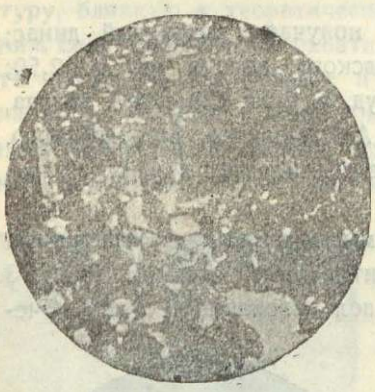
$$\frac{100\left(\frac{1}{2{,}50}-\frac{1}{2{,}66}\right)}{\frac{1}{2{,}66}} = \frac{(0{,}4-0{,}376)100}{0{,}376} = 6{,}4\%.$$

[1]) Прибавлять надо пластичную, жирную глину и если эта глина железистая, красная, то для выделки динаса она лучше огнеупорной (см. ниже).

Это увеличение должно быть приписано двум обстоятельствам: 1) увеличению об'ема кварца, вследствие появления микроскопических трещин и 2) частичному, начинающемуся переходу кварца в тридимит уд. веса 2,33. Мы не обладаем никакими средствами выделить влияние каждой причины, а потому приходится придти к выводу, что одно определение удельного веса не может служить верным методом для определения степени перехода кварца в тридимит.

При правильном обжиге растрескивание зерен кварца идет в жидкой среде расплавленного стекла, которым они смочены.

Благодаря подвижности плавающих в стекле зерен кварца, процесс растрескивания зерен кварца не выходит из пределов микроскопических перемещений. Треснувшее зернышко раздвигается, вытесняя окружающее зерно стекло; стекло заполняет трещину, занимает место пор в кирпиче и весь процесс увеличения об'ема зерен идет, не влияя на внешние очертания кирпича.



Фиг. 4.

Роль стекла в этом случае, с одной стороны, есть роль пружины, мягко отвечающей на проявление частичных сил метаморфизации кварца; с другой стороны, это роль цемента, заполняющего трещины и поддерживающего единство кирпича, как целого; и, наконец, роль растворителя, как мы увидим ниже.

Представим себе, однако, что этого стекла нет. Для этого подвергнем кирпич высокой температуре, не дав времени стеклу образоваться. В этом случае увеличивающиеся в об'еме зернышки кварца, лишенные подвижности, не в состоянии будут разместиться в об'еме кирпича за счет его пор. Трещины не заполнятся жидким стеклом, а останутся незаполненными материалами кирпича и потому кирпич не в состоянии будет удержать своих внешних размеров.

Кирпич растрескается и увеличится в об'еме. Действительность подтверждает вполне это явление. Всякий фабрикант знает, что если во время обжига динаса не дать времени образоваться стеклу и быстро поднять температуру, то динас будет испорчен: он весь окажется разбитым трещинами и кирпичи увеличатся в об'еме на 30%. Кварцевая масса разбухнет, сделается рыхлой и трещиноватой. На фотографии фиг. 1 (стр. 4), как уже упоминалось, представлено два кирпича Днепровского завода рядом: нормальный и разбухший. На фиг. 4, показана микроструктура разбухшего динаса того же завода. Масса эта некристаллична, на поляризованный свет не действует. Удельный вес ее 2,33, что указывает на то, что в разбухшем динасе Днепровского завода совершился полный переход кварца в тридимит. Кирпич этот совершенно испорчен; ниже мы увидим, что он испорчен даже как материал для выделки динаса. Случаи разбухания динаса у неопытных мастеров очень часты. Достаточно провести обжиг динаса на пламени с избытком кислорода воздуха, чтобы весь динас был-бы испорчен. Помогая таким образом, с одной стороны, метаморфизации кварца, с другой стороны стекло уменьшает резкость этого перехода, отчего окруженный стеклом кварц делается повидимому способным переносить безнаказанно весьма значительное «перегревание» без резкого перехода в рыхлый тридимит.

Об'яснить это не трудно: в пламени, с избытком кислорода, развиваются языки пламени высокой температуры. Если таким языком пламени охватит обжигаемый динас, его несомненно раздует.

Уберечь динас от разбухания можно, только ведя обжиг при недостатке воздуха на коптящем пламени. Поднимая медленно его температуру, при горении во всей печи, можно достигнуть заблаговременного образования стекла и медленного перехода кварца в тридимит в полужидкой среде динаса, пропитанного стеклом.

Частичная порча динаса заключается в поверхностном оплавлении или глазировке его языками пламени. Под такой сплавленной корочкой находится разбитый трещинами кварц, перешедший отчасти в рыхлое состояние. Этот динас «в рубашке» считается фабрикантами безусловным браком, ибо под рубашкой всегда есть трещины. Таким образом картина обжига рисуется так: если обжиг ведется пламенем, языки которого имеют высокую температуру, то кварц очень быстро переходит в тридимит удельного веса 2,33. Если же температура пламени совершенно ровная, горение идет без избытка воздуха (томильный, мягкий жар) и поднимается медленно, в соответствии с малой теплопроводностью кирпича, то среди зерен кварца получается стекло. Это стекло, облекая зерна кварца, смягчает процесс их растрескивания; но кроме того видоизменяет и самый процесс перехода кварца в тридимит, введя в этот процесс элемент растворения кварца в силикате и выделения из него менее растворимого тридимита.

При какой температуре происхоят описанные явления? Ответом на это могут служить конуса

Зегера, которые показывают температуру обыкновенного обжига динаса около 1420° С (Днепровский завод).

В Саткинском заводе «Магнезит» динас обжигается в камерной печи Мендгейма, при температуре выше 1530° С. Динас переносит эту температуру вполне благополучно; но в результате постепенно поднимающегося жара на шлифе динаса зав. «Магнезит» видна переработка зерен кварца в кристаллический тридимит. Процесс этот заключается в следующем: зерно кварца растрескивается, по трещине проникает в его толщу стекло, растворяющее кварц и выделяющее менее растворимый в нем тридимит, т.-е. происходит тот же процесс перекристаллизации при посредстве небольшого об'ема раствора, как при отвердевании цементов.

Непременным условием этого процесса является температура, достаточная для расплавления стекла. Раз произошло такое частичное растворение динаса, то процесс перекристаллизации идет непрерывно: при невысокой температуре медленно—месяцами, при повышенной температуре быстрее.

Я упоминал уже выше, что впервые тридимит был найден мною в динасе, пролежавшем месяцы в регенераторах мартеновской печи, при температуре около 1200° и я был склонен думать, что процессу этому свойственна эта медленность.

Однако шлиф динаса завода «Магнезит» указывает на несправедливость такого мнения. При температуре 1530° достаточно *было обжига* в 24 часа для того, чтобы весьма значительная часть кварца уже перешла в тридимит. Кроме динаса, приготовленного из жильного кварца, завод «Магнезит» готовит также динас из местного кварцита, для которого температура 1530° С оказывается достаточной для полного перерождения в тридимит. Отсюда я заключил, что если поднять еще выше температуру обжига, то динас, сделанный из жильного кварца, тоже переродится в тридимит.

Я просил В.Г. Рогожникова, б.управляющего заводом «Магнезит», посадить в печь Мендгейма динас Лысьвенского завода и обжечь его с магнезитовым кирпичом при 1650° — 1670° С. Процесс обжига в печи Мендгейма идет так, что кирпич подогревается от 4 до 5 дней, и сутки стоит на газу, а затем стынет 4—5 дней. Печь страдает избытком воздуха и пламя факельное.

Посаженный с магнезитовым кирпичом, обожженный динас Лысьвенского завода не выдержал такого быстрого и высокого вторичного обжига. Кварц перешел в аморфный тридимит, кирпич разбух и растрескался.

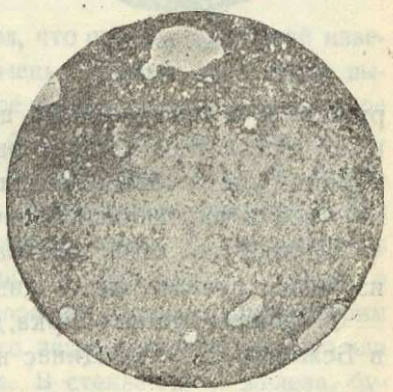
Посаженный вместе с ним тридимитовый динас завода «Магнезит», сделанный из жильного кварца, вышел из этого испытания с честью. Края его оплавились, но динас остался крепким и звонким.

Очевидно процесс растворения кварца и выделение кристаллического тридимита в динасе Лысьвенского завода не успевал следовать за быстрым под'емом температуры печи Мендгейма и в результате часть кварца выделилась в виде рыхлого тридимита. Кварца было слишком много.

В динасе завода «Магнезит» кварца было несравненно меньше, работа растворения кварца и выделения тридимита была легче, и весь кварц перешел в кристаллический тридимит.

Этот пример в точности воспроизводит картину разрушения простенков мартеновской печи. Промежуток подогрева динаса 4—5 дней совпадает с периодом подогрева мартеновской печи.

Пуск камеры Мендгейма на газ совпадает с первыми плавками на новой печи и вот результаты: если простенки сложены из кирпича, подобного Лысьвенскому, они будут разрушены; если они сложены из кирпича завода «Магнезит», они останутся целы.



Фиг. 5.

Итак, прочность динаса, его огнестойкость, зависит от обжига динаса. Если обжиг был настолько продолжителен и силен, что весь кварц перешел в кристаллический тридимит, то печь застрахована от быстрого разрушения во время первых же плавок.

Если результатом обжига был динас только с частичным переходом в тридимит, то мы всегда рискуем испортить печь на первых же плавках.

Если это так, то, очевидно, конечною стадией кислых материалов, из которых состоит печь, должен быть всегда кристаллический тридимит.

Мною проведены следующие исследования:

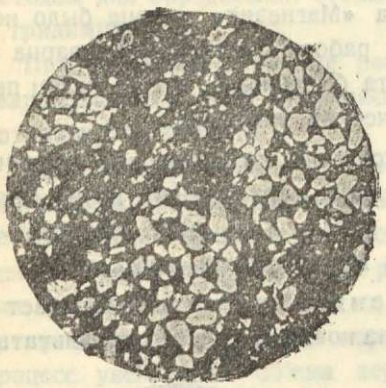
1) Сталактиты сплавленного динаса Обуховского завода: под микроскопом видно, что кварца в нем не осталось, уд. вес 2,36; FeO—1,50%, т.-е. очевидно масса сплавленного сталактита состоит из тридимита.

2) Наварка кислого пода Обуховского завода: микроскопический шлиф не показывает признаков кварца. Уд. вес 2,34; FeO—0,72%. Наварка состоит из тридимита (фиг. 5).

3) Алапаевский динас, вполне перерожденный в продолжение месяца в стенках головок печи

(фиг. 2). Микроскопический шлиф показывает мелкие кристаллы тридимита.

4) Заграничный динас из воздушных регенераторов мартеновской печи Обуховского завода. Шлиф показывает крупные кристаллы тридимита уд. вес 2,33; FeO—1,21%. На шлифе можно видеть переработку бывшего крупного кристалла кварца. Он уже не кварц, а тридимит; но не крупно, а мелко-кристаллический. Раствор кремнекислого стекла не успел еще переработать его в крупные кристаллы тридимита.

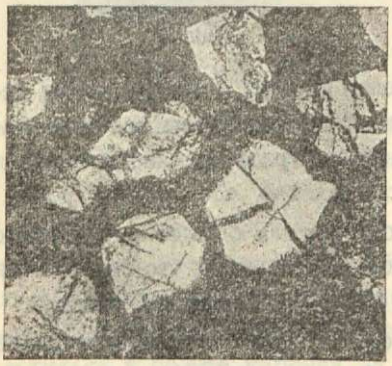


Фиг. 6.

Итак, тридимит есть конечная стадия метаморфизации динаса, а потому тридимитовый или асманитовый кирпич может разрушаться в мартеновской печи только плавлением; трескаться в жару он не должен. Такой курпич будет очень выносliв и должен хорошо служить в мартеновской печи.

Исходя из этих соображений, я подверг изучению лучшие марки динасов:

1) Лучшая русская марка, динас Брянского зав. в Бежицах (фиг. 6). Динас на половину переро-жденный.



Фиг. 7.

2) Марка Stella (фиг. 7) — кварцу еще много.

3) Zurbrick — то же.

4) Luetgen — признаки кварца.

5) Марка „I. S." получена с Путиловского завода— кварца следы.

6) Марка Dolendorf,—признаки кварца. Динас почти тридимитовый. Состав его SiO_2—96,65; FeO—0,75; уд. вес 2,375.

Засим я подверг изучению динас из регенераторов. Этот динас был окрашен более или менее интенсивно в черный цвет. При изучении под микроскопом он дает прекрасные образцы кристаллов тридимита, окруженных черным железистым стеклом. Вместе с тем я знал из практики заводов, что он отличается столь большой огнеупорностью, что одно время его клали в головки мартеновских печей. Огнеупорность этого динаса представляла для меня загадку, ибо я знал, что содержание в нем железа весьма значительно. Железо, конечно, заносится в регенератор пламенем в виде Fe_2O_3. Пыль эта садится на динас решеток и окислы железа пропитывают динас до самой средины, способствуя полному перерождению кварца в прекрасные кристаллы тридимита. Для исследования я взял в Обуховском заводе кирпич совершенно черного цвета. Анализ его, сделанный в Государственном Фарфоровом заводе, показал:

SiO_2	80,81%
Fe (мет.)	11,54
Mn (мет.)	0,14
CaO	0,08
K_2O	0,90
Na_2O	0,10
$\Sigma(Fe_2O_3\ Al_3O$ и $Mn_2O_4)$	17,66

Из него был выпилен конус Зегера и испытан на огнеупорность. Достигнута температура 1700°C и конус остался цел. Впрочем один образец, не оплавленный, упал, т. к. вытопившееся из конуса железистое стекло впиталось в глиняную подставку и проело основание, на котором стоял конус.

Объясняется эта поразительная огнеупорность черного динаса просто.

Черный динас представляет кристаллический сросток тридимита. Промежутки между кристаллами выполнены железистым стеклом. Тридимит не растворим или очень мало растворим при температуре 1710°C в железистом стекле и потому кристаллический сросток остается в целости, а стекло вытекает в глину, на которой укреплен конус. Этот опыт дает нам ответ на вопрос, почему химического анализа недостаточно для суждения об огнеупорности материала. Огнеупорность материала есть способность его давать при обжиге кристаллический сросток, не растворимый в примесях. Этим свойством отличается кремнезем в состоянии тридимита.

Теперь для нас совершенно ясна независимость качеств динаса, от чистоты его химического состава. Лучший динас получается не из молочно-белого кварца, а из железисто-глинистых примесей и содержание в нем SiO_2 понижается до 93 и даже 92%. Важно одно, чтобы кремнезем в динасе во время обжига был перерожден в кристаллический сросток тридимита. Такой динас не теряет строительной прочности до момента плавления тридимита.

Степень перерожденности динаса в тридимит можно определить:

а) по удельному весу;

б) исследованием под микроскопом.

Результаты определения удельного веса маскируются двумя обстоятельствами: примесь закиси железа делает динас тяжелее; наличность трещиноватого кварца ложно уменьшает удельный вес, а т. к., вообще, определение удельного веса—операция очень деликатная, то пользоваться ею для приемки динаса неудобно; ибо уверенности в том, что удельный вес вполне характеризует состояние кремневой кислоты нет.

Лучший метод для приемки—это микроскопический шлиф, исследуемый в поляризованном свете, при чем нет никакой надобности исследовать шлифы при большом увеличении. Увеличение в 25 раз слишком велико и требует тонкого шлифа. Увеличение в 10—15 раз вполне достаточно.

Однако, если бы пришлось руководствоваться приемкой динаса на основании удельного веса, то надо иметь в виду, что удельный вес

кварцитов . . . . . 2,65—2,67
чисто кварцевых динасов 2,50
динаса с признаками кварца . . . 2,37
кристаллического тридимита . . . 2,33.

Следовательно, при приемке динаса придется требовать удельного веса менее 2,37.

К этому надо прибавить, что ошибка в определении уд. веса всегда в сторону у м е н ь ш е н и я удельного веса.

Как готовить хороший динас?

Мы видели, что реактивом, перерабатывающим кварц в тридимит, являются силикаты его «вредных» примесей: извести, закиси железа, глинозема и пр. Силикаты эти растворяют кремнезем и выделяют кристаллический тридимит. Скорость этого процесса зависит, конечно, прежде всего от распределения и физического состояния примесей. Представим себе такой случай: имеем зерна чистого кварца; на поверхности их крупные частицы извести, каолина и окиси железа, разбросанные в разных углах. Или имеем другой случай: зерно кварцита, микроскопические элементы коего сцементованы легкоплавким силикатом; силиката этого может быть весьма мало, однако мелкое вкрапление его в кварцит делает его могущественным реактивом для перерождения кварца в тридимит. Действительно, раз температура обжига достигла температуры плавления этого силиката, то переработка кварца в тридимит начинается одновременно во всей массе кварцита. Кроме того, мелкозернистость строения кварцита будет способствовать быстрой растворимости зерен кварца, ибо по законам физической химии растворимость вещества в мелком раздроблении более растворимости крупных кристаллов.

Другое дело, когда силикат должен образоваться из примесей на поверхности крупных зерен чистого кварца. Конечно, для образования силиката и для растворения в нем крупного зерна нужно более долгое время и более повышенная температура. Однако, чем мельче будет зерно кварца, тем процесс растворения пойдет скорее и кирпич скорее переродится в кристаллический тридимит. Отсюда ясно, что когда динас делается из жильного, весьма чистого кварца, то лучше готовить его из материала, размолотого возможно мельче.

Когда же он готовится из кварцита, способного перерождаться за счет заключающихся в нем самом примесей, то мелкое толчение только удорожает производство. Таковы кварциты, применяемые Брянским—Бежецким заводом.

Я уже упоминал, что на юге Франции, а затем и в Н. Салде к чистому жильному кварцу прибавляется очень мелкий песок, во Франции кровяно-красного цвета. Несомненно, что примесь такого материала способствует более быстрой перекристаллизации кварца.

Затем, я упоминал, что шихте, смоченной известковым молоком, очень полезно дать время вылежаться сутки, двое перед прессованием. Такое вылеживание шихты способствует лучшему смачиванию зерен кварца известковым молоком, благодаря волосности, а следовательно распределению силиката между зернами кварца. То же значение имеет и сочность шихты. Железистое стекло, в котором легко растворяется кварц и нерастворим тридимит, есть стекло закиси железа, черного или темно-зеленого цвета. В стекле окиси железа, бурого цвета, кварц не растворим или трудно растворим, в чем не трудно убедиться, рассматривая динас из воздушной регенеративной камеры, которую железистая пыль мартеновской печи проходит в состояние окиси железа. Это стекло окиси железа не проникает в толщу динаса, образуя на нем только слой глазури. Поэтому при обжиге динаса необходимо получить стекло закиси железа. В печах на кам. угле или дровах обжигают динас на коптящем пламени и «выкуривание» сырца, (причем динас покрывается слоем сажи), считается особенно полезным для получения хорошего динаса. При обжиге динаса в методических печах условием получения хорошего динаса должно быть введение в шихту какого-нибудь восстановителя для превращения окиси железа в закись и стекла закиси железа. Такими восстановителями могут быть порошок древесного угля или кокса, опилки, патока и друг. Раз при выделке динаса надо добиваться его перерождения в тридимит, то естественно является вопрос: не следует-ли кварцит сперва прокаливанием превратить в рыхлую разновидность тридимита, а затем уже из этой массы делать динас?

Из моего личного опыта в Н. Салде следует, что из рыхлого тридимита очень трудно сделать прочный динас. То же сообщает и Вернике (Fr. Wernicke стр. 22) и это понятно: тридимит по предыдущему не растворяется в железистом стекле и, конечно, не даст кристаллического сростка, как переродившийся и перекристаллизовавшийся в тридимит, под влиянием стекла, кварц. Вместе с тем рыхлая разновидность тридимита не может служить кристаллизационными центрами для начала кристаллизации кристаллического сростка тридимита и потому останется совершенно посторонним включением в массе динасового кирпича. Напротив того, введение в шихту черного динаса можно только приветствовать: при очень тонком толчении черный динас внесет в шихту зародыши кристаллов тридимита и готовое железистое стекло. Обе примеси весьма полезные и вместе с тем не уменьшающие огнеупорности динаса.

Следует ли прессовать динас? Конечно-нет. Чем больше об'ем промежутков между зернами динаса, тем лучше, ибо об'ем каждого зернышка увеличивается за счет пористости динаса. Для увеличения пористости динаса полезно делать шихту более сочною; с этой целью можно прессовать динас с примесью древесных опилок, выгорание коих делает массу кирпича менее плотной.

Обжиг динаса нужно вести на коптящем пламени без избытка воздуха, поднимая температуру весьма медленно. Время обжига и высота температуры зависит от природы исходного материала. Чем крупнее и чище материал, тем дольше надо вести обжиг и тем выше его температура.

Я думаю, что при изготовлении динаса из жильного кварца придется поднимать температуру обжига до 1600°С; но в печи, в которой будет производиться этот обжиг, нужно иметь возможность хорошо регулировать качество пламени и его температуру. Единственный для сего пригодный тип, это многокамерные газовые печи Сименса, специальной конструкции.

Что такое огнеупорность?

Будучи студентом II курса Горного Института, я попал в медеплавильный завод Питкоранта в Финляндии. Шла печь Сименса для рафинирования меди. При мне медь была разлита в штыки, и плавильщик начал очередной ремонт пода и откосов мелким кварцевым песком, затем был пущен полный газ, и под заваривался с полчаса. Пощупав под крюшкой, плавильщик начал завалку черной меди для следующей плавки.

«Почему песок не всплывает?»—задавал я себе вопрос. Ответа на этот вопрос я не получил ни на лекциях металлургии, ни в многочисленных книжках, мною прочитанных, ни в беседах с тысячами инженеров и техников, мною встреченных за 38 лет моей службы в промышленности.

В самом деле! Мы завариваем под плавильных печей кварцевым песком, доломитом, магнезитом. Чем держится эта заварка? Удельный вес кварца 2,6, магнезита 3,6, доломита несколько меньше 3,5. Удельный вес жидкой стали более семи, меди более десяти. Чем же удерживается от всплывания наварка? Когда наварку пода срывают бурлящие по поду газы, оторванные куски подины подымаются на поверхность ванны и плавают, как пробка в воде. Во время спокойного плавления с поду не отрывается ни одна песчинка.

Мы уже знаем, что огнестойкость динаса об'ясняется способностью кремне-кислоты при высоких температурах переходить в тридимит, который образуется в виде кристаллического сростка двойниковых кристаллов, нерастворимых в железистом стекле.

Этот процесс растворения кварца в железистом стекле и выделения в виде кристаллического сростка тридимита, носит в химии вяжущих веществ название процесса «твердения».

Твердение портландского цемента основывается на хорошей растворимости в воде CaO и плохой растворимости $Ca(OH)_2$. CaO переходит в $Ca(OH)_2$ и образует кристаллический сросток (Le-Chatelier).

Твердение каустического магнезита (ксилолита), как показал проф. А. А. Байков, обусловливается прекрасной растворимостью безводной магнезии в воде и трудной растворимостью, в ней же, водной магнезии $Mg(OH)_2$ [1]), и образованием кристаллического сростка водной магнезии. Прибавка хлористого магния нужна только для замедления реакции и предупреждения кипения воды, что сделало бы образование сростка невозможным.

Твердение гипса об'ясняется получением кристаллического сростка кристаллов водного гипса. Последнюю реакцию можно хорошо наблюдать под микроскопом.

К этим трем случаям твердения в воде я присоединяю случай подобного же твердения при повышенной температуре кремневой кислоты, обусловливающей огнестойкость динаса и процесс заварки кислого пода.

Совершенно очевидно, что когда мы навариваем под мартеновской или другой плавильной печи мы накидываем на поверхность омытую железистым шлаком зерна кремнезема. Эти зерна кремне-

[1]) Доказать это очень просто. Взболтать хорошенько в воде порошок жженой магнезии и процедить чрез фильтр. На утро на дне колбы сядет порошок $Mg(OH)_2$.

зема смачиваются шлаком, частично растворяются в стекле шлака и сейчас же выделяются из него в виде кристаллов тридимита. Процесс идет настолько быстро, что времени от починки пода до расплавления завалки оказывается достаточно для этого превращения.

Таким образом совершенно ясно, что кислый под мартеновской печи является монолитной чашкой, в которой плавится сталь. Температура плавления связывающего ее скелета выше температуры плавления стали и потому наварка пода не может всплыть во время кипения ванны.

Итак, вопрос о кислых кремнеземистых материалах ясен. Перейдем к другим огнеупорным материалам.

Шамотные материалы получаются при обжиге глины или каолина. Молекула каолина ($Al_2O_3 2\,SiO_2\,H_2O$) при 800° выделяет воду (А. М. Соколов) и распадается на активный кремнезем и глинозем, которые при дальнейшем обжиге дают кристаллический сросток кремнекислого глинозема минерала силиманита. Кристаллы его связываются с кристаллами кускового шамота в общий монолитный сросток.

При повышении температуры кирпича примеси, оставшиеся в межкристаллических пустотах, реагируют на этот кристаллический сросток, растворяют его в себе и кирпич размягчается и теряет свою строительную прочность.

Этим шамотный кирпич отличается от динаса, не теряющего свою огнеупорность даже при чудовищной примеси закиси железа.

Магнезитовый кирпич в поду мартеновской печи, сложенной на смоле, обращается в бесцветный минерал периклаз, представляющий кристаллизирующуюся в правильной системе безводную магнезию (уд. в. 3,65). Примесь железа переходит в этом случае в форму закиси железа, изоморфную магнезию, и не мешает получению весьма прочного, напоминающего яшму, кристаллического сростка крупных кристаллических зерен периклаза с ясною кубическою спайностью. Здесь мы, повидимому, имеем случай твердения, как следствие перекристаллизации [1]).

Прочность обращенного в периклаз магнезитового кирпича нарушается весьма легко, ибо закись железа переходит в окислительной атмосфере в окись железа и периклаз переходит в магноферрит ($MgO\,Fe_2O_3$) и белый кирпич делается бурым. Магноферрит при высоких температурах растворяется повидимому в магнезии и вызывает размягчение магнезитового кирпича при температурах гораздо ниже температуры плавления магнезии. Это явление нетрудно наблюдать в печи Мендгейма при обжиге магнезитового кирпича при 1600°C: при высоте кладей выше $1^1/_2$ м нижний ряд кирпича раздавливается во время обжига.

Колебания от периклаза к магнофферриту нарушают прочность кристаллического сростка и портят магнезит, как огнеупорный материал, что делает работу на нем затруднительной.

Хромистый кирпич. По виду кусков хромистого железняка, вынутых из стен мартеновской печи, очевидно, что процессы перекристаллизации хромистого железняка имеют место в мартеновской печи. Но повидимому они протекают так медленно, что хромистый кирпич сделать не удается. Обыкновенно этот кирпич при температуре плавления цементирующего вещества обращается в кашу, теряет всякую строительную прочность и для печей совершенно не пригоден. Кажется, гораздо лучше ведет себя хромисто-магнезитовый кирпич. Тут может получиться хромисто-магнезиальная шпинель

$$(Fe_2O_3,\ Cr_2O_3)\ MgO,$$

могущая дать кристаллический сросток, что касается обожженного доломита, то он дает сросток минерала $CaO\,MgO$. Под микроскопом, в обожженом доломите, прекрасно видны кристаллические зерна, выкристаллизовавшиеся повидимому из кремнекислого стекла.

Однако, этот вопрос совершенно не выяснен и было бы очень желательно, чтобы вопросы о твердении и о кристаллических сростках в огнеупорных материалах попали бы в руки минералогов, которые могли бы тут сказать свое веское слово.

Из рассмотрения всей серии огнеупорных материалов мы приходим к выводу, что огнеупорность обусловливается твердением при высоких температурах. Мы можем наблюдать четыре типа твердения:

1. Наиболее совершенный тип—твердение через растворение (типа твердения портландского цемента, ксилолита и гипса, т.-е. образование не растворимого кристаллического сростка)—для динаса.

2. Получение кристаллического сростка в момент рождения—для шамота.

3. Твердение вследствие разной крупности зерен, в присутствии растворителя—для магнезита в форме периклаза и для доломита.

4. Для хромистого железняка мы имеем случай тугоплавкого вещества, для которого мы, повидимому, не находим растворителя, если таковым не окажется магнезит. Такой неплавкий материал не может служить материалом для огнеупорных изде-

[1]) Такое твердение мы замечаем во влажной поваренной соли. Мелкие обломки кристаллов растворяются в воде более крупных, и вода, растворяя соляную пыль, цементирует крупные обломки в монолит.

лий, ибо из него мы не имеем средств приготовить кристаллический сросток.

Строительная прочность при высоких температурах всех этих огнеупорных материалов есть функция прочности получившегося кристаллического сростка.

Новейшие достижения в области производства динаса.

Вышеприводимая статья (Динас и его производство) о динасе была написана мною в 1910 г. и переведена на иностранные языки, тем не менее только в 1921 г. в The Iron and Coal Trades Review (С II стр. 693 — 694) появилась статья Риса (W. I. Rees), сообщающая о первых достижениях в деле приготовления тридимитового динаса. Оказалось, что особенно большие услуги этот процесс оказал в приготовлении кирпича, для коксовальных печей, при чем служба его здесь оказалась выше всякой похвалы, несмотря на, кажется, ничтожную температуру в них—всего 1100—1200°С.

Противно утверждению немецких авторов, что динас нельзя готовить из кварцитов, американцы приготовляют динас исключительно из кембрийских кварцитов состава:

SiO_2	97,8%
Al_2O_3	0,9
Fe_2O_3	0,85
CaO	0,1
MgO	0,15
$K_2O + Na_2O$	0,4

с прибавкой $CaO2$—3% для коксовых печей. Обжиг производится в круглых печах в 15 м диаметром и 4—5 м высоты, емкостью 90—175 т. шт. Обжиг продолжается 9—12 дней; расход к. у.— тонна на тысячу штук; температура выше 1580°С. Зерно мельче 3 мм и около 50% мельче 0,5 мм. В готовом кирпиче не должно быть кварца более 25—45%, остальное тридимит. Пористость динаса 23—28%. Кирпич для коксовых печей испытывается на удельный вес в порошке—2,35.

Эти данные американской практики, вполне согласные с тем, что я писал одиннадцать лет назад очень хорошо об'ясняются сохранением динасом строительной прочности при высоких температурах. Сделанные в последние годы работы указывают, что многие огнеупорные материалы размягчаются задолго до начала плавления. Некоторые кирпичи из шамота размягчаются уже при 1150°. Такое частичное плавление, вызывающее размягчение, имеет своим последствием весьма странное увеличение прочности огнеупорных материалов с повышением температуры, в том случае, когда проба на раздавливание ведется быстро. При испытании их статической нагрузкой сопротивление раздавливанию медленно падает до момента полного ожижения.

К. Эндл (K. Endell) дает такие цифры:

	Глина.	Магнезит.	Динас.	Угольный.
Температура плавления. . . .	1730	> 2000	1750	> 2000
Температура исследования. . .	1500°	1650	1680	1720
Температура размягчения . . .	1300°	1500	1650	не размягчается.
Сжатие цилиндрика в 150 мм высоты при температуре размягчения и давлении 1 кг/см².	до 30 мм	до 10 мм	раздавился.	

Совершенно очевидно, что практическая годность огнеупорного материала характеризуется не температурой плавления, а температурой размягчения, а потому динас является материалом гораздо более огнеупорным, чем шамот.

Здесь лежит об'яснение необыкновенного успеха приложения тридимитового динаса к производству кокса в Америке. Выталкивание кокса из печи разрушает, механически изнашивает стенки коксовых печей; строительная прочность тридимитового динаса, представляющего сросток кристаллов тридимита, обусловливает его сопротивление истиранию и малый износ стенок, сравнительно с кварцевым динасом и шамотом. В кварцевом динасе кристаллический сросток не успел еще образоваться и зерна, будучи смочены стеклом кварца, имеют подвижность и плохо сопротивляются механическому истиранию. В шамотовом кирпиче задолго до плавления происходит размягчение.

Такое преждевременное размягчение мы наблюдаем в металлах, например в свинце и в железе, которые являются мягкими задолго до плавления.

Характерно размягчение и полная потеря строительной прочности магнезитовым кирпичом уже при t = 1500°, т.-е. ниже температуры мартеновской печи. Прекрасные строительные качества имеют угольный кирпич, но применение его ограничивается только электрическими печами, где рабочее пространство может быть герметически закупорено и уединено от воздуха

---

[1]) St. und Eis. 1921. XLI стр. 6—9 K. Endell.

Из предыдущего ясно, что превращенный в тридимит динас представляет идеальный огнеупорный материал:

1) в нем закончены все связанные с перекристаллизацией изменения об'ема, а потому он застрахован от трещин.

2) Тридимит не растворим в железистом стекле, из которого выкристаллизовался, а потому тридимитовый динас сохраняет свою полную строительную прочность до момента своего полного перехода в христобалит, что наступает повидимому около 1650°С. Христобалит растворим в стекле и потому теряет свою строительную прочность в момент образования.

3) Тридимитовый динас имеет еще одно свойство, на которое до сих пор не обращалось внимания, а именно шлакоупорность, т.-е. нерастворимость в кислых железо-марганцовистых шлаках, особенно ясно выступающую при работе в кислых мартеновских печах скрап-рудным процессом.

На это свойство тридимитового динаса до сих пор не обращалось внимания, а оно особенно ценно во всех плавильных процессах, связанных с получением кислых железистых шлаков, например, медной плавкой в отражательных печах, бессемеровением стали и штейнов. Может быть, шлаки, полученные от других металлов, тоже индеферентны по отношению к тридимиту, но у меня нет фактов для такого утверждения.

Что касается использования свойства нерастворимости динаса в железистых стеклах, то это свойство должно быть использовано при подготовке плавильных печей к работе.

Например, наваривая под кислой мартеновской печи, надо употреблять смесь кварца и кислого мартеновского шлака, не скупясь на этот последний. Наварка пойдет весьма быстро и мы можем получить подину высоких качеств даже, значительной толщины.

Бояться легкоплавкости такой подины не следует. Пример черного динаса указывает, что даже при содержании в $11\frac{1}{2}\%$ металлического железа динас не теряет своей трудноплавкости. Если нет мартеновского кислого шлака, ту же роль может исполнить мелкомолотый сварочный, пудлинговый или шлак медной плавки.

Ту же идею надо применять при приготовлении тридимитового динаса. Рецепт употреблять возможно более чистый кварцит с прибавлением 2-х до 3-х процентов извести, должен быть оставлен. Проще всего к кварцу или кварциту прибавлять очень тонко измолотый какой-либо железистый шлак с известью в расчете, что бы он дал легкоплавкие силикаты:

$3\,FeO\,SiO_2 + CaO\,SiO_2$, плавящ. при 1032°С.
или $FeO\,SiO_2$ „ „ „ 1105°С.

Количество металлического железа в шихте можно совершенно безопасно доводить до 2%, что даст количество стекла в первом примере до 5%, а во втором до 8% всей массы кирпича, которое легко удерживается волосностью кирпича.

Мы видим, что неудачи в приготовлении огнестойкого хромистого кирпича происходит вследствие неумения нашего найти для него перекристаллизатор, т.-е., вещество его растворяющее, которое могло бы образовать из раздробленных зерен хромистого железняка кристаллический сросток хромистого железняка или другого какого-либо материала, в который хромистый железняк вошел бы составной частью. Все попытки сделать такой кирпич остались бесплодными, кроме попытки приготовления хромо-магнезитового кирпича ($50\%\,MgO$) завода «Магнезит»: кирпич которого довольно прочен при высоких температурах. Вот причина, почему в качестве огнеупорного материала применяется хромистый железняк в виде кусков. Куски хромистого железняка обыкновенно имеют прожилки змеевика (кремнекислой магнезии), температура плавления коей не выше 1650°. При кладке задней стенки мартеновской печи из хромистого железняка прожилки змеевика из него выплавляются и стена осыпается; поэтому из хромистого железняка не делают отвесных стенок. Чем богаче хромистый железняк окисью хрома, тем меньше в нем змеевика, тем он огнеупорнее. В чистом хромистом железняке $46{,}4\%\,Cr$.

Весьма интересный огнеупорный материал представляет тальк:

$$6MgO\;5SiO_2\;2H_2O.$$

Это весьма мягкий минерал (твердость единица), из которого кирпичи выпиливаются просто пилой. При температуре красного каления он выделяет воду, при чем легко дает трещины. Когда вода выделена получается материал, плавящийся при температурах свыше 1600°. По исследованиям, произведенным в Государственном Фарфоровом заводе, по моей просьбе, выяснилось, что тальк не дает никаких растворов с окислами железа и окалина с ним не сплавляется. Таким образом, при умелом обращении, это наилучший материал для подов печей для нагрева слитков и для медной рудной плавки.

ГЛАВА II.

Фундаменты пламенных печей.

В старое время под фундаменты печей обыкновенно забивали ряды свай и делали деревянный ростверк, на котором выкладывался фундамент из бутового камня и далее кирпича. Это очень часто практикуется и сейчас даже в таких передовых заводах, каковы заводы Ленинграда, хотя разумных доводов, для чего тратятся крупные деньги на забивку свай, мне слышать не приходилось. Ниже мы увидим, что свай делать под печи не следует, но если их делать, то надо соблюдать некоторые правила.

Во время моей службы в Н.-Салдинском заводе одна печь Сименса вдруг начала давать осадку и должна была быть остановлена, ибо грозила обрушиться.

Когда печь была осмотрена, то оказалось любопытное явление. Печь была основана на свайном ростверке, сделанном на уровне почвенных вод. Проводом дренажной канавы уровень грунтовых вод был опущен. Во время работы нетолстый фундамент печи прогрелся настолько, что огнива и верхние части свай обуглились и печь дала осадку. Пришлось сломать печь, ссечь все сваи ниже нового уровня грунтовых вод и возвести печь, не делая ростверка.

Такие катастрофы случаются на заводах не редко. Редкий русский завод канализирован и уровень почвенных вод строго определен. Большинство заводоуправлений делает большие глаза, когда говорят об уровне почвенных вод и в то же время забивают тысячи свай под свои сооружения, не представляя себе ту катастрофу, накануне которой они могут оказаться. В моей личной практике был такой случай: при сооружении Надеждинского завода на Урале здание прокатной фабрики было основано на сваях и деревянном ростверке. Местность была болотистая и фундаменты заложены на глубине 1,75 м, т.-е. уровне промерзания грунта. Когда фабрика была закончена в соседстве пришлось сделать глубокую выемку для ж. д., чем грунтовые воды были опущены еще на три аршина. Болотистый грунт обсох и дал усадку настолько большую, что под огнивами свай мог проползти подросток, а здание оказалось стоящим на сваях, как на колоннах. Пришлось откопать фундамент и под огнива свай сделать забутку из камня, чтобы здание, когда сгниют огнива и концы свай, не рухнуло, а опустилось бы на эту забутку; эта работа стоила больших денег.

Заводы, в которых инженеры не думают о грунтовых водах и делают свайные основания, находятся накануне той же катастрофы, результатом коей было внезапное обрушение Башни Кампанилы в Венеции. Там тоже произошло обнажение свайного ростверка из-под уровня моря и башня рухнула. Тоже можно предсказать заводам, расположенным очень высоко над уровнем рек, но не канализированным, с весьма высоким уровнем почвенных вод, вследствие прослойки глины в алювиальных отложениях почвы заводов.

Когда-нибудь будет сделан дренаж и начнется осадка всех построек, основанных на сваях, а может-быть и без свай, если грунт состоит из плывунов, дающих при осушке громадную усадку.

Отсюда мы видим, что вопрос о грунтовых водах в заводах и правильной канализации территории завода не есть вопрос академический, как на него принято смотреть.

При обсуждении проектов печей для заводов мне гораздо чаще, чем это было желательно, приходится поднимать вопрос об уровне почвенных вод и необходимости канализировать завод в интересах не только данной минуты, но и всей будущности завода. Обыкновенно при запросе об уровне почвенных вод дают ответ: грунтовые воды на одном-двух метрах, а завод лежит на несколько сажень выше реки, на берегу коей расположен. Приходится терять массу времени на убеждения, что необходимо раз навсегда устроить правильную осушку территории завода, нужно опустить уровень грунтовых вод до их нормального уровня, близ протекающей реки, а тогда уже строить капитальные сооружения, за целость коих уже не будет никаких опасений. Если мы закладываем фундаменты на неосушенном грунте, то всякая последующая осушка может грозить катастрофой. Не могу похвастать, чтобы мои доводы пользовались бы успехом. Канализация вещь не видная, но дорогая, и подвинуть на такую работу очень и очень трудно.

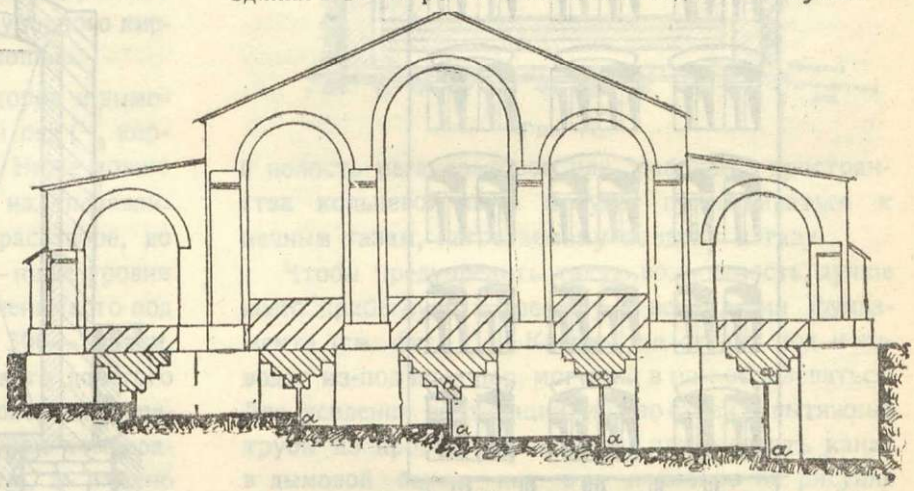
Непосредственной пользой от дренажа территории завода является возможность постройки дешевых и правильно конструированных печей. Это станет для нас ясно, если вспомнить, что устройства для утилизации теряющегося жара в печах, каковы регенераторы и рекуператоры, должны быть расположены ниже уровня пода, ибо могут быть обогреты равномерно только нисходящим потоком печных газов.

Практически регенераторы и рекуператоры хорошо умещаются под печью, если уровень вод допущен до глубины 4—5 метров; при глубине грунтовых вод на 3-х метрах поместить их уже труднее. Меньшая глубина грунтовых вод представляет уже бедствие для завода и расположение его должно считаться неудачно избраным. Качество грунта в заводах бывает чрезвычайно разнообразно; но так как в большинстве случаев заводы расположены в алювиальных долинах рек [1]), то чаще всего нам приходится считаться с речными отложениями, т.-е , с самым капризным и неравномерным грунтом, состоящим из чередующихся линз глины, суглинков, гравия, плывуна, торфа и навала жителями всякого мусора, до навоза включительно.

Такое качество грунта внушает всегда опасение в прочности сооружений и заставляет многих инженеров искать спасения в сваях. Однако, мой личный опыт указал мне на совершенно неосновательный страх за такой грунт и убедил меня в полной возможности построек на нем без свай.

В Нижне-Салдинском заводе мне была поручена постройка новой прокатной фабрики, ниже завода, на т. н. «старице», т.-е., на болоте с озерками от прежнего русла реки Салды, заваленного доменным шлаком, навозом, мусором и т. д. При закладке фундамента для прокатной машины было выяснено, что на глубине $5^1/_2$ метров от уровня головки рельсов или заводского пола, находится скала. Уровень реки был на $2^1/_2$ метрах. Под навалом шлака был типичный грунт для речных отложений с очень широким распространением плывуна, т.-е. мелкого песка, насыщенного водой.

Фундамент для прокатной реверсивной машины в 7000 сил и для стана был основан на скале, что касается зданий, фундаментов роликов, печей, котлов и мелких механизмов, то итти под воду на три метра и делать фундаменты в $5^1/_2$ метров было безумием. Бить сваи было невозможно. Плывуны легко, с рук, прокалывались ломом до скалы; следовательно сваи пошли бы до скалы без всякого сопротивления, а дальше остановились бы на скале. Было прежде всего предложено основание на лежнях, уложенных ниже уровня реки. Но такое предложение было отвергнуто по нижеследующим соображениям: представьте себе, что лежень в 8 метров длиной ляжет на линзу глины в плывуне, или плывуне, пересекающем линзу глины. Что будет с этим лежнем, когда мы нагрузим его весом каменной стены здания? Он, конечно, будет прогибаться до тех пор, пока не лопнет. Следовательно, неизбежная неравномерная осадка устройства только задержится, а не устранится, т.-е., в завершенном здании появятся трещины. Отсюда явился прямой вывод: при сооружении зданий разрезать фундамент на части и предоставить каждой части здания садиться во время постройки до перекрытия окон арками. При кладке фундаментов закладывались деревянные доски *aa* (фиг. 8), разрезавшие фундамент на части. Кладка фундамента началась в первых числах мая. Через два месяца каменщики дошли до пят арок и кончили здание в конце августа. Высота фронтона здания в 16 метров. Наклеенные на доски *aa* бумажки лопались, что указывало на неравномерную осадку различных фундаментов во время постройки; но после сведения арок в продолжение целых пяти лет моих личных наблюдений во всем здании не было обнаружено ни одной трещины. Таким образом, плывун с линзами оказался прекрасным грунтом, благодаря принятым заранее мерам для равномерной осадки.



Фиг. 8.

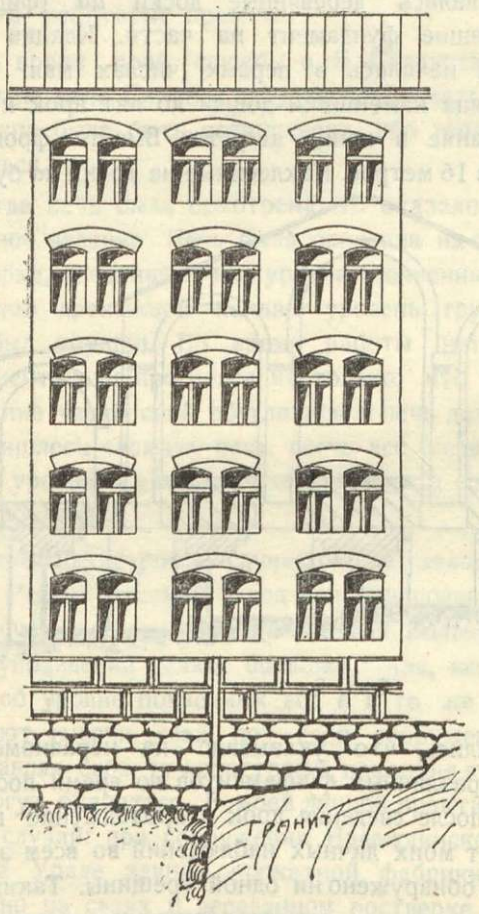
Еще более интересный случай был в г. Гельсингфорсе. Участок для постройки дома состоял из двух половин: а) гранитной скалы и в) прекрасной плотной глины. Архитектор решил, что оба грунта прекрасны, заложил общий фундамент и выстроил пятиэтажный дом. Дом раскололся на две половины. По требованию городских властей он был разобран; после этого на этом месте были выстроены две отдельных половины дома: одна на скале, другая на глине (фиг. 9). Когда они были подведены под крышу, две половины дома соединили

[1]) Такой выбор места для постройки заводов обусловлен двумя соображениям: 1) удобствоми водоснабжения и 2) тем, что для заводов необходимо ровное место для удобства проектирования сети под'ездных путей к фабрикам завода. Ровное место легче всего найти в алювиальной долине реки.

вместе арками и на них простенками. Дом стоит и сейчас.

Печальный случай был в одном из известных мне заводов. Нужно было выстроить рядом печь и дымовую трубу. Молодой строитель не обратил внимания, что на чертеже фундамент печи и трубы разные и придумал для прочности сделать один общий бетонный фундамент.

Результат вышел печальный: тяжелая труба осадила грунт и наклонилась, печь потрескалась. Еще более печальный случай был, когда была возведена кузница, а потом вырыта выемка для фундамента под паровой молот. Стены кузницы частью пришлось перекладывать.

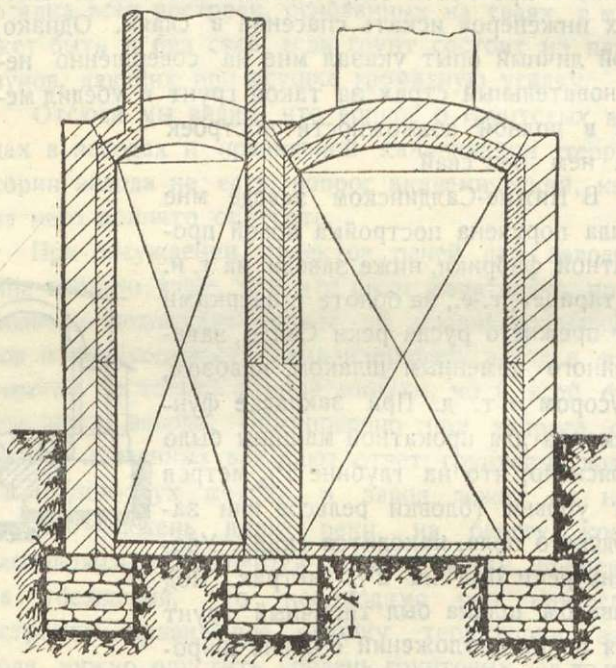


Фиг. 9.

При кладке церкви с высокой колокольней, под этой последней делается отдельный фундамент и стены колокольни и храма соединяются пазом, допускающим отдельно усадку колокольни и храма.

Возвратимся к постройке пламенных печей. Печи относятся к типу очень нетяжелых построек.

Редкая печь представляет сооружение от фундамента до свода более десяти метров. Столб кирпича такой высоты давит на свое основание $\frac{1600 \times 10}{100 \times 100} = 1{,}6$ кг/см², следовательно, при хорошем грунте можно класть печи прямо на грунт без всякого уширения фундамента. При плохом грунте рекомендуется не нагружать его более 1 кг/см², т.-е. надо уширить фундамент в $1^1/_2$—2 раза. При постройке печей это делается само собой, без увеличения внешних размеров фундамента (кроме обреза в 25—30 см), за счет внутренних полостей печей. Например, при расчете давления на грунт стен регенераторов мартеновских печей, опорная площадь расчитывается из угла в 45°. Ее обыкновенно хватит с избытком для удовлетворения нормы 1 кг/см². Глубина фундамента h (фиг. 10) делается больше или меньше, смотря по качеству грунта и желанию использовать, в большей или меньшей степени, уширение фундамента за счет внутренних полостей. Ванна мартеновской печи располагается обыкновенно на сильно нагруженных колоннах, фундамент которых ни в коем



Фиг. 10.

случае не следует связывать с фундаментом остальной печи. Чем на большее число отдельных частей будет рассечен фундамент печи, тем больше уверенности, что печь не даст усадки и не потрескается. Вернее, она даст свободную усадку во время постройки, а не во время работы печи.

Из сказанного очевидно, что пламенные печи представляют такое легкое сооружение, что бить сваи под них нет совершенно никаких оснований, также как прибегать к другим способам укрепления оснований.

При закладке печей надо руководствоваться тремя требованиями:

а) установления уровня почвенных вод на уровне ближайшей реки, т.-е. дренажа территории, чем предупреждается усадка грунта во время работы печи;

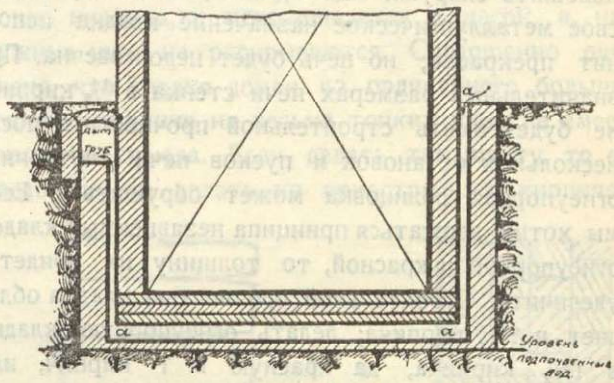
в) закладывать печь надо на выравненном дне котлована, а не в канавах, колодцах и не на разных уровнях. При очень хорошем скалистом грунте или грунте из крепкой глины, можно допустить и такую работу, в обыкновенном же мягком грунте надо возводить всю печь на одном уровне, помня, что всякое углубление в дне котлована нарушает равновесие близлежащих слоев почвы котлована,

с) наконец, части печи, дающие разные давления на 1 см², полезно класть на отдельных частях фундамента, делая последний разрезным.

Из какого материала и на каком растворе надо класть фундамент? Так как горячие печные газы представляют легкую жидкость, остывшие же печные газы тяжелую, то прогрев пода печных полостей гораздо слабее, чем его стены. Напротив того, охлаждение конвекционными потоками направленными кверху сильней. Вот причина, почему под регенераторов, рекуператоров и дымовых боровов можно совершенно безопасно класть из красного кирпича на глине. Употребление огнеупорного кирпича будет дорогой и ненужной роскошью.

Толщина выстилки пода регенераторов и дымовых боровков делается в елку в один ряд ($^1/_2$ кирпича) или лучше в 2 ряда (1 кирпич). Ниже можно делать бутовую кладку на извести и на гидравлической извести или смешанном расстворе, до уровня почвенных вод, или цементе—ниже уровня почвенных вод. В настоящее время очень часто под печами делается бетонная постель в 500—700 мм. Я совершенно не вижу выгоды от такого дорогого сооружения. Бетон портится от высокой температуры, при температуре более низкой, чем температура разложения углекислой извести. А именно составная часть цемента $Ca(HO)_2$ разлагается при 300° С, а $CaCO_3$, известкового раствора, разлагается только при температуре выше 800°. Для чего же тратить лишние деньги?

На работу печи особенно вредное влияние может оказать близость почвенных вод к поду регенераторов или самой печи. Особенно сильно жалуются на это фабриканты красного кирпича, обжигающие его в кольцевых печах. Эти жалобы не безосновательны. На поду кольцевой печи и на поду регенераторов господствует отрицательное давление и в случае, если под регенераторов прогреет кладку фундамента на уровне почвенных вод до 100°С, то пар почвенных вод может проникать



Фиг. 11.

в полость регенераторов или рабочего пространства кольцевой печи и будет примешиваться к печным газам, нагреваемому воздуху и газу.

Чтобы предупредить такую возможность, лучше всего прибегнуть к дренажу и вентиляции фундамента (см. фиг. 11). Каналы *aa* студят под и выводят из-под пода пар, могущий в нем образоваться. Для усиления вентиляции можно ставить вытяжные трубы из кровельного железа, или выводить канал в дымовой боров, как это показано на рисунке (фиг. 11). Толщина пода показана 3 полукирпича, это обеспечивает его герметичность.

ГЛАВА III.

Основные положения архитектуры печей.

Внутри печей царит иногда очень высокая температура, а снаружи печь окружена воздухом, образующим вокруг печи конвекционные потоки, студящие печь. Если стены печи тонки, то потеря теплоты на лучеиспускание значительна; поэтому печи кладут с довольно толстыми стенами в $1^1/_2$—2 до 3, а иногда и более кирпичей толщины. Так как наружная поверхность печи имеет почти температуру окружающего воздуха и редко превышает 100°С, то снаружи печь следует класть из обыкновенного красного кирпича. Внутренняя поверхность кладется из кирпича различной степени огнеупорности, в зависимости от температуры печи. При разогреве и остановках печи кирпич расширяется и садится в разной степени. Наружная кладка садится меньше, внутренняя больше, и первый вопрос, который приходится нам решать, состоит в следующем:

Как класть печь, с перевязкой красной и огнеупорной кладки, или без перевязки? Вопрос этот обыкновенно решается так, что надо класть печь без перевязки; а для того, чтобы и соблазна не было

вязать огнеупорную и красную кладку, кирпич делается разных размеров: белый 225×112×56 мм и красный 270×135× 67 мм.

Такое решение вполне разумно при больших печах. При печах небольших размеров подымается вопрос о толщине стен. Имеем, например, печь для термической обработки стали. Внутренняя температура ниже 1000°С. Так как красный кирпич на глине выдерживает свободно 700—800°, то ясно, что огнеупорная кладка $^1/_2$ кирпича совершенно достаточна, чтобы защитить печь от разгара. Если положить снаружи еще один красный кирпич, то свое металлургическое назначение кладка исполнит прекрасно, но печь будет недолговечна. При значительных размерах печи стенка в $^1/_2$ кирпича не будет иметь строительной прочности и после нескольких остановок и пусков печи внутренняя огнеупорная облицовка может обрушиться. Если мы хотим держаться принципа независимых кладок огнеупорной и красной, то толщину их придется увеличить. Строительной прочностью кладка обладает в $1^1/_2$ кирпича; делать огнеупорную кладку в $1^1/_2$ кирпича, да красную в 1 кирпич, или $1^1/_2$, это очень громоздко и дорого Из этого положения выходят, делая всю стену в $1^1/_2$ кирпича из огнеупорного кирпича без красного. Но тогда при чем тут огнеупорный кирпич в наружном холодном слое?

Вот в какой тупик приводит несовпадение размеров огнеупорного и красного кирпича и невозможность класть их в перевязку. Из сказанного ясно, что принцип независимости огнеупорной и красной кладки, столь прекрасный в теории,—для печей с тонкими стенками непрактичен и на деле обе кладки надо класть в перевязку, для чего иметь кирпич огнеупорный и красный одних размеров.

Исключением из этого правила составляет кладка печей без арматуры, например, кольцевых печей. Но зато там не стесняются толщиной стен в три или более кирпичей.

Простой расчет указывает на полную возможность и рациональность постройки печей в перевязку при условии кладки на толстых швах.

Коэффициент расширения кирпича, вероятно, около 0,00001. При температуре внутри печи 1400°С (сварочный жар) увеличение длины кирпича будет $1^1/_2\%$ или 3 мм на 225 мм. Нормальная толщина швов при правильной кладке на глине равна 1 см. Из сказанного очевидно, что расширение внутренней поверхности кладки печи может произойти совершенно спокойно за счет швов, если только швы будут достаточно податливы.

Однако, какие меры ни будут нами приняты, сложим ли мы печь без перевязки или с перевязкой, тем не менее, со временем, кладка всякой печи приходит в растройство; печь разбивается трещинами, стены выходят из отвесного положения и печь приходится перестроить с фундамента. Причина этому простая: кирпич при нагревании расширяется и толкает соседей. Когда печь остынет, то на свое старое место кирпич не возратится. Трещина растет и растет, стена выпирается наружу и, наконец, делается опасной [1]).

Это верно для всех печей без исключения, как бы мы их не крепили. Из сказанного следует одно правило, которого надо держаться всякому строителю печей. Стены печи должны исполнять только свое металлургическое назначение. Всякая конструкция, где на стены печи опирается какой-либо груз, где стены печи предназначаются исполнять роль гражданского сооружения,—конструкция неправильная. Например, на стены регенераторов нельзя опирать ванну мартеновской печи; эта последняя должна покоиться на специальных балках и колоннах, совершенно не зависящих от кладки регенераторов. Тоже относится к генераторам и шахтным печам: опирать на шахту доменной печи колошниковые устройства, а тем более шатер недопустимо. Шахта доменной печи должна быть совершенно свободна и не подвержена нагрузке, ударам и сотрясениям.

К сожалению, это простое соображение не пользуется популярностью и нарушается чаще, чем это было бы желательно.

Особенно непрочны своды печей, нагреваемых изнутри. Арка, прогреваемая и сверху, и снизу, расширяется равномерно и не теряет своей прочности. Но сводовое перекрытие, нагреваемое только снизу изнутри, чрезвычайно непрочно. Происходит под'ем арки, раскрытие наружных швов, а потому опирать на такой свод какие-либо устройства совершенно невозможно. Это признано давно всеми и таких случаев на практике не бывает.

---

[1]) Совершенно то же явление можно наблюдать на лампочках накаливания, прочно ввинченных в патрон. Лампочка, после многих пусков и остановок тока, т.-е. нагреваний и охлаждений, постепенно вывертывается из патрона и контакт ослабляется. Опоры ж. д. мостов делаются на катках, или роликах. Замечено, что ролики движутся только в одном направлении и выкатываются из-под опорной площадки.

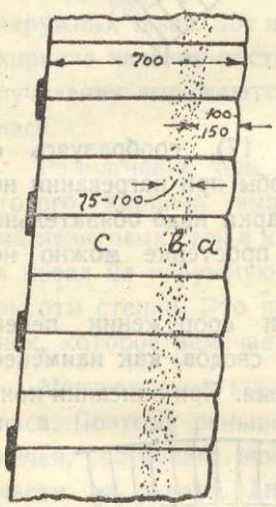
ГЛАВА IV.

Кладка печей.

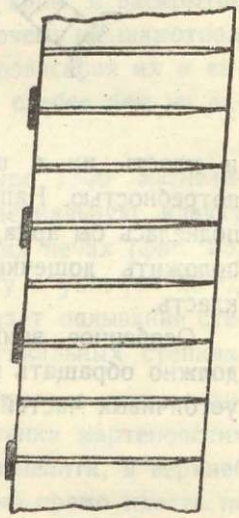
Кладка стен печи.

Мы видели выше, что неравномерная температура стен печей, высокая температура внутри и низкая снаружи, вызывает открывающиеся наружу трещины и быстрое разрушение стен печей. Через несколько лет работы печь разваливается и ее приходится, несмотря на крепление, перекладывать с фундамента. С этим присущим печам недостатком мы боремся и таким образом выработались некоторые специальные приемы кладки, о которых нужно сказать несколько слов.

Когда я служил в Н.-Тагильских заводах, мне приходилось много раз перекладывать шахты доменных печей этих заводов. Их клали из ординарного большемерного кирпича длиной 700 мм и более. Снаружи шахта доменной печи стягивалась железными кольцами. Разламывая шахту, мы наблюдали всегда одну картину.



Фиг. 12.



Фиг. 13.

Ординарный кирпич разделялся на три зоны (фиг. 12).

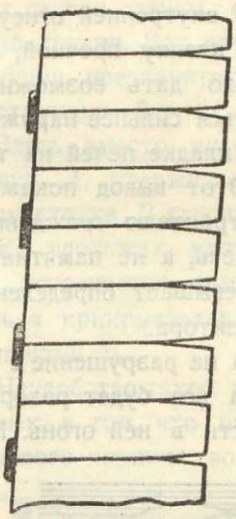
1) Внутренний слой *a*, шириной 100—150 мм сплавленный настолько, что швы совершенно не заметны и оболочка печи монолитна.

2) Средний слой *b*, обратившийся в дресву или песок толщиной 75—100 мм.

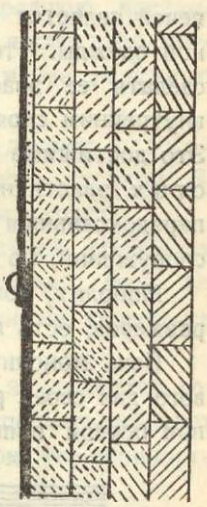
3) Наружный слой *c* неизмененного кирпича.

При выдувке печей очень часто внутренний слой обрушивался; за ним высыпался и средний слой. Кирпичи шахты доменной печи клались в притир со швами на толще 1 мм. Это и было причиной разрушения стен шахты. Допустим, что температура внутри шахты 1000°С, снаружи 0°С. Очевидно, каждый кирпич расширится во внутренней своей части и швы должны бы раскрыться снаружи (фиг. 13). Но на самом деле происходит вот что: нагретый до 1000°С кирпич, уже несколько пластичен, и под давлением соседних кирпичей сдавливается в высоту и слипается в монолит на внутренней поверхности шахты (фиг. 13).

Следующий за ним слой не выдерживает внутренних натяжений, происходящих от сдавливания конца кирпича, и искрашивается в песок, а наружные швы не раскрываются. Совершенно очевидно, что кладка домен из ординарного большемерного кирпича на весьма тонких швах не имеет никакого смысла. Если делать так шахту, то ее следовало бы делать из приостренных кирпичей (фиг. 14), которые, расширившись, заполнили бы промежутки и дали бы прочную шахту.



Фиг. 14.

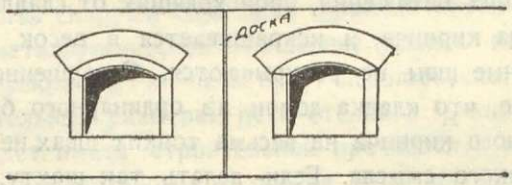


Фиг. 15.

Прямую противоположность представляет кладка кауперовских аппаратов по чертежам самого Каупера. Боковые стены аппаратов состоят из четырех концентрических колец в $^1/_2$ кирпича, сложенных из шаблонного кирпича, поставленного вертикально, размером 225 × 112 × 56 мм (фиг. 15). Таким образом кладка имеет вид вложенных друг в друга труб телескопа, которые могут свободно расширяться за счет швов. Кладка делается вплотную к железному кожуху без пазухи. Четырех швов достаточно, для придания достаточной эластичности кладки для расширения. Таким образом, в Нижне-Салдинском заводе было сложено семь аппаратов. Аппараты перекладывались только после 30 лет работы без ремонта, при чем эта перекладка вызвана была их надстройкой.

Сравнивая кладку домен и аппаратов Каупера, должно отдать предпочтение последней. В до-

менных печах происходит истирание кирпича шахтой. Кольцо в $^1/_2$ кирпича может быть истерто и может обрушиться в шахту. Если это даже случится, за первой оболочкой находится столь же крепкая и столь же огнеупорная вторая оболочка, третья оболочка, но нет пояса дресвы, который высыпается тотчас по разрушении внутренней оболочки. Доменная печь при этой системе кладки защищена от катастроф лучше, чем при ординарной кладке. Таким образом, мы приходили к выводу, что основной причиной разрушения кладки

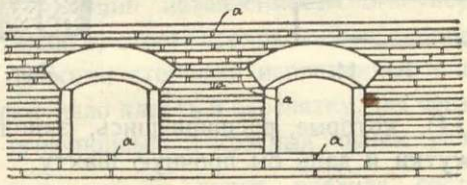


Фиг. 16.

печей является расширение внутренней огнеупорной одежды. Чтобы сделать кладку прочной, надо сделать ее эластичной, надо дать возможность внутренним слоям расширяться сильнее наружных. Это достижимо только при кладке печей на т о л с т ы х эластичных швах. Этот вывод покажется парадоксальным каждому строителю гражданских сооружений, но печь есть печь, а не памятник.

Монолит, пока он не превышает определенных размеров, есть идеал архитектора.

Печь монолит—осуждена на разрушение с первого дня своей работы. Она вся будет разорвана при первой попытке развести в ней огонь. Но и

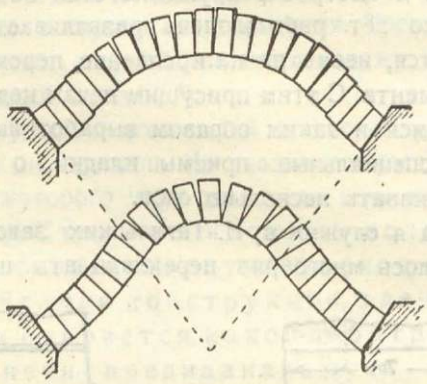


Фиг. 17.

для гражданских сооружений—монолитов есть пределы размеров. Железобетонные сооружения тоже снабжаются температурными швами.

Материалом для швов является для кислой кладки огнеупорная глина, шамот, кварц. Если температура печи не выше 1300—1400°, то шов так же огнестоек, как и кирпич, а потому он не понижает огнеупорности кладки. При температурах мартеновской печи или горна доменной печи глина уже не допустима и предпочитается кладка насухо. Такая кладка не может расширяться и и тогда в швы прокладываются полоски толя, картона, или тонкие дощечки. При кладке мартеновских печей насухо W e l l m a n закладывает на 1 м длины печи дощечку 8 мм толщины. При кладке громадных медно-плавильных отражательных печей американцы закладывают дощечки 6 мм внутри и 4 мм снаружи печи на метр длины печи.

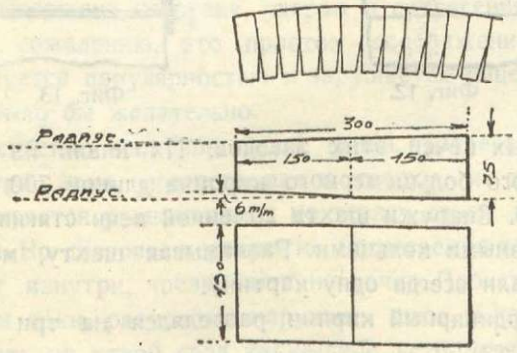
Для придания швам эластичности в глиняный раствор хорошо прибавлять вместо кварца или шамота древесные опилки. Они выгорают и дают пористый, мягкий шов. Закладывают в кладку обыкновенно цельные доски (фиг. 16). Это не рационально—лучше нарезать дещечки 112 × 56 мм



Фиг. 18.

и класть их в швы (фиг. 17), сообразуясь с потребностью. Например, чтобы при нагревании не поднялась бы арка, в пяты арки надо обязательно положить дощечки *a a*; в простенке можно не класть.

Особенное внимание при сооружении печей должно обращать на кладку сводов, как наименее устойчивых частей сооружения. При описании кон-



Фиг. 19.

струкции сводов мартеновских печей я укажу на ненормальность работы арки, внутренняя поверхность коей имеет 1600°C, а наружная 100—200°C, и на раскрытие наружных швов, как следствие этой ненормальности. Суммирование раскрытия швов в одном месте может дать провисшую арку, (фиг. 18) и быть причиной ее обрушения. В 1901 году я предложил для кладки сводов мартеновских печей особый приостренный кирпич (фиг. 19).

При кладке сводов на глине опасность нагрева арки изнутри не так велика. Шов все же дает некоторую эластичность, предохраняет арку от

наружного раскрытия швов и всех вредных от сего последствий, но все же подвергать арки большой нагрузке чрезвычайно вредно. Вот причина, почему нагрузка сводов в печах, подверженных одностороннему нагреву, не допускается. Мы видели, что стены печи должны исполнять только металлургическое назначение, и не хорошо опирать ванну мартеновской печи на стены регенераторов. Но все-таки это делали и делают посейчас, но конструкций, опирающих ванну на своды регенераторов, не найти. Эта конструкция признана безусловно неудачной и оставлена.

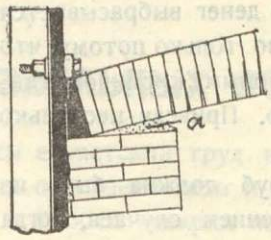
При рассмотрении свойств огнеупорных материалов мы видели, что шамотный кирпич при высоких температурах размягчается. Динас же сохраняет свою строительную прочность до перехода в христобалит, т.-е. до температур накануне своего плавления. Размягчение кончика кирпича, вложенного в арку, уменьшает рост арки и раскрытие наружных швов. Вот причина, почему на шамотном кирпиче явления роста арок, провисания их и выпучивания выражаются гораздо слабее, чем на динасе.

Размягчение при температуре 1500° магнезитового кирпича вызывает специальную кладку магнезитовых стен в мартеновских печах (фиг. 23) в повал на наружную облицовку с уклоном до $^1/_6$ высоты стенки. Это предупреждает оплывание стенок, которое замечается в вертикальных стенках.

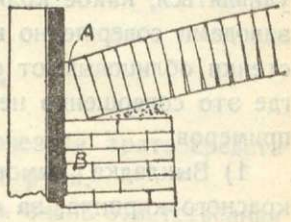
Магнезитовый кирпич значительно дороже динаса. Поэтому раньше делали стенки мартеновских печей, состоящие внизу из магнезита, в верхней части из динаса. Динас можно прямо класть на магнезит, без уединяющего слоя хромистого железняка. Магнезия вступает в реакцию с кремнеземом при температуре выше 1650° и потому такое соприкосновение кислого и основного материала совершенно безопасно. Но, однако, такая экономия была брошена. При оплывании стенки на откос под ней получается смесь кислых и основных материалов, которая в соприкосновении со шлаком и доломитом способствует быстрому разрушению основания стенки; гораздо выгоднее оказалось всю заднюю стенку делать из магнезита

Передняя стенка делается основной до уровня пят арок перекрывающих свод, которые приходится делать из динаса. Тут точно так же брошена идея соблюдения экономии—устройства стенок из динаса облицованных магнезитом. Однако, когда мы говорим об оплывании стенок мартеновских печей, то надо хорошо помнить, что большей частью причиной оплывания является совсем не качество огнеупорного материала, а отсутствие откосов у ванны, о чем см. ниже.

На прочность стенок мартеновской печи влияет также устройство пят свода. Обыкновенно, чтобы обеспечить хорошую регулировку роста свода связями, арки его опирают на чугунные пяты (фиг. 20), укрепленные болтами к чугунным обстановочным плитам. Такое устройство имеет свои неудобства: при росте свода, между стенкой и сводом получается щель a, где скопляется пыль MgO, CaO, Fe_2O_3. Пыль оплавляет стенку, расширяет щель и начинают гореть чугунные пяты свода. Поправить в



Фиг. 20.



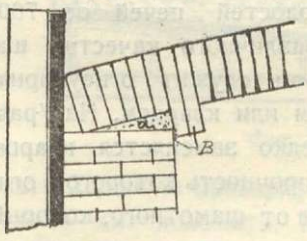
Фиг. 21.

этом случае стенку, особенно переднюю, чрезвычайно трудно. Вот почему очень часто этой конструкции предпочитают гораздо менее разумную конструкцию фиг. 21.

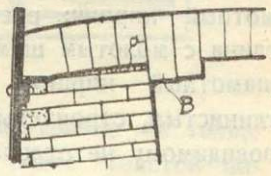
Здесь вместо чугунных пят делают пятовой кирпич A, удерживаемый на месте стенкой B. Когда стенка B сгорит, свод может упасть.

На чертежах мартеновских печей последних лет встречается иногда конструкция, фиг. 22; щель a прикрывается более длинными сводовыми кирпичами B.

Неудобство такой конструкции заключается, во-первых, в том, что надо иметь специальный сорт сводового кирпича; во-вторых, в том, что прочность



Фиг. 22.



Фиг. 23.

кирпичей высовывающихся из кладки при неперерожденном в тридимит динасе очень мала, такие выступы легко выкрашиваются.

Фиг. 23 представляет хорошо продуманную конструкцию кладки боковых стен, и пят свода. Щели при этом нет.

Растворы и методы утпотребленя огнеупорных материалов.

Остается сказать несколько слов о растворе, на котором кладут печи. При кладке частей печи из красного кирпича можно употреблять известь в тех местах, где температура печи не поднимается

выше 700°, так как $CaCO_3$ свободно переносит эту температуру, а известковый раствор прочнее глины, особенно в тех случаях, когда печь иногда подвергается подтоплению, например, во многих заводах Урала с высокой весенней водой. Красный кирпич можно свободно класть на глине в тех местах, где температура не поднимается выше 700°, но желательно класть его на растворе хорошей огнеупорной глины. Просматривая чертежи действующих печей, приходится удивляться, какое количество денег выбрасывается заводами совершенно напрасно только потому, что стенки облицовывают огнеупорным кирпичом там, где это совершенно не нужно. Приведу несколько примеров:

1) Выкладка дымовых труб должна быть из красного кирпича, за исключением случаев, когда печи не имеют ни регенераторов, ни рекуператоров, а тем более котлов, т.-е. когда температура дыма их выше 700°С, во всех остальных случаях они делаются из красного кирпича.

2) Борова. Под боровов всегда делается из красного кирпича. Стенки и своды только при температурах выше 700°, облицовываются огнеупорным кирпичом.

3) Последний пролет паровых котлов, под регенераторов, выкладка газопроводов, воздухопроводов, под и нижняя часть аппаратов Каупера должны быть сложены из красного кирпича на огнеупорной глине.

4) Вообще там, где в котлах и печах употребляется чугун и железо без охлаждения, должно употреблять красный кирпич.

При температурах полостей печей от 700° до 1400° употребляется различного качества шамотный кирпич; раствором служит огнеупорная глина с молотым шамотом или кварцем. На Урале шамотный кирпич нередко заменяется кварцеглинистым, строительная прочность которого в огне повидимому не отличается от шамотного, который, однако, благодаря дешевизне кварца, гораздо дешевле шамотного. Кирпич из шамота не может быть заменен кварцево-глинистым только при кладке горнов доменных печей на коксе.

При температуре выше 1400° применяется исключительно динас, сохраняющий при этой температуре свою полную строительную прочность.

Способность глины в швах размягчаться не особенно вредна для кладки. Однако, при температурах мартеновской печи глины в швах уже избегают и кирпич кладут насухо в притир.

Вообще в заводах распространено мнение, что динас не выдерживает охлаждения и повторного разогрева. Это мнение основано на практике работы на кварцевом динасе, в котором во время разогрева происходит чрезвычайно болезненный процесс перерождения кварца в тридимит. Если разогреть в первый раз мартеновскую печь представляет весьма большие трудности, то разогреть ее вторично, когда часть кирпича уже сплавлена в монолит, а в другой части имеются трещины и раскрытые швы, конечно, еще гораздо труднее. Неудачи разогрева имеют большое место, но только потому, что употребляется в работу динас, не сполна перерожденный в тридимит.

Когда заводы, наконец, поймут, что мартеновская печь есть сталеплавильная печь, а не печь для обжига динаса, и начнут употреблять перерожденный в тридимит динас, то плохое мнение о повторности разогрева печей сложенных из динаса, будет оставлено.

Магнезитовый кирпич укладывается в стены или на смоляном растворе, или на известковом растворе, иногда просто на кашице из мелкоразмолотого магнезита.

По первому способу теплый кирпич обмакивается в горячую обожженную смолу и укладывается на горячую кашицу из магнезитовой муки. на смоле. Это дорогой способ работы, но весьма хороший, особенно для подов. Просмоленный кирпич надолго хранит в поду, так сказать, восстановительную атмосферу и прошедший в под прожилок стали может годами находиться в поду и не окислиться, а, следовательно, не быть причиной срыва пода. Что это так, доказывается тем, что магнезитовый кирпич в таком поду белеет, Fe_2O_3 переходит в FeO и входит в состав периклаза белого цвета.

Класть магнезитовый кирпич на извести не следует, ибо известь на воздухе легко переходит в $Ca(HO)_2$ и может нарушить целость швов, когда печь будет остановлена. Лучше класть на кашице из мелкомолотого магнезита на воде. Эта кашица при обыкновенной температуре медленно твердеет, а в огне дает массу совершенно подобную магнезитовому кирпичу.

Хромистый железняк кладется так, как кладутся всякие бутовые кладки. Куски подбираются друг к другу и разщебениваются мелочью. Раствором служит молотый хромистый железняк на извести. Эта смесь при высоких температурах дает размягчающуюся массу, поэтому вопрос не может итти о получении монолитного хромистого пода, представляющего один кристаллический сросток. Если куски хромистого железняка не всплывают в стали, то, вероятно, вследствие того, что удерживаются, хотя пластичной, но вязкой массой спекшегося цемента из хромистого железняка и извести.

Во всяком случае, стенка из кусков хромистого железняка легко плывет и осыпается, поэтому вертикальных стен из хромистого железняка не кладут, а подобно магнезитовым стенкам делают их с уклоном.

Кроме всего этого, надо принять во внимание, что во время работы мартеновской печи стенки и под из хромистого железняка не должны соприкасаться с металлом. Для этого они прикрываются наваркой из доломита или магнезита. Почему-то последняя удается довольно плохо. Можно думать, что коэффициенты расширения хромистого железняка и магнезита различны. Если же работать на неприкрытом хромистом поду, то в металл может перейти до $1^1/_2\%$ хрома.

ГЛАВА V.

Устройство пода плавильных печей.

Мы видели, что оплывание стен мартеновских печей есть явление, с которым надо очень считаться. Но большей частью причина оплывания лежит совсем не в природе огнеупорных материалов, а в неправильности устройства пода. Шлаки подмывают, под'едают стены и стены плывут, ибо ванна печи не снабжена нужными откосами. Возможность правильного устройства пода, целесообразной формы ванны даже не подозревается многими строителями плавильных печей. Они дают чертежи печей с самой невероятной формой ванны, которую должен привести в возможность работать старшой у печи, наварив под. Если взять такой чертеж и постараться конкретизировать работу старшого, то мы придем к выводу, что слой навариваемого доломита или магнезита должен быть весьма значителен.

Такой пример я проделываю с печью Кушвинского завода (фиг. 24), считающейся на Урале одной из лучших мартеновских печей и вышедшей из рук очень известного инженера с большой практикой. Угол естественного откоса для песка в воде $= 26^1/_2°$ ($tg\alpha = 0{,}5$). Угол естественного откоса доломитовой или магнезитовой наварки в кипящей ванне нужно принять тоже около этого. Исходя из этого положения, вычерчиваю форму ванны для скрап-процесса (см. ниже).

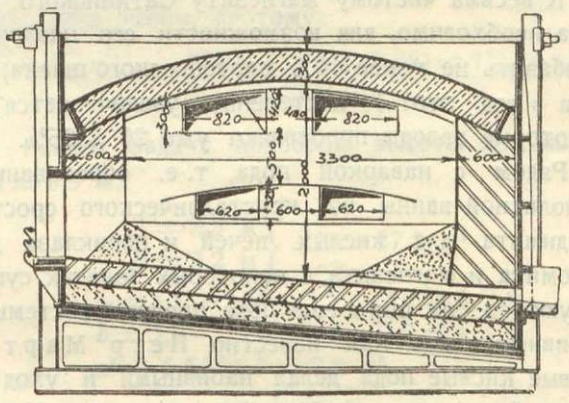
Что же я получаю? Если сделать откосы двойными, то ванна получит такой уровень, что шлак во время кипения почти достигнет пролетов. Откосы, конечно, придется сделать круче и начнется их оползание, а за ними поползут и вертикальные магнезитовые стенки.

Вот где лежит причина разгара рабочего пространства мартеновской печи; совсем не в качестве огнеупорных материалов, а в допущенной неправильности в форме ванны.

Вместе с тем обратите внимание на работу, которую проект печи взваливает на старшого, долженствующего наварить откосы: их толщина доходит в углах до 500 мм. Наварить такие откосы египетский труд и бесполезная трата средств на отопление печи и рабочие руки.

Работа наварки пода есть очень ответственная и трудно контролируемая работа, и наша задача должна заключаться в том, чтобы принять все меры ее облегчить старшому, а не наваливать на него непосильное бремя заваривать под невероятной толщины.

Мне говорил, как-то, один весьма опытный французский плавильщик, что он может гаранти-



Фиг. 24.

ровать хорошую проварку пода только не толще 50 — 80 мм. доломита. При более толстой подине срывы пода делаются хроническим явлением.

В чем же заключается процесс наварки?

Пуская в печь полное количество газа и воздуха, старшой прогревает кирпичную кладку пода возможно более сильно и на горячую поверхность посылает с лопаты очень тонкий слой навариваемого материала: кварцевого песка, доломита или магнезита. Очень часто, перед наваркой пода, кирпичную основу его поят мартеновским шлаком, кислым или основным, смотря по роду пода. Для этого на поверхность кирпича с лопаты посыпается очень тонкий слой шлака. Кирпич жадно пьет шлак, который способствует быстрой переработке кварца поверхности динаса в тридимит и магнезита периклаз. На смоченную шлаком поверх-

ность кирпичной основы хорошо приваривается первый слой песка, доломита или магнезита.

Употребляя весьма чистые кварц, доломит и магнезит, мы получаем тем худшие результаты, чем чище материалы. Интересно условие, существовавшее между Путиловским заводом и поставщиком доломита, по которому один прослоек почти химически чистого доломита доставлялся в завод не иначе, как в определенной смеси с очень грязным прослойком того же доломита, обжигавшимся вместе с ним; таким образом, в доломите поддерживался определенный % примесей (3—5%). В б. Александровском сталелитейном заводе доломит обжигался на коксе из сгарков генераторов и паровых котлов, ибо в них было очень много золы и они в достаточной мере портили весьма чистый доломит, доставляемый в завод.

В Мотовилихе (Пермь) пода кислых мартеновских печей наваривались толченым кварцем. Пода стояли чрезвычайно плохо. Когда я посоветовал перейти на речной песок из р. Камы, мне не хотели верить, но весьма скоро убедились, что мой совет был не так плох. Все трудности по уходу за подом исчезли.

К весьма чистому магнезиту Саткинского завода необходимо, для возможности его наварить, прибавить не менее 10% мартеновского шлака; из года в год этот % постепенно увеличивается и некоторые заводы прибавляют уже 20 и 25%.

Рядом с наваркой пода, т.-е. образованием монолитной ванны из кристаллического сростка тридимита для кислых печей и периклаза для доломита и магнезита, в некоторых заводах существуют до сих пор и еще пода прежней системы—набивных подов. Как известно Петр Мартен первые кислые пода делал набивными и уход за подом был у него чрезвычайно тягостным. Наварной кислый под—введен Вильямом Сименсом. Разница в работе этих двух творцов нового производства была так велика, что постепенно руководство им перешло всецело к В. Сименсу.

Кварцевый набивной под подвержен непрерывным срывам, ибо, при малейшем повреждении верхней перерожденной в тридимит, поверхности ванны, металл приходит в соприкосновение с неперерожденным кварцем, который при температуре жидкой стали быстро переходит в рыхлую аморфную разновидность тридимита, увеличивается в об'еме на 30% и приподнимает еще не потревоженные слои пода, чем увеличивает все более и более размеры образовавшейся в поду ямы.

Остановить процесс срыва пода в этом случае почти невозможно. Совершенно иначе дело обстоит в наварном поду. Срыв пода обнаруживает нижние слои наварки, состоящие из уже перерожденного кварца, с которыми от соприкосновения со сталью ровно ничего не делается.

Доломитовые пода навариваются из смеси доломита или магнезита со смолой. При нагревании такого пода смола коксуется и при очень высоких температурах получается, повидимому, кристаллический сросток карбидов кальция и магния. Процесс получения этих карбидов, повидимому, идет гораздо легче, чем перерождение динаса, и потому эти пода и до сих пор применяются на некоторых заводах. Но пода наварные всегда все же надежнее подов набивных, которые рыхлы и легко прорастают металлом. Если металл этот окислится в поду, то срыв пода неизбежен, вследствие реакции между углеродом ванны и кислородом окислившегося металлического включения, при чем выделяется громадный об'ем окиси углерода.

Присутствие углерода скоксовавшейся смолы предупреждает окисление прожилков стали и, таким образом, срыв пода.

Так как окисление прожилков металла в поду происходит преимущественно в то время, когда металл выпущен из печи и под омывается струями свежего воздуха, попадающего через окна в печь, то очевидно, что под печей непрерывного плавления, которые никогда не опоражниваются от металла, стоит гораздо лучше, чем под печей, плавящих периодически. Таким образом, непрерывно работающая печь Тальбота или непрерывно работающие медеплавильные печи Америки отличаются необычайно прочными подами, которые не причиняют решительно никаких забот.

В обыкновенных печах Мартена, для исправности работы пода, существует одно обязательное правило. Если после выпуска металла на поду окажется ямка, в которой остался металл, этот металл должен быть вычерпан из ямки и она должна быть высушена. Для этого в ямку кидается лопаткой песок, в случае кислых печей, и известь, доломит или магнезит, в случае основных печей и металл энергично замешивается клюшкой с холодной прибавкой. Получившаяся каша выкидывается из ямки и из печи, а ямка прогревается и заваривается тонкими слоями. Если ямка очень глубокая, то прибегают к стравливанию ее откосов (SiO_2, Fe_2O_3 или лучше железной стружкой) и на месте уширенной ямки делается на поду заплата, для чего иногда тратят смену и более.

Расчет ванны мартеновской печи.

Согласно данным проф. М. А. Павлова площадь пода мартеновской печи для скрап-процесса и его линейные размеры могут быть расчитаны на основании следующих таблиц:

Обозначим T — вместимость печи в тн.
„ S — площадь пода в м².

T тн	$S:T$	S м²	T тн	$S:T$	S м²
12,5	1,20	15,00	30,0	0,90	27,00
15,0	1,125	16,88	40,0	0,825	33,00
17,5	1,05	18,38	50,0	0,80	40,00
20,0	1,00	20,00	60,0	0,75	45,00
25,0	0,95	24,00			

A — длина ванны в м.
B — ширина „ „ „

Для определения этих последних величин имеем следующую таблицу:

T тн	$A:B$	A м	B м	$A\times B$
12,5	2,50	6,10	2,45	15,00
15	2,50	6,50	2,60	16,88
17,5	2,52	6,80	2,70	18,38
	2,55	7,15	2,80	
20	2,60	7,22	2,77	20,00
	2,60	7,90	3,05	
25	2,66	8,00	3,00	24,00
	2,66	8,50	3,20	
30	2,70	8,55	3,16	27,00
	2,70	9,45	3,50	
40	2,75	9,51	3,46	33,00
	2,75	10,50	3,81	
50	2,80	11,00	3,64	40,00
	2,80	11,23	4,00	
60	3,00	11,60	3,88	45,00

Я делаю два предположения: 1) во время кипения ванна при скрап-процессе увеличивается в об'еме не более $1^1/_2$ раз; даже при таком под'еме ванны шлак не должен выйти из откосов; 2) откосы делают двойными, т.-е. $tg\alpha = 0{,}5$ и угол естественного откоса—$26^1/_2{}^\circ$ (см. выше).

Приняв форму вместилища ванны за-обелиск, прикрытый пирамидой, мы можем спроектировать ванну печи для скрап-процесса.

1. Пример расчета ванны для 30 тонной печи, работающей скрап-процессом.

Площадь пода по М. А. Павлову:

$$S = 30 \cdot 0{,}9 = 27 \text{ м}^2$$

Отношение длины к ширине $= 2{,}7$.

Принимаю окончательно размеры: длина—8,5 м; ширина—3,2; площадь—27,2 м².

Об'ем обелиска:

$$V_1 = \frac{H}{6}\left[\, AB + ab + (A+a)(B+b) \,\right]$$

где A и B — ребра большого основания, a и b — ребра меньшего основания, а H — высота обелиска.

Об'ем пирамидки, по граням которой металл стекает к отверстию:

$$V_2 = \frac{1}{3}\, ab\, h; \quad \text{где } h = \frac{a}{2}\, tg\, 1^\circ 30',$$

так как уклон пода делается в $1^1/_2{}^\circ$, т.-е. около 26 мм на метр.

Об'ем вместилища ванны $(V_1 + V_2)$ должен равняться об'ему ванны, увеличенному в $1^1/_2$ раза; 1 тонна металла занимает 0,14 м³; 1 тонна шлака — 0,28 м³; вес шлака примерно равен 20% веса ванны, поэтому:

$$V_1 + V_2 = 1^1/_2 \times 30\,(0{,}14 + 0{,}2 \cdot 0{,}28) = 1^1/_2 \times 5{,}88 = 8{,}82 \text{ м}^3.$$

Решаю задачу подбором высоты H. Задаюсь $H = 0{,}5$ м.

$$\left.\begin{matrix} A = 8{,}5 \text{ м} \\ B = 3{,}2 \text{ м} \end{matrix}\right\} AB = 27{,}2 \text{ м}^2$$

$$a = 8{,}5 - 4H = 8{,}5 - 2{,}0 = 6{,}5 \text{ м}$$
$$b = 3{,}2 - 4H = 3{,}2 - 2{,}0 = 1{,}2 \text{ м}$$
$$ab = 6{,}5 \times 1{,}2 = 7{,}8 \text{ м}^2$$

$$\left.\begin{matrix} A + a = 8{,}5 + 6{,}5 = 15 \\ B + b = 3{,}2 + 1{,}2 = 4{,}4 \end{matrix}\right\} (A+a)(B+b) = 15 \cdot 4{,}4 = 66{,}0.$$

Откуда об'ем обелиска:

$$V_1 = \frac{0{,}5}{6}(27{,}2 + 7{,}8 + 66{,}0) = 8{,}40 \text{ м}^3.$$

Об'ем пирамидки:

$$h = \frac{6{,}5}{2} \cdot 0{,}026 = 0{,}084 \text{ м}.$$

$$V_2 = \frac{1}{3}\, abh = \frac{1}{3} \cdot 7{,}8 \cdot 0{,}084 = 0{,}22 \text{ м}^3.$$

Об'ем вместилища ванны:

$$V_1 + V_2 = 8{,}40 + 0{,}22 = 8{,}62 \text{ м}^3.$$

Об'ем подобран с достаточной степенью точности и H можно принять равной круглой цифре—0,5 м.

Если остановиться на такой форме вместилища ванны, то интересно определить уровень ванны в спокойном состоянии, т.-е. высоту обелиска, об'ем коего будет равен об'ему металла и шлака без об'ема пирамидки. т.-е.

$$V_3 = 5{,}88 - 0{,}22 = 5{,}66 \text{ м}^3.$$

Задаюсь высотой этого обелиска $H = 0{,}4$ метра; тогда:

$$\left.\begin{matrix} a = 6{,}5 \text{ м} \\ b = 1{,}2 \text{ м} \end{matrix}\right\} ab = 7{,}8 \text{ м}^2$$

$$a_1 = 6{,}5 + 1{,}6 = 8{,}1 \text{ м}$$

$$b_1 = 1{,}2 + 1{,}6 = 2{,}8 \text{ м}$$

$$a_1 b_1 = 8{,}1 \times 2{,}8 = 22{,}7 \text{ м}^2$$

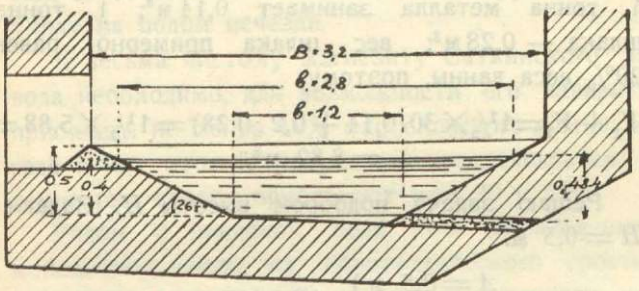
$$\left.\begin{matrix} a + a_1 = 6{,}5 + 8{,}1 = 14{,}6 \\ b + b_1 = 1{,}2 + 2{,}8 = \ 4{,}0 \end{matrix}\right\} (a + a_1)(b + b_1) =$$

$$= 14{,}6 \times 4{,}0 = 58{,}4.$$

$$V_3 = \frac{0{,}4}{6}(7{,}8 + 22{,}7 + 58{,}4) = 5{,}9 \text{ м}^3.$$

Таким образом, высота H с достаточной точностью определяется в 0,4 м.

Теперь мы можем вычертить вместилище ванны для скрап-процесса (фиг. 25).



Фиг. 25.

Зеркало ванны в спокойном состоянии будет равно:

$$a_1 b_1 = 22{,}68 \text{ м}^2;$$

средняя глубина металла:

$$\frac{0{,}14 \times 30}{22{,}68} = \frac{4{,}2}{22{,}68} = 0{,}185 \text{ м}.$$

Толщина слоя шлака при 20% по весу:

$$\frac{30 \,.\, 0{,}2 \,.\, 0{,}28}{22{,}68} = \frac{1{,}68}{22{,}68} = 0{,}074 \text{ м}.$$

Глубина металла и шлака над отверстием:

$$0{,}4 + 0{,}084 = 0{,}484 \text{ м}.$$

Глубина металла над отверстием:

$$0{,}484 - 0{,}074 = 0{,}410 \text{ м}.$$

Все эти данные указывают, что вместилище для ванны спроектировано удовлетворительно.

2. Теперь перейдем к проекту ванны для 30 тонной печи, работающей рудным процессом.

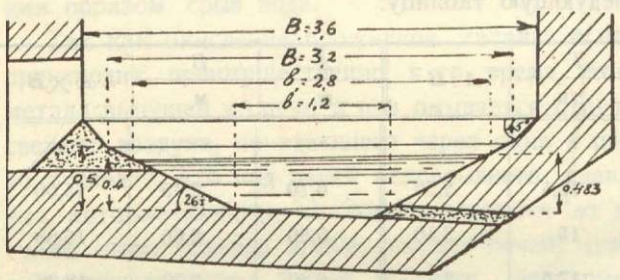
Как известно, при работе на жидком доменном чугуне и руде есть период начала горения углерода, когда ванна клокочет и пена шлака поднимается весьма высоко. Об'ем ванны при этом увеличивается по крайней мере в 2—2½ раза.

Если бы мы решились работать на печи для скрап-процесса рудным процессом, то клокочущая ванна, конечно, поднялась бы выше откосов и началось бы быстрое разрушение вертикальных боковых стенок печи. Поэтому для работы рудным процессом необходимо поднять откосы печи так, чтобы увеличить вместилище ванны до 2½ раз.

Если сохранить угол откоса стенок ванны, то в изображаемой нами печи этого нельзя сделать, не уменьшив зеркала ванны и не увеличив ее глубины.

Но рудная плавка требует такой затраты тепла от печи, что уменьшать зеркало печи, без вреда для работы печи, совершенно невозможно.

Таким образом, мы приходим к совершенно ясному выводу, что с переходом на рудный процесс площадь пода должна быть увеличена и вместилище металла и шлака должно быть увеличено наращиванием откосов вверх до емкости 2½ об'емов металла и шлака. Так как такое энергичное кипение продолжается всего какие-нибудь ½ часа, а затем утихает, то откосы в этой части ванны можно сделать в 45°. Определим высоту обелиска, площадь меньшего основания которого равна AB, уклон стенок 45° и об'ем коего равен об'ему металла и шлака, что увеличит общий об'ем всей ванны до 2½ об'емов металла и шлака.



Фиг. 26.

Задаюсь $H_2 = 0{,}20$ м.

$$\left.\begin{matrix} A = 8{,}5 \text{ м} \\ B = 3{,}2 \text{ м} \end{matrix}\right\} AB = 27{,}2 \text{ м}^2$$

$$\left.\begin{matrix} A_1 = 8{,}5 + 0{,}4 = 8{,}9 \text{ м} \\ B_1 = 3{,}2 + 0{,}4 = 3{,}6 \text{ м} \end{matrix}\right\} A_1 B_1 = 32{,}0 \text{ м}^2$$

$$\left.\begin{matrix} A + A_1 = 8{,}5 + 8{,}9 = 17{,}4 \\ B + B_1 = 3{,}2 + 3{,}6 = \ 6{,}8 \end{matrix}\right\} (A + A_1)(B + B_1) =$$

$$= 17{,}4 \times 6{,}8 = 118{,}3$$

$$V_4 = \frac{0{,}2}{6}(27{,}2 + 32{,}0 + 118{,}3) = \frac{0{,}2}{6} \cdot 177{,}5 =$$

$$= 5{,}92 \text{ м}^3$$

Т.-е. мы получим ванну изображенную на (фиг. 26).

Ванна эта шире и длинее ванны для скрап-процесса на $2H_2 = 0{,}4$ м., т.-е. имеет длину 8,9 при ширине 3,6 м; площадь ее $8{,}9 \times 3{,}6 = 32$ м².

Проделав подобные расчеты ванн для 15—50-тонных мартеновских печей, мы приходим к выводу, что спокойные ванны имеют:

	15 тонн. мм.	30 тонн. мм.	50 тонн. мм.
Глубину металла и шлака над отверстием . . .	458	483	510
Толщина слоя 20% шлака	66	74	81
Высоту откосов при скрап-процессе	500	500	500
При рудном процессе высота откосов должна быть увеличена на . .	160	200	230
Соответственно чему должны быть увеличены размеры ванны в длину и ширину	320	400	460

Откуда следует, что таблицы М. А. Павлова должны быть пополнены нижеследующей таблицей.

Ширина и длина печей для увеличения откосов при работе рудным процессом на жидком чугуне должны быть увеличены на нижеследующие величины:

12,5	тн	300	мм
15	„	320	„
17,5	„	335	„
20	„	350	„
25	„	375	„
30	„	400	„
40	„	430	„
50	„	460	„
60	„	500	„

При таком увеличении площади пода для рудного процесса стенки печи не будут оплывать.

Из теории мартеновского процесса ясно, что рудный процесс требует от печи очень напряженной работы и большей затраты тепла, чем скрап-процесс. Чтобы облегчить работу печи при переходе от скрап-процесса к рудному, полезно увеличить емкость рабочего пространства, а, следовательно, возможный расход газа и воздуха в секунду, чего мы достигнем, если увеличим площадь пода, но оставим прежнюю высоту рабочего пространства.

Исходя из об'ема рабочего пространства для скрап-процесса в 1,8 м³ на тонну, мы получим нижеследующие таблицы.

Скрап-процесс.

Емкость печи в тоннах.	Размеры пода в м.	Площ. пода в м².	Об'ем рабоч. простр. в м³.	Высота свода в м.
15	6,50 × 2,60	16,9	27	1,60
20	7,15 × 2,80	20,0	36	1,80
25	8,00 × 3,00	24,0	45	1,88
30	8,50 × 3,20	27,2	54	2,00
40	9,45 × 3,50	33,0	72	2,18
50	10,50 × 3,81	40,0	90	2,25
60	11,23 × 4,00	45,0	108	2,40

Рудный процесс.

Емкость печи в тоннах.	Размеры пода в м.	Площ. пода в м².	Об'ем раб. прост. в м³.	Высота свода в м.	Увеличение площ. пода и рабочего простр. в %
15	6,82 × 2,92	20,0	32,0	1,60	18,5
20	7,50 × 3,15	23,6	42,5	1,80	18,0
25	8,37 × 3,38	28,3	53,2	1,88	18,2
30	8,90 × 3,60	32,0	64,0	2,00	18,5
40	9,88 × 3,93	38,8	84,6	2,18	17,5
50	10,96 × 4,27	46,8	105,3	2,25	17,0
60	11,73 × 4,50	52,8	126,7	2,40	17,3

Устройство откосов для рудной плавки увеличивает, как видно из таблицы, площадь рабочего пространства и об'ем рабочего пространства на 17—18%, т.-е. до 2,12 м³ на тонну.

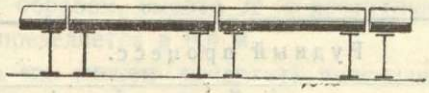
Если для работы рудным процессом надо приспособить старую печь, работавшую ранее скрап-процессом, то увеличение ванны в длину осуществить бывает трудно: мешают головки. Тогда — вместо увеличения в длину и в ширину — можно, пользуясь преимуществами машинной посадки, увеличить только ширину. Подбор надлежащей ширины печи не представит никакой трудности.

В заключение нельзя не отметить удивительную целесообразность пропорциональных размеров ванны для скрап-процесса проф. М. А. Павлова. Предлагаемый способ вычерчивания ванны и поправки для рудного процесса только подчеркивают разумность рекомендуемых им размеров

Прорыв металла через под.

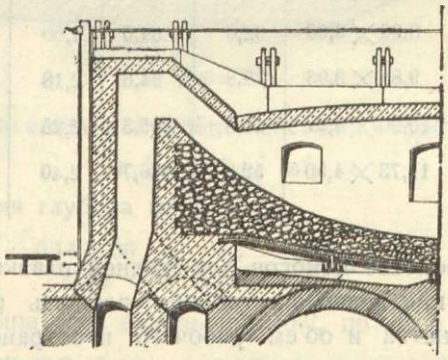
Прорыв металла через под, обыкновенно, есть следствие срыва пода. Лучшее средство обеспечить печь от прорыва металла заключается, конечно, в приготовлении хорошо проваренной подины, чтобы металл, прорвавшийся через верхний слой, мог бы быть остановлен последующими слоями проваренной подины. Но, если этого нет, тогда остается только положиться на охлаждение пода через подовые доски, на конструкцию которых должно быть обращено самое серьезное внимание.

Под мартеновской печи имеет уклон к отверстию. Вопрос: делать ли пода одинаковой толщины (см. фиг. 24) и подовые доски с уклоном к отверстию, или сделать подовые доски горизонтальными, что проще, а под толще к рабочему окну и тоньше к отверстию (см. нижесл. фиг. 30)?



Фиг. 27.

Несомненно, что лежащая совершенно горизонтально подовая доска остужается конвекционным потоком наружного воздуха гораздо хуже, чем доска, поставленная с уклоном, а потому конструкция фиг. 24 предпочтительнее, хотя она гораздо сложнее в сборке.



Фиг. 28.

Подовые доски часто делаются с ребрами. Эти ребра недопустимы, ибо они затрудняют охлаждение пода наружным воздухом, т. к. стоят поперек конвекционных потоков. Напротив того, изнутри они вполне уместны и более грамотны с механической точки зрения (фиг. 27).

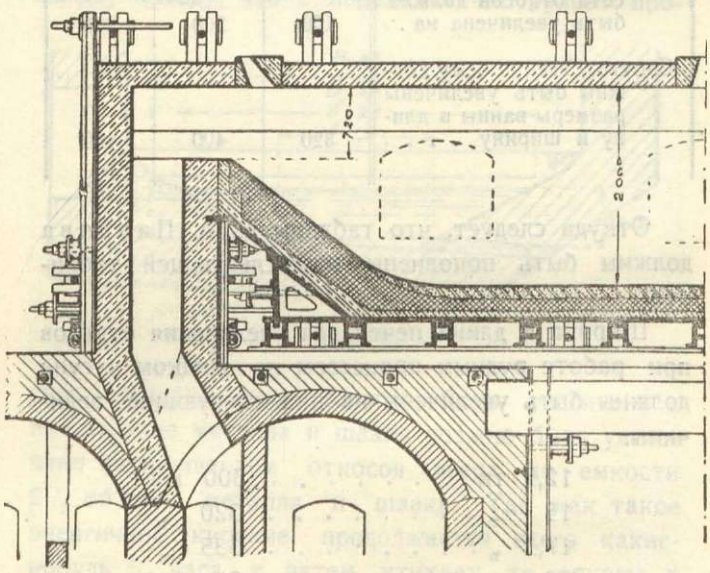
Очень хороша американская конструкция, когда вместо чугунных подовых досок укладывается сплошной помост швеллерных балок (фиг. 30), фланцы коих обращены внутрь пода.

Чаще всего прорыв металла замечался в вертикальные каналы и регенераторы, чему способствовала конструкция фиг. 28.

Теперь, как правило, считается делать печи с подовыми досками, приподнятыми так высоко, что бы возможность этого прорыва была бы предупреждена (поджарые печи). Но такая конструкция предопределяет расположение ванны в мешке холодных газов.

Обыкновенно дымовые пролеты снимают остывшие газы выше поверхности ванны на 300 мм при скрап-процессе и до 800 мм,—при рудном процессе.

В этом отношении удивительное уродство представляют все мартеновские печи на нефти, которое систематически повторяется всеми заводами. На фиг. 29 представлена печь Сормовского завода, где порог, через который печные газы удаляются из мартеновской печи, поднят над уровнем спокойной ванны на 900 мм, тогда как ванна во время кипения поднимается при работе скрап-процессом всего на 50—75 мм. Таким образом, глубина мешка холодных газов искусственно увеличивается на 800 мм.



Фиг. 29.

Последствия этого уродства сказались в том, что длинные 40-тонные печи стали работать холодно, и угол ванны со стороны отвода печных газов начал стынуть.

Чтобы избегнуть этого, начали ставить форсунку в середине печи и расход нефти подняли до 16—18% веса слитков, вместо нормальных 12—14%.

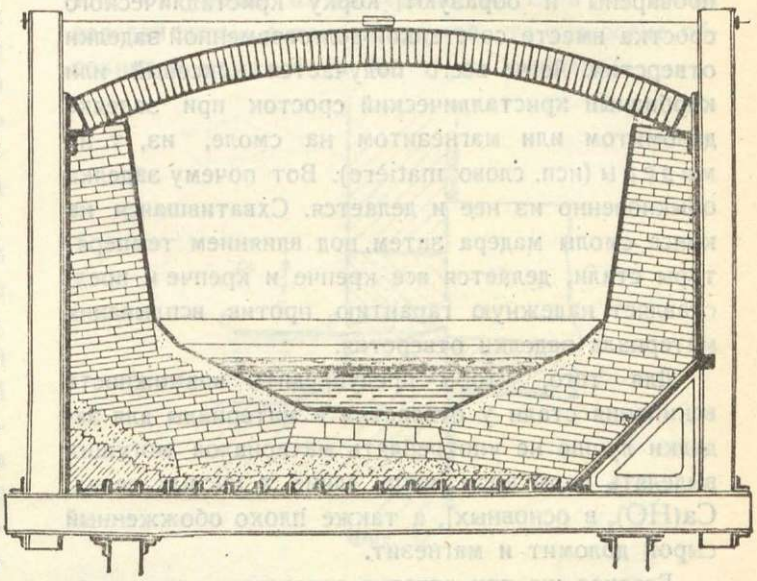
На это уродство было указано завед. мартеновским производством завода б. Гужона инж. Трубину. Пороги были срезаны до высоты 300 мм и 40-тонные печи сразу пошли великолепно—без всяких дополнительных форсунок.

Итак, прорыв металла через под предупреждается энергичным охлаждением его подовыми

досками и наружным воздухом. Чтобы потери тепла через под не были бы очень значительны, толщину пода делают не меньше 400 — 500 мм. При такой толщине пода длина выпускного отверстия выходит значительной. Чтобы уменьшить ее и не тратить лишнего материала на заднюю стенку, угол пода срезывают, как показано на фиг. 30, представляющей конструкцию кладки пода и стен мартеновской печи. Жолоб, при этом, получает косой фланец.

Текущий ремонт пода заключается в поправке после каждой плавки откосов. Откосы раз'едаются и разрываются кипящим шлаком. Поправка их в основных печах ведется или сырым или обожженным доломитом и магнезитом и даже известняком. Казалось бы, что употребление необожженных материалов должно дать результаты худшие, чем употребление хорошо обожженных материалов, а оказывается наоборот. Заварка откосов более продолжительна, но результаты лучше. Повидимому, получающиеся при обжиге MgO и CaO в момент рождения лучше перерабатываются шлаком в кристаллический сросток периклаза. Т. о., перед заведующим мартеновским цехом ставится вопрос: что выгоднее, расходовать ли дорогой обожженный материал и сокращать время заварки откосов, или расходовать дешевый сырой материал, тратить время печи на заварку, но получать более прочные откосы? Этот вопрос решается заводами различно.

Я ни слова не сказал, как испытывается хорошая заварка пода: крюшка скользит по хорошо заваренному поду, как по льду. Пока под мягок и вязок — садки делать нельзя. Для получения такой заварки новый под должно напоить до отказа шлаком. Так как под нужно делать не тоньше



Фиг. 30.

400 — 500 мм, то делать его весь из дорогого магнезита, конечно, не стоит. Обыкновенно на чугунные подовые доски кладется $^1/_4$ кирпича динаса, потом слой 150 мм набойки хромистого железняка, если он дешев, затем один или два слоя магнезитового кирпича.

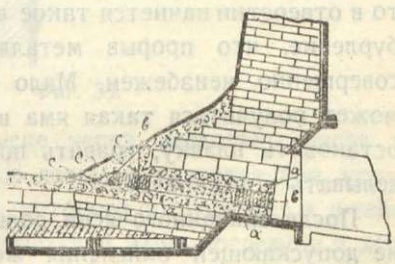
ГЛАВА VI.

Устройство отверстия (летки).

Летка мартеновской печи.

На уровне кладки пода из магнезитового кирпича в основных печах, или динасового пода в кислых печах закладывается окно для отверстия размерами около 300 × 300 мм. Его перекрывают обыкновенно двумя полуциркульными арочками в $^1/_2$ кирпича. При разогреве печи, при наварке пода отверстие прикрывается листом железа или закладывается насухо кирпичем. Окончательная заделка его производится после окончания заварки пода. Она состоит из трех частей (фиг. 31): *aa*—долговременная заделка по дереву делается в конце наварки пода по деревянному чурбану, выжигая который получаем канал отверстия, заделываемый после каждой плавки; *bb* заделка, разделывается каждую плавку, для выпуска металла и шлака, и заделывается снаружи; *cc*—закидка из печи, удерживаемая пехлом из окна. К этой закидке и забивается заделка *bb*; c_1c_1—заварка закинутая через окно.

Заделка отверстия должна удовлетворять следующим условиям:



Фиг. 31.

1) она должна выдерживать гидростатическое давление стали, т.-е. около $^1/_2$ атмосферы;

2) она не должна всплывать в металлической ванне;

3) она не должна быть причиной бурления стали во врея плавки;

4) она должна легко разделываться, т.-е. не должна очень крепко завариваться во время плавки.

Так как вся заделка отверстия имеет около 60—90 см длины, то забить ее так крепко, чтобы она выдержала гидростатическое давление стали трудности не представляет. Условие, что материал ее не должен всплывать в стальной ванне, осуществимо тогда, когда закидка *cc* и заварка c_1c_1 хорошо проварены и образуют корку кристаллического сростка вместе со стенкой долговременной заделки отверстия. Легче всего получается коксовый или карбидный кристаллический сросток при заделке доломитом или магнезитом на смоле, из, т. н., мадеры (исп. слово matière). Вот почему заделка обыкновенно из нее и делается. Схватившаяся на коксе смолы мадера затем, под влиянием температуры стали, делается все крепче и крепче и представляет надежную гарантию против всплывания материала заделки отверстия.

Для того, чтобы предупредить возможность вскипания стали у отверстия в материалы для заделки лучше не употреблять материалов могущих выделять пары воды [напр. глина в кислых печах, $Ca(HO)_2$ в основных], а также плохо обожженный сырой доломит и магнезит.

Главное же при заделке отверстия надо тщательно его высушить, т.-е. обеспечить отверстие от включений металла. Правило заделывать «сухое» отверстие одинаково применимо, как к мартеновским, так и к доменным, медеплавильным и каким угодно печам. В домнах летка сушится потому, что чугун в летке затруднит следующий выпуск, ибо пробить отверстие в «зачугунелой» летке очень трудно. То же самое и в мартеновской печи с той разницей, что чугун пробивается легче мягкого железа и что доменную летку можно пробивать часами без всякого вреда для домны, выпуск же из мартеновской печи должен производиться в одну—две минуты, не больше. Наконец, мягкотинка железа, оставшаяся при заделке в отверстии во время плавки окислится и покроется окалиной. Если углеродистый металл войдет в соприкосновение с таким окисленным включением металла, то в отверстии начнется такое выделение CO, такое бурление, что прорыв металла через отверстие совершенно неизбежен. Мало того, у отверстия может получиться такая яма в поду, что придется остановить плавку, травить под и серьезно его заделывать и заваривать

После сказанного ясна роль смолы при заделке, не допускающей окисления железных прожилков и та педантичная аккуратность, с которой плавильщик и каменщик сушат отверстие. Для этого плавильщик закидывает к отверстию магнезит, доломит, сырой доломит, известняк, одним словом какой-нибудь порошкообразный огнеупорный материал (при кислых печах, конечно, песок), в котором замешивает металл и шлак, оставшиеся в лужице у отверстия, в кашу, которую каменщик выгребает маленькой клюшкой через отверстие в жолоб. Только тогда, когда у отверстия не останется ни следа металла и шлака, отверстие будет совершенно сухо, можно приступить к заделке отверстия. С этой операцией обыкновенно не торопятся. Высушив отверстие, начинают сушить все ямки, бывшие на поду, выгребая кашу из металла. шлака и закинутого материала на края ямки с тем чтобы потом спустить его в отверстие или просто оставить на поду, ибо оставить металл опасно только в ямке, где его можно завалить и заварить магнезитом и доломитом.

Только похороненная в поду окисленная «мякоть» может быть причиной срыва пода и ямы в поду столь сер'езной, что металл может уйти из печи через под. Мякоть на поверхности пода столь же безопасна, как всякий кусок скрапа. Заделка отверстия начинается с закидки нескольких лопат мадеры изнутри печи через рабочее окно плавильщиком. Это закидка *cc*. К ней прижимается плавильщиком изнутри печи пехло и начинается забивка отверстия каменщиком со стороны жолоба. Каменщик с помощником плотно утрамбовывают мадеру, причем всякий их удар прекрасно чувствуется плавильщиком, держащим пехло в руках. Таким образом, получается пробка мадеры, забитая с двух сторон около фута длины. Когда мадерная пробка забита, отверстие забивается не сильно каким нибудь рыхлым материалом: например хромистым железняком, смоченным известью, старым магнезитовым порошком, доломитом; в кислых печах забивают песком с коксом. Роль мадеры в кислых печах играет хороший кварцевый песок или толченый кварц, смоченный глиной.

Вся эта забивка играет роль пробки, противустоящей гидростатическому давлению стали. Надеяться, что она удержит плавку, если мадера будет проедена металлом, не приходится. Конец отверстия забивается глиной. Перед выпуском глина и вся заделка до мадерной пробки выколачиваются легким ударом ломика и выгребаются вон. Перед самым выпуском каменщик осторожно утончает мадерную пробку на столько, что несколькими ударами балды по лому он может пробить ее насквозь.

В то время, когда каменщик окончательно заделывает отверстие, плавильщик убирает пехло и кидает несколько лопат магнезита на откос у отверстия c_1c_1 и пускает хорошее пламя, чтобы заварить отверстие из печи. Обыкновенно, для этого достаточно 20—30-ти минут, после чего начинается садка для новой операции.

Заделка отверстия на струе.

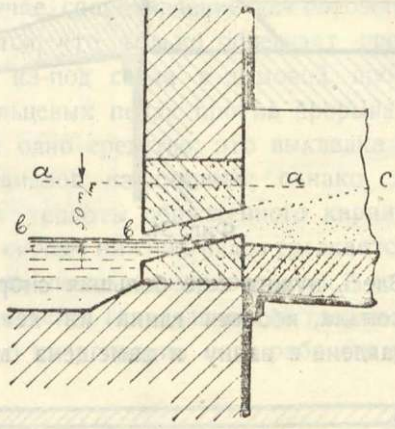
Колоссальные медеплавильные печи Америки на 300 тн емкости работают непрерывно на мертвом слое штейна в 150—200 мм толщины, прикрывающем под. Такая работа есть лучший способ предохранить под от порчи. Это касается одинаково, как печей доменных, так мартеновских медеплавильных и всяких других. Для иллюстрации расскажу собственный опыт в этом направлении Я служил в Нижне-Салдинском заводе, где весь жидкий доменный чугун выпускался в ковш и поступал в бессемеровскую фабрику. Доменные печи этого завода имели очень продолжительные кампании. Построенная мною домна № 4 имела первую кампанию в 15 лет. Рядом с Нижней Салдой, в 10 верстах, расположен В.-Салдинский завод, имевший доменные печи того же типа, плавивший те же руды, но почему-то очень часто выдувавший домны. Кампания в 2—3 года считалась здесь максимальной. Когда я был назначен управителем в В. Салду, выяснилась причина столь коротких кампаний: мастер, при доменных печах В. Салдинского завода, требовал от горновых выпуска чугуна возможно ниже, чтобы в горне не оставался бы мертвый чугун. Запустить летку и пробить ее выше товарища по смене считалось позором и отверстие по мере разгара лещади опускалось все ниже и ниже. Однако, такому понижению был предел. Лещадь доменной печи делалась из лещадных кирпичей в 700 мм, поставленых вертикально. Когда лещади оставалось всего 250—300 мм печь выдували, опасаясь прорыва чугуна в крестовину под лещадью.

Перед моим назначением управителем одна из доменных печей была, таким образом, предназначена к выдувке.

Я, конечно, не стал разубеждать мастера в том что его приемы ложны, а предложил ему с'ездить за 10 верст в Нижне-Салдинский завод того же владельца и осмотреть положение отверстия (летки) относительно уровня лещади в работавших четырех доменных печах и доложить мне, что он там увидит.

Оказалось, что высота ковша, в который выпускали чугун в Нижней Сальде, не допускала понижения уровня летки и все четыре домны Нижней Салды работали на мертвом слое чугуна, что обеспечивало столь длинные кампании печи, предупреждая разгар лещади от соприкосновения со шлаком и последующего оплывания стенок горна. Я предложил тогда ему сделать то, что много лет уже практиковалось в Н. Сальде, т.-е. заростить отверстие и накопить мертвый слой чугуна в 300 мм толщины. Это было сделано и мы проработали на приговоренной к выдувке домне еще пять лет.

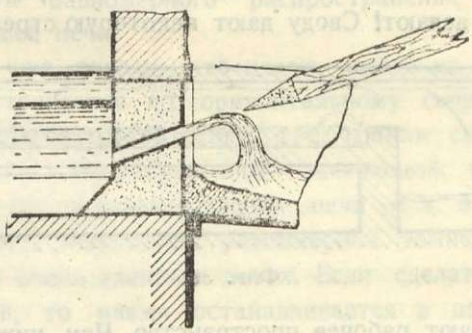
Работа на мертвом слое чугуна в доменных печах облегчает заделку сухого отверстия. Если выпускать чугун из домны на дутье, то уровень чугуна понизится ниже уровня летки на давление газов в горне, или в древесно-угольных домнах при 150 мм давления дутья на 50 мм (фиг. 32), т.-е. от уровня *aa* до уровня *bb*. Если во время заделки летки остановить дутье, то отверстие обсохнет и может быть без труда заделано.



Фиг. 32.

Отверстие в медеплавильных печах приходится сушить другим приемом, требующим большего искусства от мастера.

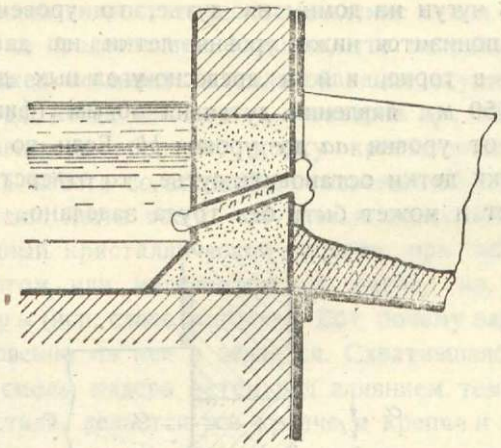
Струя штейна пересекается конусом сырой и пластичной глины, укрепляемом на деревянный шест (фиг. 33). Удар конуса сырой мягкой глины должен быть резок и строго централен, только тогда удастся зажать сырую глину во всю длину отверстия и высушить его вплоть до самого штейна. (Фиг. 34).



Фиг. 33.

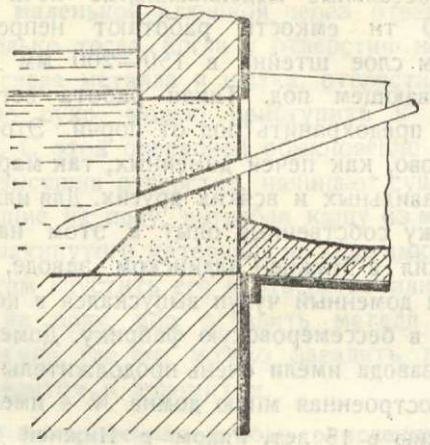
При новом выпуске через несколько часов в глину, выполняющую летку, забивается лом круглого железа, конец которого погружается в штейн (фиг. 35). Он растворяется в этом последнем и лом подколачивают, погружая его все дальше и дальше в штейн. Таким образом, отверстие получает правильную форму и направление. Когда лом будет об'еден до внутренней стенки летки, его ударом балды выбивают внаружу и из отверстия появляется фонтан штейна.

Инженер Суржицкий пытался ввести такой способ работы на мартеновских печах, но не очень



Фиг. 34.

удачно. Здесь нужна еще большая сноровка рабочего персонала, ибо вся глина из летки должна быть выдавлена в ванну и замещена магнезитом, который должен завариться в кристаллический сросток, что конечно невозможно.



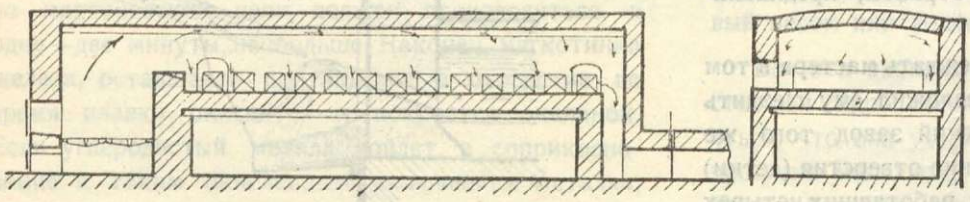
Фиг. 35.

Если бы такая работа удалась бы в мартеновских печах, это было бы весьма ценное приобретение. Уход за подом свелся бы к нулю.

ГЛАВА VII.

Общая форма рабочего пространства нагревательных печей.

Рабочее пространство печей делится на две части: а) под, на котором расположены нагреваемые предметы и b) подсводовое пространство. Обыкновенно техники смотрят на подсводовое пространство, как на необходимое зло: для удобства посадки нужно иметь подсводовое пространство несколько выше, чем садимый предмет; ну так и делают! Своду дают некоторую стрелу и вы-



Фиг. 36.

черчивают рабочее пространство. Чем ниже свод, чем ближе пламя к нагреваемому предмету, тем более доволен такой строитель печи.

Эти принципы построения совершенно ложны, ибо совершенно не учитывают химической роли свода.

Раскаленные стенки свода есть необходимое обеспечение быстроты реакции горения взрывчатой смеси газа и воздуха при небольшом избытке воздуха. Введение в пламя холодных предметов затягивает реакцию горения, которая в этих случаях идет с надлежащей скоростью только при громадном избытке воздуха, весьма же часто идет не полно, выделяя копоть, проходя печь с незаконченными реакциями горения окиси углерода и водорода в избытке кислорода.

Плохая работа печей в большинстве случаев происходит вследствие непонимания строителей основ правильного проектирования рабочего пространства.

Для выяснения их возьмем идеально простую печь (фиг. 36). Топка с простыми колосниками. Свод и под—горизонтальны и совершенно прямые. Дым берется с пода печи.

Схема распределения пламени в этой печи будет такова.

Топочные газы, как легкая жидкость, войдут в рабочее пространство и потекут вдоль свода, как по руслу до задней стенки печи, где остановятся. Лежащие на поду предметы начнут нагреваться за счет горячих газов, которые остынут и займут положение вдоль всего пода. У дымового пролета эти тяжелые печные газы найдут возможность упасть вниз и уйти в дымовую трубу. Таким образом, установится такое течение: вдоль свода горячего пламени, вдоль пода отработавших печных газов; в полости рабочего пространства вертикальные струйки остывающих газов вниз.

При коротких печах температуры этих двух слоев почти одинаковы; пламя, двигаясь вдоль свода, заканчивает свои реакции,—нагревается, или стынет, вследствие лучеиспускания, а в общем почти одной температуры. В очень длинных печах хвост пламени гораздо холоднее головы, ибо реакции успевают закончиться, а лучеиспускание остается. Что касается потока по поду, то в длинных печах, он тоже холоднее у дымового пролета и горячее у порога.

Какое поперечное сечение должно быть дано печи, чтобы она правильно работала, т.-е. печные газы состояли бы только из CO_2, H_2O, N_2, без копоти CO и H_2, и имели бы низкую температуру?

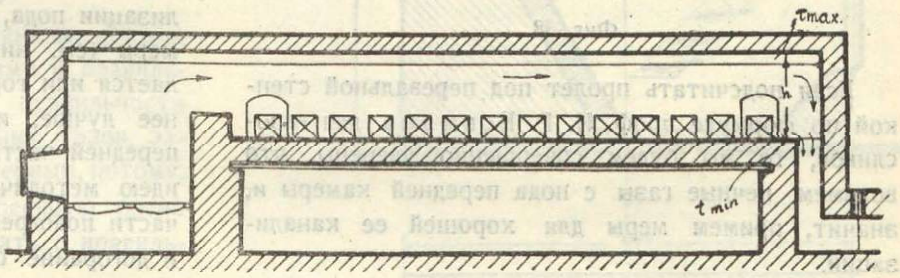
Очевидно, важнейшим условием правильной работы печи будет такая высота свода над холодными посаженными в печь предметами, чтобы реакция горения закончилась бы в печи при наименьшем избытке воздуха и настолько быстро, чтобы пламя дало бы надлежащий пирометрический эффект. Руководствуясь этими соображениями, я стал делать печи очень высокими. Ниже 1 метра я пламенных печей, обыкновенно, не делаю, в отжигательных же печах дохожу до 2-х и более метров и кроме пользы от такой необычной высоты печей до сих пор ничего не видел. Во всяком случае, если пламя мутно, копотливо, то увеличение высоты свода над подом, т.-е., как бы увеличение сожигательной камеры печи всегда улучшает горение и не отражается на расходе топлива.

Теперь скажем несколько слов о подовом и лещадном потоке в печах. Расположенные на поду для нагревания предметы очень затрудняют движение остывших печных газов на поду. Собственно говоря, для движения холодных газов остаются только промежутки между нагреваемыми слитками и боковыми стенками печи. Очень часто строители делают печь только немного шире предметов в ней нагреваемых. Например, печи для нагрева слитков делаются при длине слитка в 1,2 м всего 1,6 м ширины. Таким образом, для прохода остывших печных газов остается по 200 мм на сторону. При такой узкости боковых проходов, канализирующих под печи, сопротивление их проходу остывших газов оказывается так велико, что мы наблюдаем в длинных методических печах для нагрева слитков весьма интересный прорыв пламени в дымовые пролеты (фиг. 37).

Сопротивление слитков очищению пода от холодных газов больше, чем сопротивление хвостов пламени, которое нужно преодолеть, чтобы им опуститься в дымовые пролеты и пламя в буквальном смысле прорывается в них. Этот прорыв пламени бывает и в кольцовых печах для обжига красного кирпича и извести, и средство бороться с ним одно: надо уменьшать сопротивление путей канализации пода. В данном случае надо: сделать печь шире, или можно сделать специальные подовые каналы, или сделать канализацию пода отверстиями (о чем см. ниже), но не следует удлинять печь. В этом случае, сопротивление для подового потока увеличивается, что только облегчает прорыв печных газов из-под свода в дымовой пролет печи.

При кольцевых печах против прорыва пламени существует одно средство: это выкладка широких подовых каналов из кирпича; однако, при этом утилизация теплоты обожженного кирпича уменьшается, а кирпич нижних рядов трескается от резкого остуживания холодным воздухом, о чем см. критику этих печей в гидравлической теории (часть II).

Вопрос о канализации пода рабочего пространства будет рассмотрен ниже, а теперь обратимся к вопросу, как сосредоточить максимальный жар печи в ее передней части или, наоборот, как достигнуть равномерного распространения тепла вдоль всей печи.

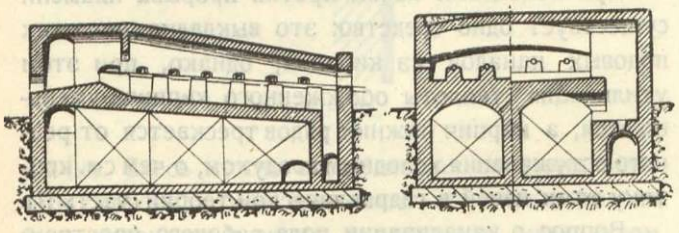


Фиг. 37.

Мы уже видели, что пламя, выйдя из топки, распространяется по горизонтальному своду, как вода разливается по столу, т.-е. тонким слоем во всю длину свода. Если свод восстающий, то оно собирается в дальнем конце печи и т. о. легко достигнуть совершенно равномерной температуры даже в очень длинных печах. Если сделать свод понурый, то пламя останавливается в передней части печи, а затем спускается горизонтальными слоями к поду и дымовому пролету. Практика железного дела требует при нагревании железных предметов такой последовательности: нагрев слитка или круглого изделия должен итти медленно и осторожно до критических точек (до 800°), дальнейший нагрев до 1300°C может вестись очень быстро. Поэтому печи железного производства должны иметь камеру высокой температуры не выше температуры плавления окалины (1350°) и подогревательную камеру с медленным методическим подогревом слитков до 800°.

Чтобы удовлетворить такому заданию, я предложил делить рабочее пространство печи на две части «перевальной стенкой»[1]).

На фиг. 38 как раз показана такая перевальная стенка. Назначение ее: 1) остановить распространение пламени вдоль всего свода печи и сосредоточить горение в передней камере печи; 2) дать возможность печным газам, находящимся на поду передней камеры, свободно удалиться под перевальной стенкой из передней камеры в подогревательную камеру.



Фиг. 38.

Если подсчитать пролет под перевальной стенкой по формуле проф. И. Г. Есьмана для газосливов, то мы будем совершенно уверены, что возьмем печные газы с пода передней камеры и, значит, примем меры для хорошей ее канализации.

Мои товарищи, когда я первоначально предлагал устроить эту перевальную стенку, встретили ее с большим недоверием. Польза ее не усвоивалась, прочность же этой стенки вызывала сомнения. Но действительность быстро уверила их, что перевальная стенка оказывает незаменимые услуги в печном деле и я начал очень часто встречать в проектах моих друзей и учеников эти стенки. Что касается прочности этой стенки, то мои доводы, что нет никаких особых причин этой стенке гореть, оказались справедливыми. Кладка этой стенки садится только в том случае, когда она сложена из плохо обожженного шамотового кирпича. Такой кирпич при сильном обжиге уменьшается в об'еме и, ясное дело, что стенка из такого кирпича теряет свою устойчивость. В последние годы перевальная стенка проникла за границу и применяется в ванных стеклоплавильных печах Англии.

Подогревательная камера, куда поступают печные газы, отработавшие в камере высокой температуры, делается: 1) с горизонтальным или восстающим подом в том случае, когда перекатка слитков или снарядов ручная или 2) с понурым подом, когда передвижение производится толкателем. Для канализации пода, в этом случае, принимаются особые меры (см. ниже). Что касается свода, то он делается или горизонтальным или понурым; последнее лучше, ибо тогда жар сосредоточивается в передней части камеры, что лучше осуществляет идею методического подогрева. Здесь в передней части подогревательной камеры может произойти и догорание составных частей пламени, если это не успело осуществиться в камере высокой температуры. К этому надо заметить, что форма свода и высота свода над подом подогревательной камеры особого значения не имеют.

ГЛАВА VIII.

Под нагревательных печей.

Под нагревательных печей.

При нагреве слитков поверхность их окисляется и покрывается слоем окалины. Если пламя нагревательной печи содержит много кислорода, то слой окалины делается настолько толстым, что отваливается при кантовке и падает на под. Если под кварцевый, то окалина дает с ним жидкий сварочный шлак, который стараются поскорей удалить с пода, для чего дают поду уклон к отверстию, через которое сварочный шлак тоненькой струйкой стекает в подставленную тележку.

Удаление сварочного шлака с пода необходимо по следующим причинам:

1) В лужице сварочного шлака на поду железо слитка растворяется и слиток об'едается, при чем могут быть обнажены поверхностные пузыри, результатом чего является пленоватое железо.

2) При посадке смоченных дождем слитков или слитков во льду, на «мокрую» от сварочного шлака подины может произойти взрыв с печальным для рабочих последствиями.

3) Подача выпачканной в сварочном шлаке заготовки или слитка под молот, пресс или прокатный стан сопровождается потерей времени для сметания с него приставшего сварочного шлака; работа тяжелая и излишняя.

Есть возможность совершенно избежать образования сварочного шлака; это сделать под из материала, с которым окалина не дает сварочного

---

[1]) Слово, заимствованное из практики плотин.

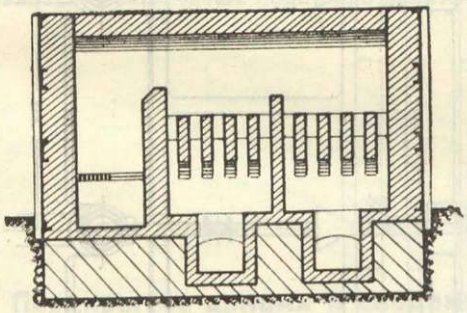
шлака, таковы: хромистый железняк, магнезит и тальк. Дешевле всех и удобнее всего для этой цели тальк. На Урале известны обширные месторождения талькового камня, но, к сожалению, до сих пор этот материал почти совершенно не употребляется на заводах.

На тальковой подине отваливавшаяся окалина остается до ближайшего праздника, когда приходится стравливать и сбивать с пода гору накопившейся окалины. Травят подину обыкновенно кварцевым песком.

Если под сделан из шамотного кирпича, то под влиянием сварочного шлака, он может начать плавиться, размягчаться и его даже может проесть. Поэтому под нагревательных для железа печей основывают на чугунных подовых досках. Употребляя на под тальковый камень, проедания пода можно не опасаться и непосредственно под подом устраивать регенераторы и рекуператоры.

Канализация пода.

Пламенная печь, как всякий организм, должна правильно питаться топочными газами и правильно канализироваться. Нарушение правильности канализации, застой остывших печных газов, замедляет нагрев и делает его неравномерным, потому, если мы стремимся создать печь греющую ровно и быстро, мы должны хорошо подумать о правильной канализации пода.



Фиг. 39.

Мерами для усиления канализации пода служат:

a) Устройство понурого пода,

b) Увеличение ширины печи,

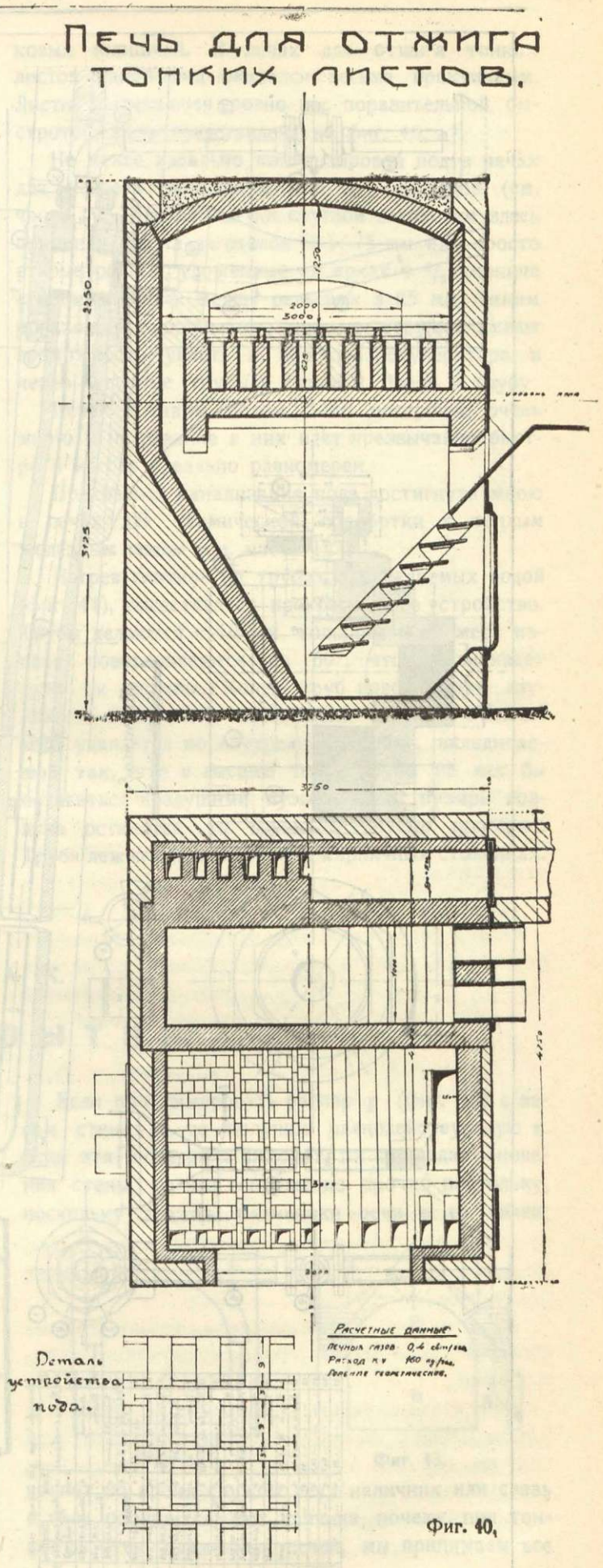
c) Устройство вдоль всего пода у стен печи дымовых отверстий,

d) Устройство решетчатого пода,

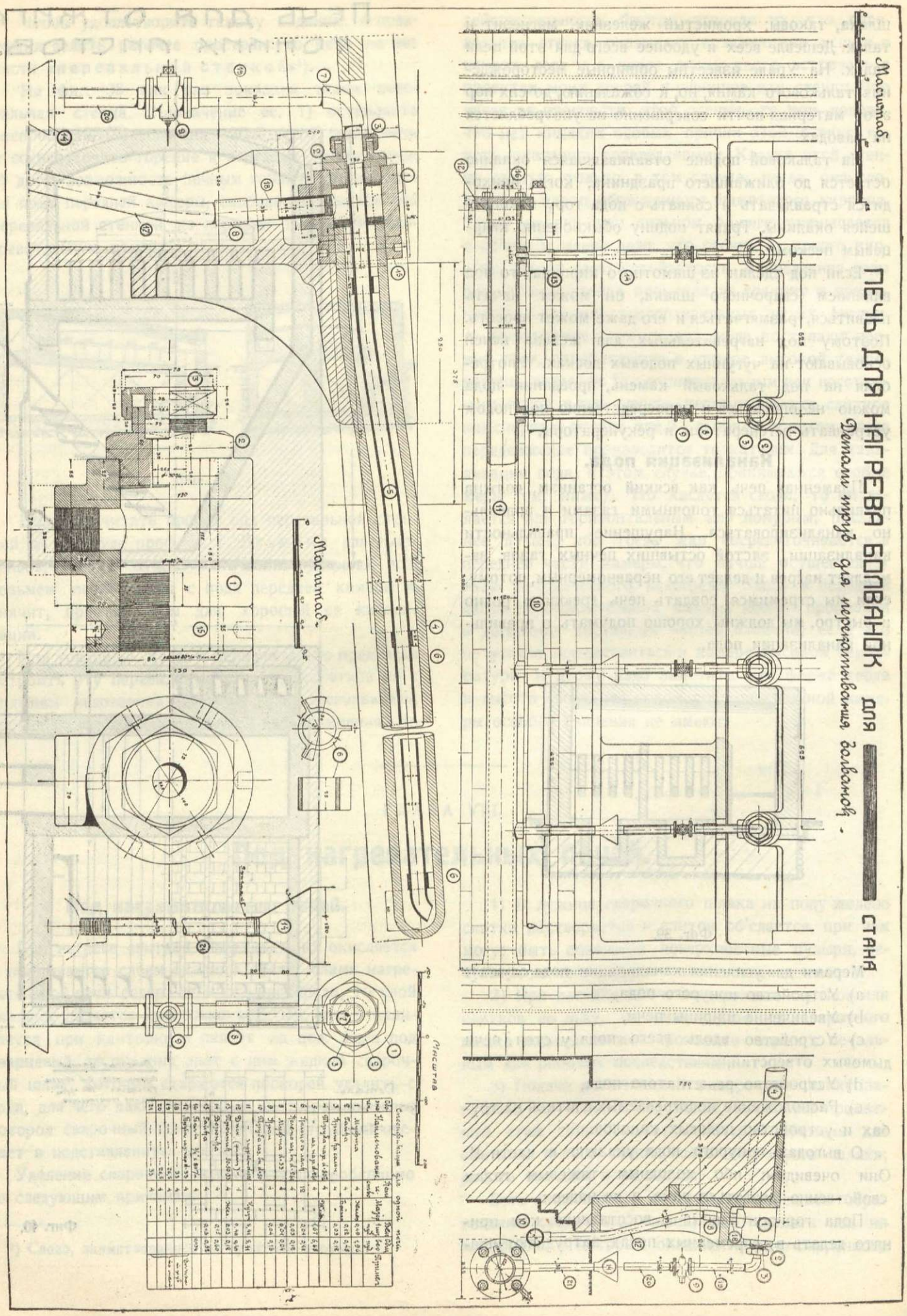
e) Расположение подогреваемых слитков на трубах и устройство подовых каналов.

О выгодах понурого пода указано в части II. Они очевидны; ибо холодным тяжелым газам свойственно двигаться вниз, а не наверх.

Пода горизонтальные и восстающие, как принято делать в современных печах, затрудняют пра-



Фиг. 40.


ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА БОЛВАНОК ДЛЯ [redacted] СТАНА
Детали труб для перекатывания болванок.
Масштаб.
Масштаб.
Масштаба

Фиг. 41.

вильную канализацию пода, но облегчают ручную кантовку слитков. Исключение составляют так-называемые «новые печи Сименса», где восстающий под способствует хорошей канализации и легкой кантовке. В самом деле, в новых печах Сименса поток печных газов делится на 2 ветви, из которых одна идет на подогрев слитков до 800°С, а другая—на подогрев воздуха и вопрос о канализации пода разрешается идеально. Остывшие газы камеры высокой температуры направляются вниз в регенератор, камеры низкой температуры в дымовые пролеты (см. печь Златоустовского завода, часть IV).

Об увеличении ширины печи в интересах канализации сказано выше, но при методических печах для нагрева слитков уширение печи невыгодно, ибо затрудняет кантовку слитков в ручную; поэтому по обоим сторонам слитка оставляется промежуток не более 300 миллиметров ширины.

Канализация пода может быть улучшена устройством дымовых отверстий вдоль всего пода. Идеалом такой канализации пода является сделанный мною проект печи для Алапаевского завода (см. часть IV), где остывшие печные газы попадают прямо из рабочего пространства в чугунные трубы рекуператора. Устройство решечатого пода в печах для нагрева шрапнельных заготовок (фиг. 39) оказалось не практичным: решетка, сделанная из огнеупорного кирпича быстро с'едается окалиной и засаривается. Решетчатые пода надо делать из тальковых кирпичей. В печах для отжига тонких листов такой под оказался весьма практичным. Листы нагреваются ровно и с поразительной быстротой. Печь представлена на фиг. 40.

Не менее идеально канализирован под в печах для нагрева заготовок для 6″ снарядов (см. часть IV). Для перекатки круглой заготовки здесь применен под из заготовок 75 × 75 мм или просто старые рельсы, уложенные на арках в $^1/_2$ кирпича с промежутками между рельсами в 25 мм. Таким образом, все остывшие тяжелые струйки имеют возможность упасть в полость рекуператора и через чугунные трубы в дымовой боров и трубу.

Печей с таким подом было построено очень много и нагревание в них идет чрезвычайно быстро и нагрев идеально равномерен.

Прекрасная канализация пода достигнута мною в печах для термической обработки с теплым железным подом (см. часть IV).

Нагрев слитков на трубах, охлаждаемых водой (фиг. 41), представляет прекраснейшее устройство. Трубы делаются в 10 мм толщины и по мере износа поворачиваются на 60°, что увеличивает срок их службы. Конец труб надо делать глухим и заваривать автогенной сваркой. Теплая вода удаляется по внутренней трубке, вкладываемой так, что в высшей точке трубы не мог бы оставаться воздушный пузырь. Если пузырь воздуха останется, то труба неминуемо прогорит. Труба лежит обыкновенно на кирпичных столбиках.

ГЛАВА IX.

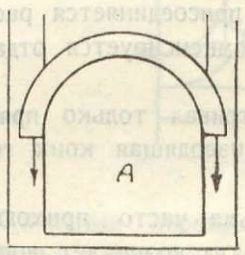
Перекрытия.

Перекрытие арками и сводами.

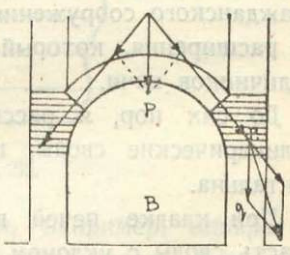
При проектировании печей безусловной симпатией конструкторов пользуется полуциркульная арка, не дающая распора. Иногда, впрочем, эта арка устраивается там, где она безусловно неудобна. Например, фиг. 42 представляет арку между двумя вертикальными стенами. Если сложить ее по типу фиг. 42, что обыкновенно делается, то стены выходят совершенно не устойчивыми. Арка не дает распора, но стены неуклюже лепятся около арки.

Эта конструкция, конечно, должна быть заменена конструкцией фиг. 43, где арка дает распор, но стена сохраняет свою строительную прочность. Но конструкция фиг. 43 делается единственно возможной, когда толщина стены — равна толщине арки (фиг. 44).

Если просуммировать распор p (фиг. 43) с весом стены q, то получим равнодействующую r. Если эта последняя выходит из площади основания стены, то все сооружение прочно постольку, поскольку держат наличники печи и ее связи;



Фиг. 42.



Фиг. 43.

лопнет во время службы печи наличник или связь и свод обрушится. Вот причина, почему при тонкости стен пламенных печей, мы принимаем все

меры для уменьшения нагрузки сводов и замены пологих арок полуциркульными сводами. Но иногда сделать полуциркульный свод не позволяет место, тогда, например, для перекрытия регенераторов, иногда применяют коробовые свода (фиг. 45), тоже не дающие распора, пока они не нагрелись. При высокой температуре всякий свод дает распор, уничтожаемый сопротивлением обставных досок, наличников и связей.

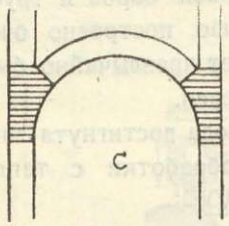
Пологие своды дают распор тем больший, чем положе арка. Если p (фиг. 46) есть нагрузка свода, то горизонтальный распор R будет равен

$$R = k \cos\frac{\alpha}{2}$$

где

$$k = \frac{P}{2 \sin\frac{\alpha}{2}}$$

$$R = \frac{P}{2} \operatorname{cotg}\frac{\alpha}{2}$$



Фиг. 44.

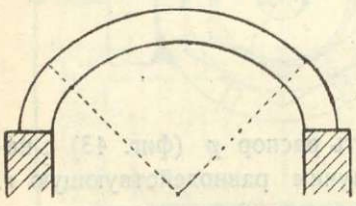
Обыкновенно каменщики задаются под'емом арки, т.-е. отношением стрелки дуги к ее хорде равным $\frac{1}{12}$ $\frac{1}{10}$ $\frac{1}{8}$ $\frac{1}{7,5}$ $\frac{1}{6}$ $\frac{1}{4}$, что соответствует углам:

$\alpha =$ 38 45 56 60 74 106°

Горизонтальный распор, порождаемый вертикальной нагрузкой свода равной единице будет соответственно:

$R =$ 1,45 1,20 0,94 0,87 0,66 0,38.

Распор полуциркульного или коробового сводов равен нулю. Поэтому при постройке печей делают по возможности арки большей крутизны. Боровки перекрываются обыкновенно сводами с углом в 60°, при котором радиус равен пролету.

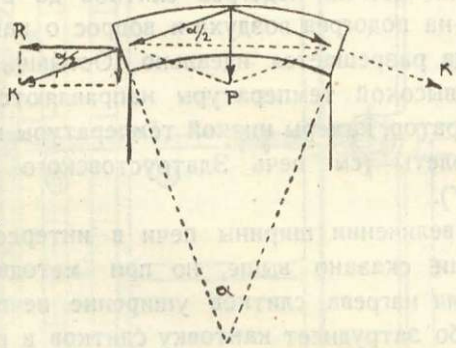


Фиг. 45.

При нагревании свода к распору свода, как гражданского сооружения, присоединяется распор от расширения, который компенсируется отдачей наличников печи.

До сих пор, я рассматривал только прямые цилиндрические своды, производящая коих горизонтальна.

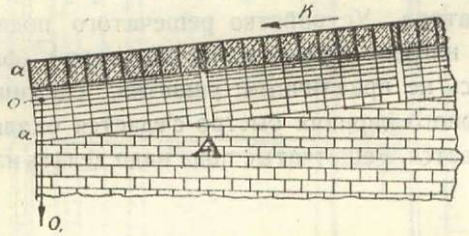
При кладке печей весьма часто приходится класть своды с уклоном и тут возникает вопрос: как их класть? Может быть две конструкции: конструкция A (фиг. 47) с пятами, сохраняющими уклон производящей свода и конструкция B, состоящая из ряда прямых арок, расположенных одна ниже другой (фиг. 48), что дает возможность косого свода. Несомненно, что все преимущества прочности и устойчивости на стороне последней конструкции, но кладка пят такого свода довольно затруднительна: для каждой арки надо тесать свои пяты, поэтому каменщики избегают этой



Фиг. 46.

конструкции и прибегают при малых уклонах и для арок небольшого пролета к конструкции фиг. 47.

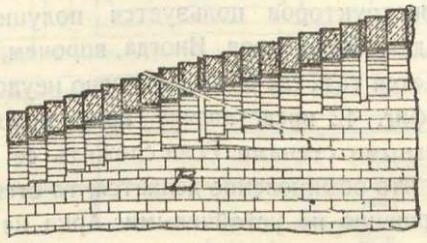
Для руководства, когда следует класть своды по типу A и B, может служить следующее построение. Для концевой арки aa ищется центр тяжести O и



Фиг. 47.

из него проводится отвесная линия OO_1. Эта отвесная линия не должна выходить за пяты арки aa.

При нагревании расширение кирпича дает усилие k, способствующее обрушению арки aa. Это надо учесть и между арками вставлять деревянные или картонные прокладки, дающие возможность кирпичу расширяться без сдвига арок вниз.

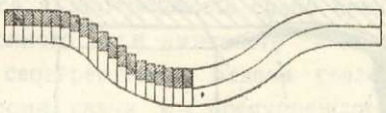


Фиг. 48.

Между типами фиг. 47 и 48 весьма часто каменщики делают компромиссную конструкцию, а именно: пяты делают по типу фиг. 47, а арку кладут по типу фиг. 48. Неудобство этой конструкции заключается в том, что из первых кир-

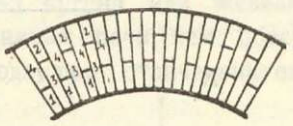
пичей, прилегающих к пятам приходится вытесывать косой клин, дающий слагающую облегчающую сползание арки вдоль пят.

Печи с вогнутыми сводами делаются из прямых арок (фиг. 49).

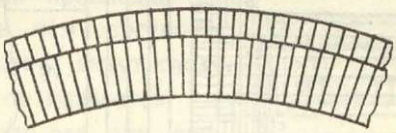


Фиг. 49

При сводах большого пролета арки делают в $1^1/_2$ кирпича. Возникает вопрос, как их класть—в перевязку или без перевязки? Кладка в перевязку чрезвычайно затруднительна, ибо требует большой тески или четыре номера специально клинчатого кирпича (фиг. 50). Поэтому обыкновенно кладут арки или из большемерного ординарного кирпича, или из двух арок без перевязки (фиг. 51). При нагревании последней конструкции свода, нижний и верхний своды поднимаются не одинаково, нижний сильней верхнего. Происходит раскрытие швов верхнего свода и между кирпичами получается щель.

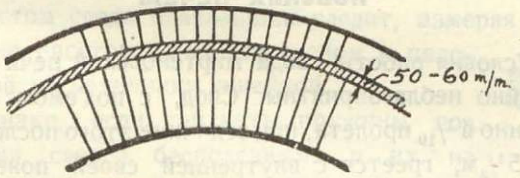


Фиг. 50.



Фиг. 51.

В кольцевых печах эта щель доставляет много неприятностей: через шуровочные отверстия в своде в нее засасывается воздух, студящий кирпич во время обжига.

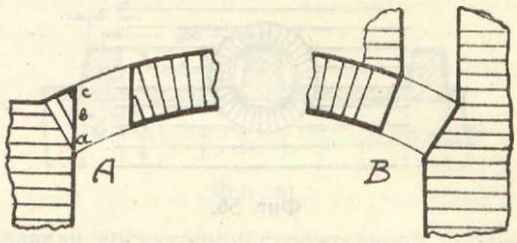


Фиг. 52.

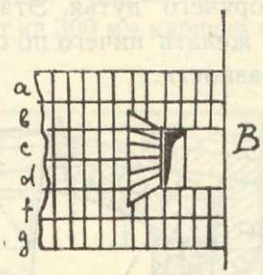
Из этого затруднения выходят, делая между сводами смазку в 50—60 мм толщины (фиг. 52). При разогреве печи нижний свод, поднимаясь кверху, сдавливает эту мягкую подушку тем легче, что глина при высыхании и дальнейшем обжиге дает усадку. Но это компромиссное решение вопроса. Вопрос о прочности и герметичности сводов, нагреваемых снизу, решается радикальным применением приостренного кирпича. (см. стр. 20 фиг. 19).

Отверстия в сводах.

В сводах и в пятах очень часто делаются отверстия. На чертежах часто мы видим конструкцию *A* (фиг. 53). Совершенно очевидно, что она чрезвычайно трудна для осуществления и непрочна, ибо части кирпичей *a*, *b* и *c* нельзя удержать в своде. Возможна конструкция *B*, но она имеет крупный недостаток, что на арки *b* и *f* с врубленными в них пятами опирается часть свода, соответствующая арка *b*, *c*, *d* и *f*. Разгар одной из этих ослабленных арок грозит падением своду.

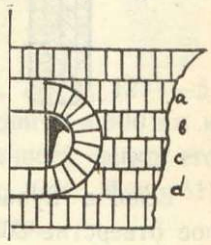


Фиг. 53.



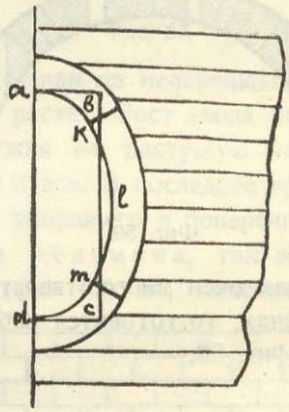
Безусловно прочной конструкцией является конструкция фиг. 54: пяты арок *a*, *b*, *c* и *d* опираются на полуциркульную арочку в $^1/_2$ кирпича, окружающую отверстие.

Большие отверстия прямоугольной формы можно ограничивать коробовой аркой (фиг. 55). Прямоугольник *abcd* преобразуется в полуовал *aklmd*.



Фиг. 54.

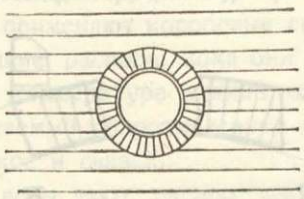
Отверстиям в своде придают обыкновенно круглую или овальную форму и выкладывают их по типу фиг. 56.



Фиг. 55.

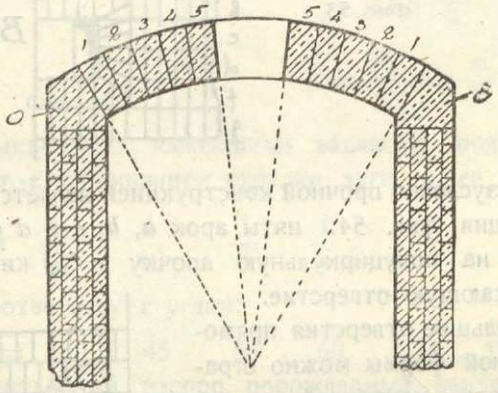
Купольные перекрытия, например, аппаратов Каупера основываются на цилиндрическом барабане, сложенном из четырех оболочек в $^1/_2$ кирпича, поставленного стоя (см. выше). На них кладется кольцо подпятного кирпича *00* (фиг. 57). На пяты кладется купол, состоящий из колец 1—1, 2—2,

3—3, 4—4 и т. д. Каждое кольцо запирается замком и не может упасть, хотя бы купол остался и незамкнутым в середине. В аппаратах Моора



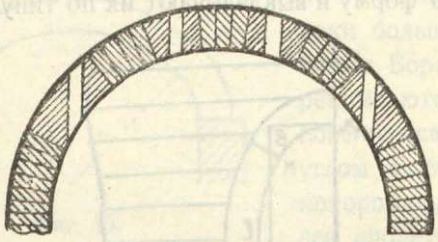
Фиг. 56.

(Moor'a) купол остается незамкнутым и в оставленное круглое отверстие открывается патрубок горячего дутья. Эта конструкция не оставляет желать ничего по своей прочности и целесообразности.



Фиг. 57.

Если в куполе пришлось бы сделать круглое отверстие сбоку, то его пришлось бы сделать по типу фиг. 56.



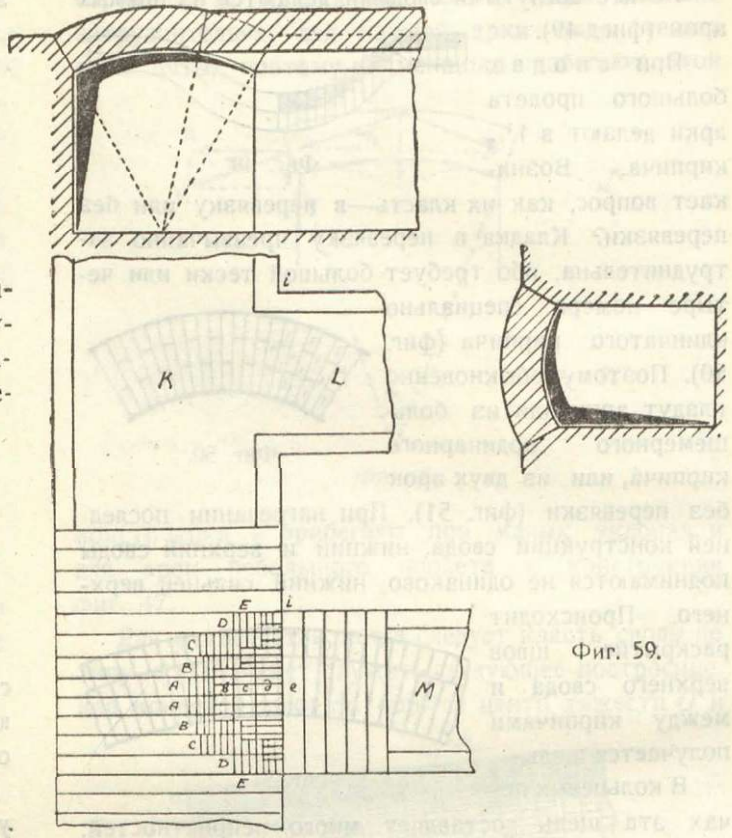
Фиг. 58.

Если в сводах очен много отверстий, например в кольцевых печах, то готовится набор специальных кирпичей фиг. 58.

Пересечение сводов.

Пересечение сводов особенно часто при кладке боровков. Если пяты сводов перекрывающих борова расположены на одной высоте, то применяется кладка чепцом (фиг. 59).

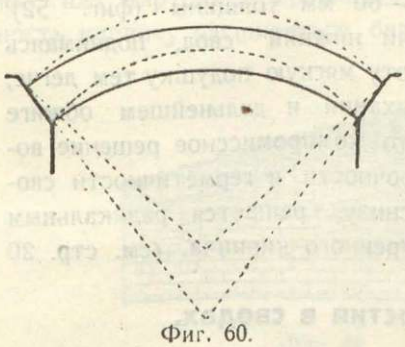
Последовательность кладки чепца такова. Свода перекрывающие борова K и M заканчивается арками E и e. Кладется арка D, на нее опирается d; на d опирается C, на C — c; B опирается на c, b пирается на B, A и A опираются на b.



Фиг. 59.

Перекрытия рабочих пространств мартеновских печей.

Условия работы свода мартеновской печи чрезвычайно неблагоприятны. Свод, с под'емом обыкновенно в $^1/_{10}$ пролета, при величине этого последнего до $5^1/_2$м, греется с внутренней своей поверхности, при чем каждый кирпич расширяется неравномерно и форма клина, ограниченного радиусами, которую имеет каждый кирпич, нарушается. Внутренняя поверхность свода увеличивается, свод растет и этот рост сопровождается раскрытием швов с наружи или раздавливанием расширившегося раскаленного кирпича у внутренней поверхности свода. (фиг. 60).



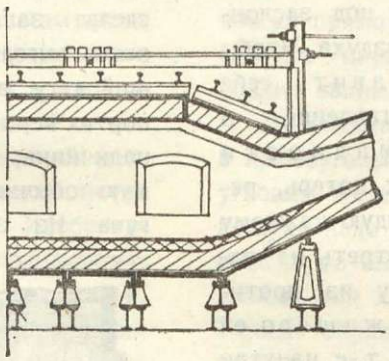
Фиг. 60.

Раскрывшиеся снаружи швы необходимо засыпать толченым кварцем и тем предупреждать неблагоприятное суммирование раскрывшихся швов, соединенное с прозисанием части свода. Такой

свод (см. стр. 20, фиг. 18) безнадежен, ибо удержать провисшую часть свода бывает невозможно и свод обрушивается.

Лучшими предохранительными мерами против роста свода являются: а) употребление слабо прессованного приостренного тридимитового динаса (см. фиг. 19), в) своевременная отдача связей свода; отдавая во-время связи, мы предупреждаем рост свода.

Отдача связей дело весьма деликатное, ибо если очень ослабить связи, то можно уронить свод; поэтому лучшая конструкция свода будет тогда, когда пяты свода из чугуна или железа приклепаны прямо к наличникам печи, чем обеспечивается послушность свода при отдаче винтов связей (см. фиг. 23).



Гораздо хуже, когда свод опирается на вертикальные стенки печи, которые делают свод непослушным связям.

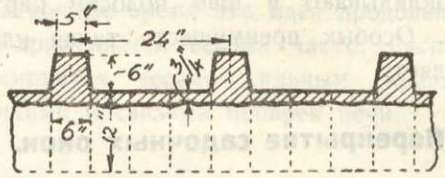
Под гайки связей принято подкладывать пружины или прокладки из мягкого дерева, при чем предполагается, что эти пружины дадут своду расшириться, когда он нагреется.

В действительности все эти приспособления не только бесполезны, но очень вредны. Связи должно отпускать по мере нагревания свода и вообще печи, от руки и поручать это дело опытному плавильщику. Когда печь разогрелась, то нет никакой нужды опускать или нажимать связи. За ростом свода плавильщик следит, измеряя постоянно расстояние между сводом и положенной на наличники линейкой.

Однако, если признать пружины под гайками связей бесполезными и их не устраивать, то нужно обеспечить одинаковую затяжку всех арочек свода. Надлежащая затяжка каждой арочки свода дается при вколачивании замковых кирпичей в каждой арочке. При отсутствии пружин мы можем затяжкой последующей арочки ослабить затяжку арочки предыдущей. Поэтому при кладке сводов мартеновских печей, соблюдается такое правило: весь свод складывается, но не затягивается замковыми кирпичами, которые только вложены на свое место узким концом своего клина. Когда свод готов, все замковые клинья получают по легкому удару деревянного токмака, затем по второму, по третьему и т. д.

Если в какой-нибудь арочке клин не лезет, то можно отдать связь около этой арочки, а лучше просто этот клин не доколачивать до места. Таким путем весь свод будет совершенно равномерно затянут и рост его будет совершенно равномерен.

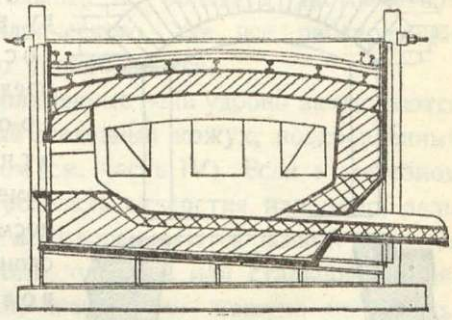
Толщина свода обыкновенно делается равной одному кирпичу—225 мм. Одно время была тенденция делать тонкие, лучше охлаждаемые воздухом, свода в $^1/_2$ кирпича толщиной. Но такие своды не



Фиг. 61.

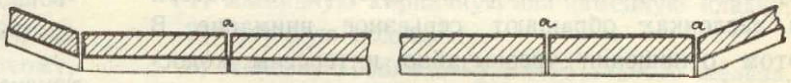
не обладали достаточной строительной прочностью и были оставлены.

При больших пролетах современных печей весьма часто своды кладут из 300 мм кирпича и даже



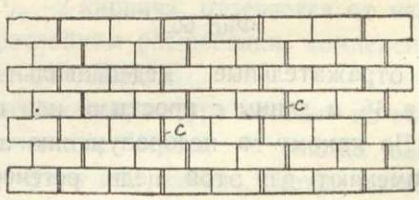
Фиг. 62.

450 мм. В «The Jron Age» 1915, 2 Dec. 1284—5, описан свод системы Ортà из кирпича в 300 мм и арок—в 450 мм, что дает возможность легко его ремонтировать. Но такой свод (см. фиг. 61) слишком тепл и быстро оплавляется.



Фиг. 63.

Если свод сделан из неперешедшего в тридимит динаса, то он растет. Рост свода стараются остановить, нагружая на растущую часть штыковой чугун, сотнями пудов. В последнее время борются с ростом свода, упирая его в поперечные балки. Так делает фирма Вельмана, так делают в Лысвенском зав. (фиг. 62), но, конечно, это палиативы.



Фиг. 64.

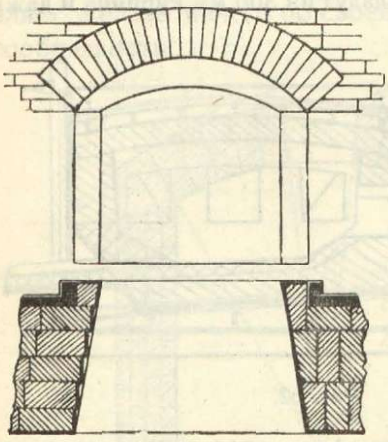
Чтобы компенсировать расширение кирпича вдоль свода между отдельными его частями прокладывают деревянные доски *aa* (фиг. 63). Доски

эти выгорают, а образовавшаяся щель сжимается при нагревании свода.

Сравнительно довольно редко своды делают в перевязку. При такой кладке щелей *аа* не делают, зато прокладывают в швы полоски картона *сс* (фиг. 64). Особых преимуществ такая кладка не представляет.

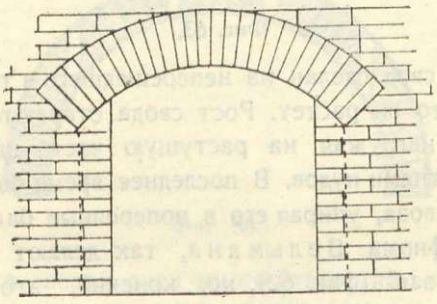
Перекрытие садочных окон.

Заслонки всяких металлургических печей представляют источники громадных потерь тепла на лучеиспускание и вследствие утраты печных газов в виде ореола над заслонкой и охлаждения пода струей засасываемого под заслонку воздуха. Чтобы составить себе представление о громадности этих потерь, рекомендую каждому посмотреть на заслонку из противолежащего ей окна, т.-е. изнутри печи. На белокалильном фоне раскаленной стенки мы увидим совершенно черный квадрат холодного окна и прикрывающей его заслонки.



Фиг. 65.

Когда печи идут горячо, то о заслонках мало думают. Когда печи идут холодно, то на потери в заслонках обращают серьезное внимание. В этом отношении чрезвычайно интересны колос-

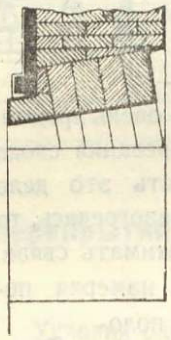


Фиг. 66.

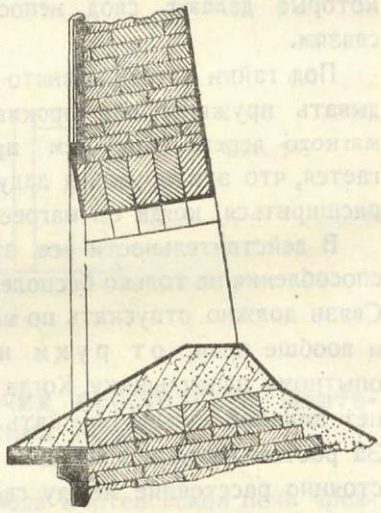
сальные отражательные медеплавильные печи Америки в 35 м длины с простыми или пылевыми топками. По какому-то недоразумению американцы не применяют для этой цели регенеративных печей, а работают на простых отражательных печах. Тут они экономят тепло, наглухо забивая заслонки песком.

Раз через заслонки теряется так много тепла, то выгодно делать окна, как можно меньше, но чтобы не стеснить доступ к поду, стенки окна сделать расширяющимися внутрь (фиг. 65). Арка при этом получается в виде части конической поверхности, класть которую очень затруднительно—нужно много притески кирпича.

Из этого затруднения выходят, делая прямую арку по наибольшему пролету. Спереди такое окно будет иметь очень некрасивый вид (фиг. 66). Но если окно прикрыто наличником, то с этим мирятся. При работах в мартеновских печах скрап-процессом, так перекрытые окна не годятся, ибо стесняют движение посадочной лопаты или лотка посадочной машины при окончании посадки вверх, в то время, когда на поду уже лежит груда скрапа. Кроме того при этой системе нельзя сделать защиту наличника из кирпича, что делать очень выгодно (фиг. 67). Ореол пламени, выделяющийся у верхней кромки окна, очень быстро портит верхнюю часть наличника, отливаемую обычно из чугуна. Из этого за-



Фиг. 67.



Фиг. 68.

труднения выходят, выставляя $^1/_2$ кирпича арки и стен, образующих огнеупорную бровь окна, предохраняющую его от разгара.

Особенно хорошо это удается при кладке стен с уклоном, как это показано на фиг. 68. Арка над садочным окном представляет во всяком случае самое слабое место в передней стенке мартеновской печи. Она нередко сгорает и должна быть заменена новой. Трудность этого ремонта заключается в том, чтобы не уронить пят свода мартеновской печи над окном. Нередко поэтому пятам свода придают форму арок, опирающихся на простенки и лежащих в плоскости свода.

Перекрытие регенераторов.

Особенно много хлопот представляло перекрытие регенераторов сводами, когда вся ванна опиралась на эти своды. Их делали тогда обыкновенно полуциркульными и пролет их не делался шире $2^1/_2 - 3$ м.

Новая конструкция мартеновских печей, располагая ванну на колонках, освободила свода регенераторов от нагрузки и дала возможность покрывать регенераторы очень пологими сводами, с под'емом почти столь же малым, как свод над рабочим пространством ($^1/_{10}$ пролета); вместе с тем явилась возможность увеличивать их пролет, не опасаясь за их прочность. Это дало возможность делать своды и вдоль и поперек печи, что значительно облегчило задачу устройства регенераторов большой емкости и облегчило устройство разумных пылеуловителей.

В настоящее время эта идея продольных перекрытий применяется весьма часто. Распор свода компенсируется весьма сильным креплением — наличниками и связями поперек печи.

ГЛАВА X.

Облицовка пламенных печей.

Кладка пламенных печей подвергается во время работы периодическим нагревам и охлаждениям. Результатом этого являются трещины в кладке, и она выходит из отвесного положения. Раз это так, то совершенно ясно, что единственной действительно прочной и разумной облицовкой печей является—клепанный железный кожух. Изобретателем клепанного железного кожуха, повидимому, является русский военный инженер Унтермарк, применивший его для печей домашнего отопления в средине XIX века. Круглые печи в железных кожухах до сих пор являются самыми прочными и лучшими печами. Теми же конструктивными качествами обладает и воздухонагревательный аппарат Каупера. В нем совершенно все, начиная с его цилиндрической формы, прикрытой куполом. И, действительно, прочность этих приборов поразительна. Аппараты Каупера проработали без ремонта в Нижней Салде с 1882 года по 1912 год. Они были переложены только потому, что их пожелали наростить. То же надо сказать о генераторах в клепанных кожухах. Вельман делает регенераторы мартеновской печи в кожухах из клепанного железа, и его клиенты не нахвалятся, как хороша эта конструкция. Наши унтермарковские железные комнатные печи являются лучшей рекомендацией железным кожухам. Действительно, кожух из тонкого кровельного железа придает удивительную прочность печи, сложенной часто в $^1/_4$ кирпича, тогда как кирпичные печи в $^1/_2$ и более кирпича разбиваются трещинами в первый год своей службы. Очень большой прочностью отличается выкладка кирпичом железных дымовых труб, которую смело можно делать в $^1/_4$ кирпича на всю высоту трубы. Я не знаю случая обрушения столь тонкой выкладки, несмотря на значительную высоту труб. К сожалению большинство печей имеют продолговатый или прямоугольный под и не могут быть заключены в кожух сферической формы. А кожух прямоугольный не обладает достоинством кожуха цилиндрического, где все распирающие усилия взаимно уничтожаются.

Маленькие пламенные печи удобно заключаются в прямоугольный железный кожух, подкрепленный угловым железом (см. часть IV). Если в железном кожухе надо проделать отверстия, например, лазы и окна, то они все оторачиваются рамкой углового железа или литой чугунной или стальной рамой. Таким образом, жесткость кожуха не уменьшается.

Среднее положение между двумя выше описанными конструкциями занимает кожух регенераторов Вельмана, очерченных коробовыми кривыми (фиг. 69), очень хорошо исполняющими свое назначение. Большая часть печей не имеет клепанных кожухов, а снаружи имеют:

1) массивную кирпичную или каменную кладку,

2) чугунную облицовку,

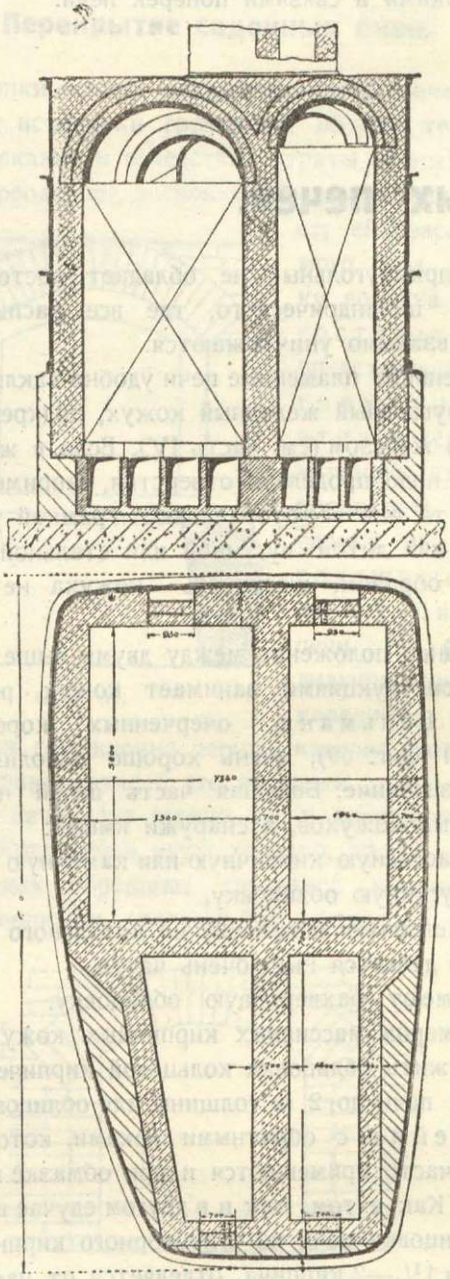
3) железную облицовку из котельного железа, или, что делается ныне очень часто,

4) имеют фахверковую облицовку.

Примером массивных кирпичных кожухов может служить облицовка кольцевой кирпичеобжигательной печи до 2 м толщины или облицовка печи Мендгейма с обратными арками, которые довольно часто применяются и при обмазке паровых котлов. Как в том, так и в другом случае внутренняя облицовка печи из огнеупорного кирпича, сделанная в $1^1/_2$—2 кирпича, отделяется от наружного кожуха прослойком расщебенки, компенсирующим расширение от теплоты.

Металлическая арматура состоит из обставных плит наличников, связей и иногда башмаков. Материал—чугун или железо, смотря по тому, что дешевле. Обыкновенно дешевле обходится железо, но на чугунно-плавильных заводах, где чугунное литье дешево, часто арматуру делают чугунной. Чугунная арматура устанавливается на чугунные башмаки *a* (фиг. 70) или крючья, закладываемые

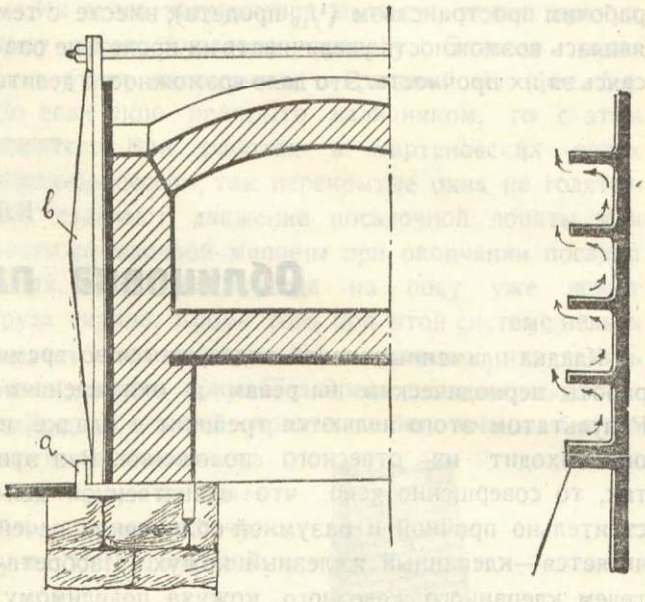
в кладку печи; затем становится чугунный наличник—*b*, соединяемый с таким же поставленным по другую сторону печи при помощи железной связи, отдаваемой гайками на концах. За наличники ставятся чугунные плиты, отлитые в форме досок, с необходимыми для печи отверстиями, окнами, лазами и т. п. Плиты отливаются для



Фиг. 69.

небольших печей в 20 мм, чаще 30 мм, редко 40—50 мм толщиной. Они часто усиливаются ребордами, при чем в их расположении надо следовать основному принципу никогда не делать горизонтальных выступов и реборд (фиг. 71), которые мешают правильному омыванию плиты воздушными конвекционными потоками.

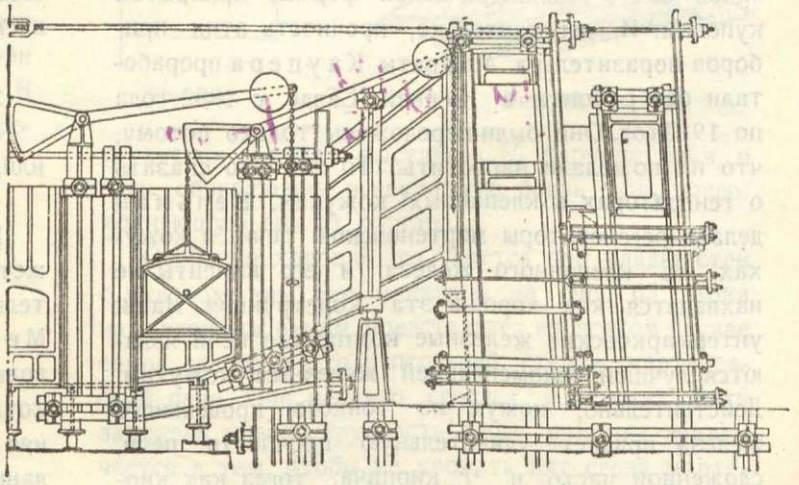
Та же ошибка делается и в арматуре голозок мартеновских печей. Горизонтальные реборды (фиг. 72) здесь совершенно непригодны. Они могут повлечь за собой преждевременный прогрев плиты. Напротив того вертикальные реборды способствуют конвенкционным потокам и сохраняют плиту холодной в самое критическое для нее время,



Фиг. 70. Фиг. 71.

когда за этой плитой остается несколько дюймов огнеупорной кладки.

Еще менее целесообразны наружные реборды на подовых плитах. Как уже было сказано выше (стр. 28) они сильно препятствуют охлаждению пода.



Фиг. 72.

Таким образом, при проектировании облицовки пламенных печей надо иметь всегда ввиду вопрос, насколько совершенно омываются облицовочные плиты струйками нагревающегося воздуха; надо устранять всякую возможность образования мешков горячего воздуха и затрудненного охлаждения гарнитуры воздухом. Незнание этого правила имеет нередко весьма серьезные последствия. Например: в 80 и 90 годах прошлого века боль-

шой заботой сталеваров были хлопоты о том чтобы плавка не проела под и не ушла из печи, Я помню одно свое посещение Колпинского завода, когда мой товарищ инженер указал на чрезвычайно полезное изобретение французских инженеров, состоящее в том, что подовые плиты мартеновской печи охлаждаются струйками пара из паропровода. Действительно, струйки пара охлаждали плиты и предупреждали прорыв металла через под печи; но расход пара был громаден. Около печи нельзя было разговаривать от рева пара; температура в помещении летом делалась невыносимой.

В современных печах никакого охлаждения подовых досок не делают и плавки не уходят. Почему? Достаточно посмотреть на чертежи печей того времени, чтобы ответить на этот вопрос.

Беру, из руководства того времени «Производство стали» С. Савинского (1894), чертеж печи Путиловского завода (Савинсий, стр. 170 и 185) и рассмотрю возможность охлаждения пода наружным воздухом.

Под печи основан на чугунных плитах (фиг. 73). Каждая плита имеет со всех четырех сторон закраины, т.-е. представляет готовый мешок горячего воздуха. Плиты стоят своими закраинами на поперечных рельсах. Поперечные рельсы на продольных, которые в свою очередь стояли на пяти кирпичных столбиках *вв*, выложенных на стенах регенераторов. Пространство под подом мартеновской печи сообщалось с атмосферой через маленькие отверстия между столбиками и через отверстия *с* в пороге, расположенное гораздо выше отверстий между столбиками. Через отверстия в порогах мог бы удаляться из-под пода горячий воздух, но доступ ему был прекращен горизонтальной перегородкой *дд*. Зачем? Это неведомо никому. Таким образом, горячий воздух из-под пода мог быть удален только через небольшую нижнюю часть этого окна. Из сказанного ясно, что в означенной конструкции было сделано все для того, чтобы раз плита нагрелась бы докрасна, она далее не могла бы остыть. И действительно, нагретые до красна подовые доски были явлением в то время нормальным. Раз плита нагрета докрасна, то прорыв стали неизбежен при первом серьезном срыве пода. Можно ли исправить эту конструкцию? Чрезвычайно просто. Для этого нужно:

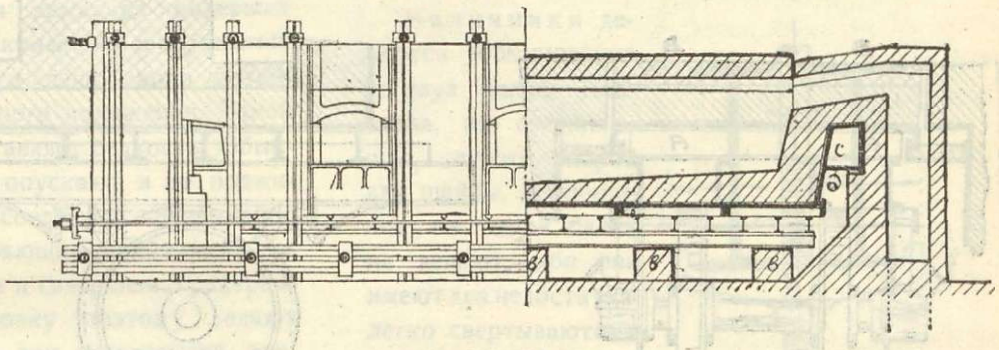
1) плиты с четырьмя ребордами выкинуть и сделать гладкие плиты,

2) вместо толстых пяти кирпичных столбиков, стесняющих приток холодного воздуха сделать чугунные тонкие подставки под рельсы, благодаря чему значительно уширятся отверстия для приема холодного воздуха,

3) выкинуть перегородки в порогах, и

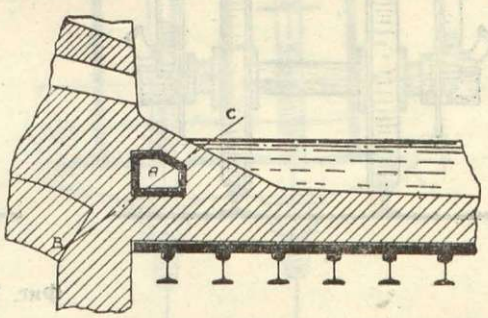
4) снабдить пороги вытяжными трубами из кровельного железа, чем усилится удаление нагревшегося воздуха.

Последнее устройство представляет из себя могущественное средство — усиление вентиляции подподового пространства. В моей личной практике



Фиг. 73.

был такой случай. В 12 тонной мартеновской печи В. Салдинского завода (фиг. 74) под был сделан из чугунных плит на рельсовых балках, для того, чтобы обеспечить печь от прорыва металла в регенераторы, в кладку пода закладывался чугунный порог *А*, назначение коего было студить под у пролетов и предупреждать прорыв металла по линии *ВС*. Нагревание докрасна этого порога было вечной заботой сталеваров, ибо вслед за его прогревом был прорыв металла в регенераторы, из



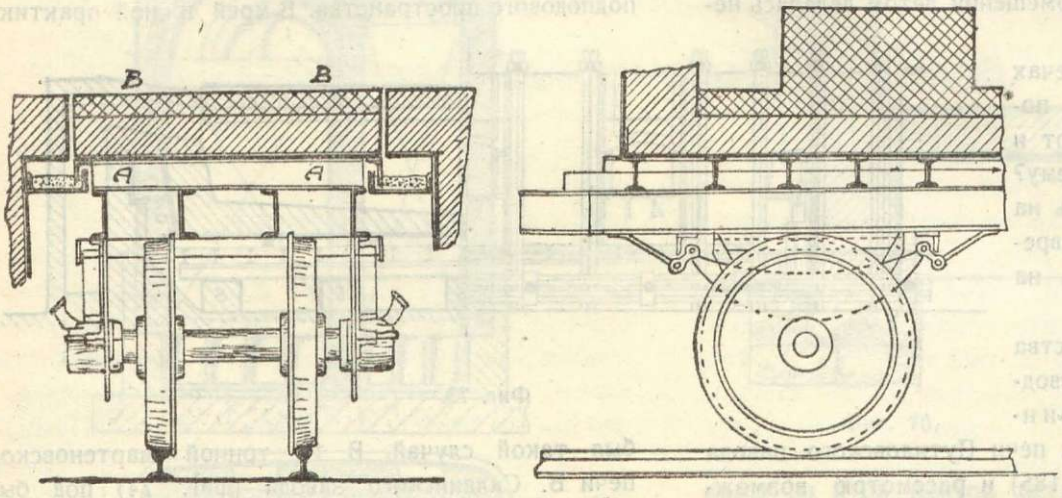
Фиг. 74.

которых доставали во время ремонтов сотни пудов стали. Ознакомившись с этой невзгодой, я сделал то, что делается обыкновенно в этих случаях. Один конец порога *А* оставил открытым, а другой соединил с вытяжной трубой из кровельного железа в 20 см в диаметре, около 5 — 6 м высотой, подвесив ее к стропилам фабрики. В пороге установился ток холодного воздуха тем более сильный, чем больше он нагревался. После уста-

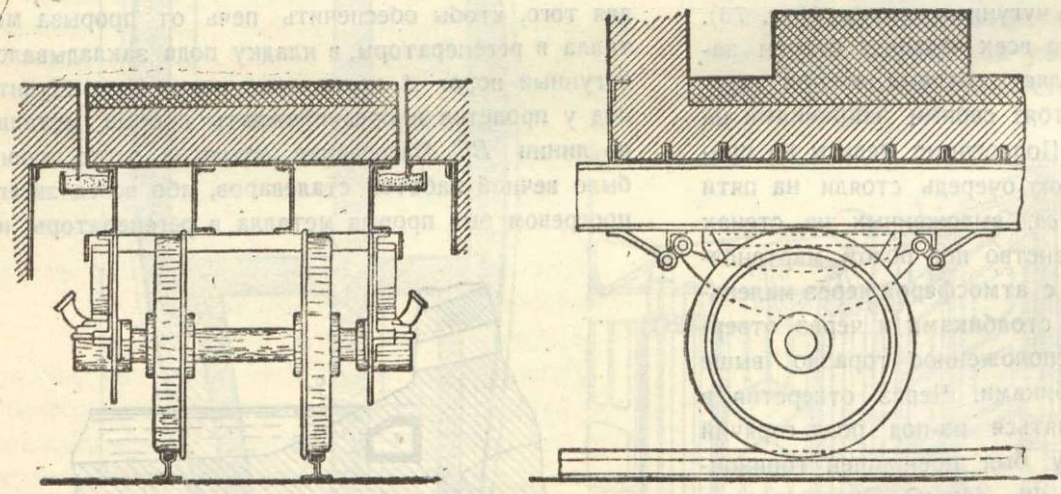
новки вытяжной трубы, разогревшегося порога мы больше не видели.

Устройство арматуры печей, хорошо омываемой воздухом, представляет задачу, над которой иногда приходится много работать. Надо избежать мешков горячего воздуха, а это не всегда удается.

Примером, как такие затруднения обходятся, может служить проектирование вагона для выдвижного пода пламенных печей. Обыкновенно вагон делают по типу фиг. 75. Однако, при этом воздух, нагретый балками *АА*, оказывается запертым в



Фиг. 75.



Фиг. 76.

мешке,—ему нет выхода. Чтобы обеспечить от прогрева корпус вагона, делается очень толстая выстилка *ВВ*, чем увеличивается его нагрузка. Я обошел это затруднение, спроектировав вагон по типу фиг. 76 (см. также ч. IV). Здесь балки превосходно студятся воздухом и потому в особенно толстой выстилке пода нет надобности.

Общее правило таково: рассматривая проект облицовки печи, надо вообразить струйки горячего воздуха, омывающие облицовку печи и проследить нет ли на их пути мешков теплого воздуха. Приемлема конструкция, хорошо омываемая воздухом, ибо только такая конструкция обеспечивает целость арматуры в случае повреждения внутренней огнеупорной футеровки печи. Например, при разгаре задней стенки мартеновской печи и уменьшения толщины ее до 7—10 см. продолжение кампании печи зависит от того, подгорят ли металлические плиты свода, перекрывающего рабочее пространство и обыкновенно связанные с наружной облицовкой, или не подгорят. Тут ошибка в направлении струй, омывающих облицовку, может иметь последствием сокращение кампании печи. Конечно, к арматуре печей с невысокой температурой,—каковы печи закалочные, отжигательные, медеплавильные и т. д., можно относиться менее строго, чем к печам с высокой температурой, например, мартеновским, где правильная проектировка облицовки — вопрос первостепенной важности.

Мы уже видели, что облицовка пламенных печей состоит из трех частей: 1) наличников, 2) связей и 3) облицовочных плит. Рассмотрим все эти части. Существенными частями, скрепляющими печь, — являются наличники и связи. Роль их — воспринять и уравновесить распор сводов в холодных печах и поддержать стены печи, когда они после многократных нагревов и остуживаний начнут трескаться и выходить из отвесного положения. Роль облицовочных плит менее существенна: они передают всей кладке стены сопротивление наличников и прикрывают трещины в стенах печи, чем делают их более герметичными и препятствуют засасыванию в полости печи наружного воздуха.

В старое время вся облицовка печей, не исключая связей, делалась чугунной. В настоящее время

чугунные наличники и связи—редкость. Наличники обыкновенно делаются из двутавровых или швелерных балок, реже старых рельс или угольников; связи из круглого железа.

Обыкновенно задают вопрос: из каких балок делать наличники для крепления боковых стен печей? На вопрос этот обоснованного ответа нет. Все, что можно сказать, делайте так, как принято, чтобы было красиво и не резало глаз.

Для холодной новой печи достаточно крепление из балок 125—150 мм высоты. Если своевременно отпускать связи при нагревании печи и поджимать при охлаждении, то такая арматура выдержит долгое время без особых искривлений и нарушений ее правильности, но стенки печи скоро потрескаются и выйдут из отвесного положения. Такой уход за связями печи представляет редкость. Обыкновенно связи во время не опускают и не поджимают и потому в связях создаются чрезвычайно сильные напряжения, изгибающие наличники, ломающие облицовочные плиты и совершенно растраивающие облицовку. Облицовку поэтому делают очень солидной. Стены печи, так скрепленной, трескаются меньше и дольше сохраняют отвесное положение. В общем, печь в солидной облицовке оказывается прочнее и поэтому принято делать облицевку очень прочной. Мартеновские печи скрепляются наличниками, состоящими из двух скрепленных между собой балок в 300 мм (фиг. 77). Печи для нагрева слитков имеют арматуру полегче. В общем высота балки равна примерно $^1/_{16}$ свободной высоты плиты. При большей высоте плит, их подхватывают по середине горизонтальными балками, о чем см. ниже. В строгом соответствии с размерами балок наличников,—должны быть связи, их соединяющие. На практике связи делаются нередко слишком толстыми. Чтобы установить правильное соотношение между балками и связями, мы можем руководствоваться такими соображениями: переход за предел упругости балок наличников должен быть переходом за предел упругости связей и прочная нагрузка на связь должна соответствовать прочной нагрузке на наличник. Если внутренний диаметр нарезки связи d_1 то соответствующая прочная нагрузка связи, как болта, будет;

$$Q = \frac{\pi d_1^{\,2}}{4} K_p \quad \ldots\ldots (1)$$

Наличник из двух балок, расчитанный как балка с равномерной нагрузкой, должен удовлетворять уравнению:

$$2\,Q = 8\,\frac{K_{из} \cdot W}{l}\,2, \quad \ldots\ldots (2)$$

но $l = 16h$, — где h высота балок наличника,

$K_p = K_{из} = 800$ кг/см².

Из (1) и (2) получим:

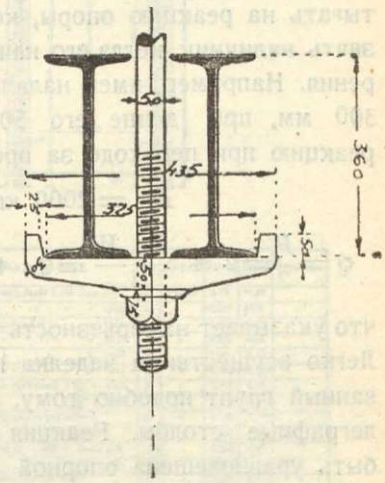
$$\frac{\pi d_1^{\,2}}{4} \cdot K_p = 8\,\frac{K_{из} \cdot W}{16 \cdot h}$$

$$d_1 = 0{,}8\sqrt{\frac{W}{h}}$$

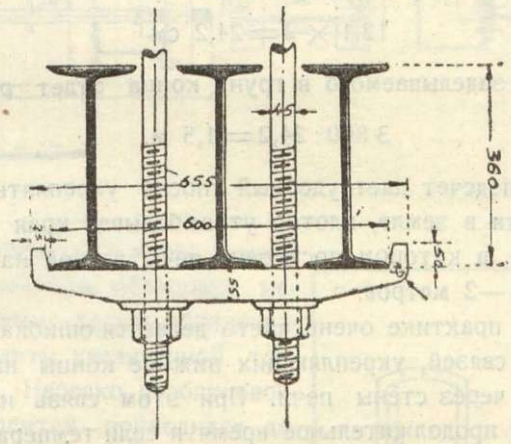
Наличникам из двутавровых балок при $h = 100$ мм, соответст. связь диаметром[1]) $d \geqq 19$ мм

120 " " " " 22 "
160 " " " " 25 "
200 " " " " 30 "
300 " " " " 45 "

Наличники делаются обыкновенно из двух балок. Пластина, их соединяющая, служит опорой для шайбы. Наличников из одной балки не делают, ибо они имеют два недостатка: легко свертываются и требуют приклепки ушка для связи, что сложно. Иногда наличники делают из трех балок и двух связей (фиг. 78). В стыке двух облицовочных плит удобнее всего наличники из двух балок: одна балка удерживает в отвесном положении одну плиту, другая—другую.



Фиг. 77.



Фиг. 78.

Очень удобны для употребления в виде наличников швелерные балки (корытное железо), но материал в них расположен менее выгодно, чем в двутавровых балках и арматура выходит более тяжелая. Под шайбами связей обыкновенно располагаются пружины, рессоры из прямоугольных пластин Бельвиля или в виде усеченного конуса.

[1]) Нарезка Витворта.

Иногда вместо рессор прокладываются деревянные прокладки из наплыва [1]). Лучше же всего никаких прокладок и рессор не делать, о чем подробно изложено на стр, 41.

Как заделывать нижние концы наличников? Для этого применяется четыре системы:

1) нижние концы стягиваются на уровне фундамента связями, при чем в данном случае, под шайбу полезно положить пружину,

2) нижние концы заделываются в кладку (бетон),

3) в утрамбованную землю, или

4) в башмаки.

При заделке наличников в бетон надо расчитывать на реакцию опоры, которую способен вызвать наличник, когда его начнет гнуть сила расширения. Например, имея наличник из двух балок в 300 мм, при длине его 5000 мм, мы получим реакцию при переходе за пределы упругости, т.-е.

$$K_{из} = 2000 \text{ кг/см}^2,$$

$$Q = \frac{P}{2} = 2 \cdot 4 \cdot \frac{K_{из} W}{l} = 2 \cdot 4 \frac{2000 \cdot 592}{500} = 19 \text{ тн},$$

что указывает на серьезность требующейся заделки. Легко осуществима заделка наличников в трамбованный грунт подобно тому, как заделываются телеграфные столбы. Реакция в 19 000 кг может быть уравновешена опорной площадью наличника в грунте:

$$\frac{19\,000}{5} = 3\,800 \text{ см}^2.$$

При ширине двух полок наличника

$$12{,}1 \times 2 = 24{,}2 \text{ см}$$

длина заделываемого в грунт конца будет равна:

$$3\,800 : 24{,}2 = 1{,}5 \text{ м}.$$

Этот подсчет дает удобный способ укреплять наличники в земле, плотно утрамбовывая края котлована, в котором построена печь, глиной на глубину 1—2 метров.

На практике очень часто делается ошибка пропуска связей, укрепляющих нижние концы наличников через стены печи. При этом связь нагревается продолжительное время и если температура нагрева достигнет критических точек, то строение связей из мелкозернистого железа переходит в крупно-кристаллическое. В коллекции Политехнического Института имеется связь, кристаллы железа в коей достигли размеров 15 × 15 мм. Хрупкость такой связи настолько велика, что если уронить ее на землю, то она разваливается на куски. Поэтому пропуск связей через кладку печей где они могут нагреться до 700°С должен быть признан совершенно недопустимым. Если обойтись без этого нельзя, то связь надо заменить железной трубой и присоединить ее к воздухопроводу или водопроводу.

В тех случаях, когда наличник не может быть скреплен с противолежащей ему связью, его крепять при помощи горизонтальных балок—схваток. (фиг. 72). Балки эти должны быть расчитаны так, чтобы их момент сопротивления был бы достаточен для уравновешивания реакциям опор наличников. При таком расчете оказывается нередко нужно придавать этим схваткам размеры довольно солидных клепанных балок.

Облицовочные плиты, как мы видели выше, сообщают кладке печей прочность и герметичность, поэтому печи, за редкими исключениями, делаются в чугунной или железной облицовке. Я знаю только один случай, когда печи делаются без облицовки из желания сделать их более прочными, а именно: при кладке мартеновских печей американцы иногда не делают выше откосов ванны облицовочных плит, а ограничиваются наличниками, к которым приклепываются металлические полосы, служащие пятами для свода, перекрывающего рабочее пространство. При такой конструкции рабочие получают извне доступ к задней стенке, которая может починиваться снаружи без того, чтобы тревожить свод, что очень разумно.

Если в настоящее время делаются очень часто печи без металлической арматуры, то главнейшее из соображений быстроты и дешевизны сооружения. Фиг. 79 представляет систему постройки в этом случае. На фундаменте печи (печь для термической обработки стали, устанавливается каркас печи, состоящий из наличников, из балок, а лучше корытного железа соединенных между собой горизонтальными полосами корытного железа. Эти горизонтальные полосы располагают на уровне пят сводов печи и к уровню прикрепления наличников окон печи. Когда такой каркас собран, печь выкладывается внутри его, как фахверковое здание внутри своего каркаса.

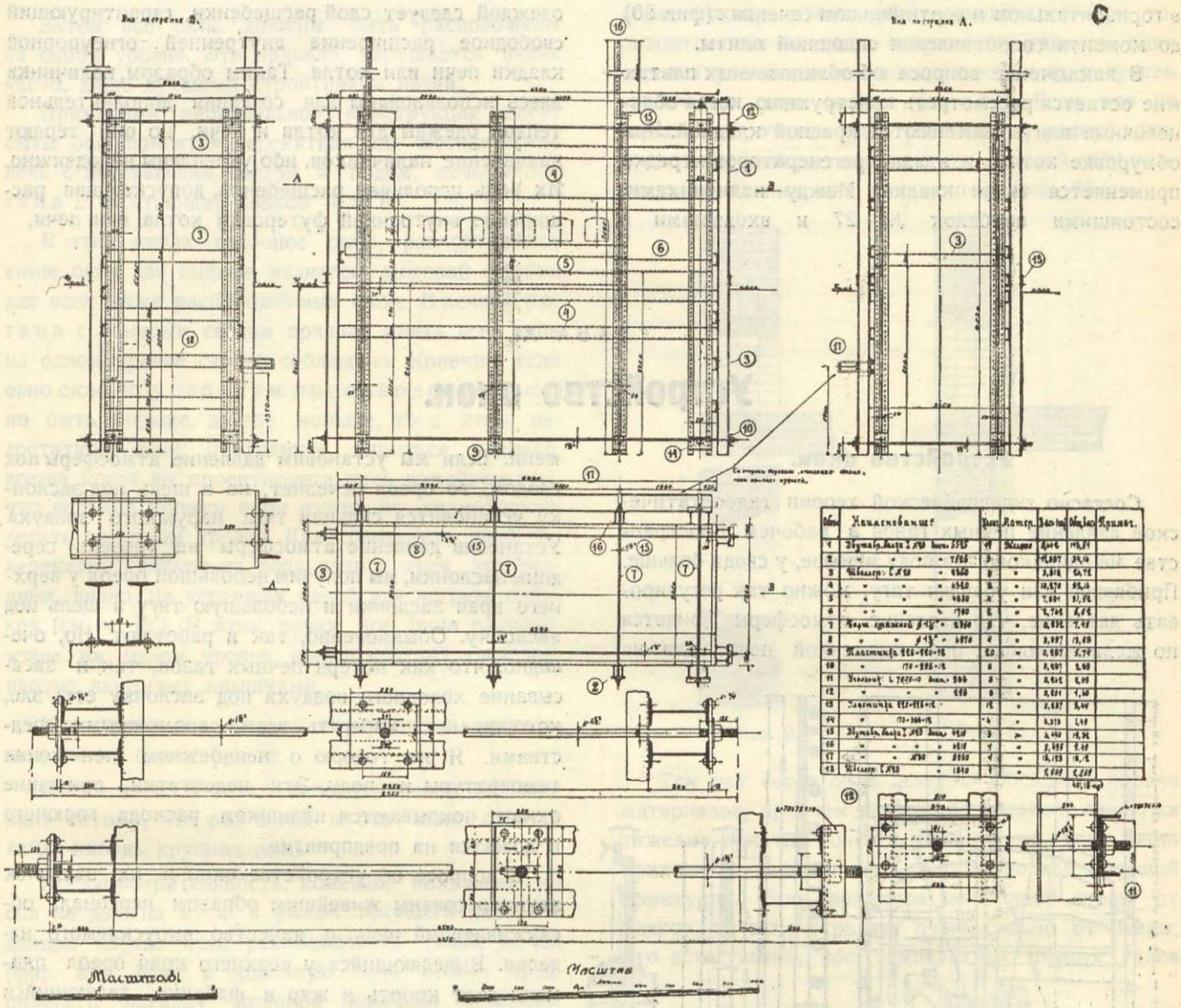
Преимущества такого сооружения печи громадны. При чугунных облицовочных плитах, для каждой плиты надо сделать модель, отлить по ней плиту и затем хранить эту модель за № в модельном сарае на случай, если плита лопнет и придется ее заменить новой. Всякий инженер знает в какой мере завод обременяется этими старыми моделями, хранить которые предст вляет громадную и дорогую заботу.

Что касается железной облицовки, то она состоит обыкновенно из высеченных из котельного железа в 6 – 8—10 мм толщины листов, с при-

[1]) Такие прокладки не колются.

ПЕЧЬ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ

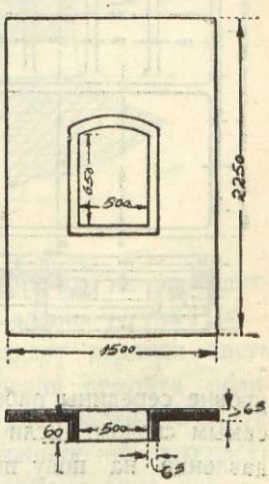
ЖЕЛЕЗНЫЙ КАРКАС ПЕЧИ.



Фиг. 79.

клепанными к ним для жесткости уголками. Мы видели, что горизонтальных уголков в интересах правильного омывания арматуры воздухом делать не следует, что лишает железную арматуру нужной жесткости. Прочность арматуре этой придается по возможности более частым расположением наличников.

Каких размеров делают облицовочные плиты и как часто ставят наличники? Число наличников определяется размером и расположением окон. Так как наличники стягиваются попарно связями, то расположение их вокруг печи совершенно симметрично. Расстояние между наличниками стараются делать в пределах 1—2 метров, но при громадных посадочных окнах приходится расставлять их гораздо шире. При широко расставленных наличниках приходится много думать о прочности облицовки между ними—делать облицовочные плиты увеличенной толщины. Нередко в облицовочных плитах приходится делать вырезы в тех местах, где в кладке делаются заложенные кирпичом окна для ремонта. Например: «затылки» пролетов мартеновских печей, «лазы» для смены насадки регенераторов и т. п.



Фиг. 80.

Такие вырезы настолько сильно ослабляют облицовочную плиту, что она может в

этом месте оказаться очень слабой и лопнуть. Чтобы предупредить излом, ее вырез усиливают оторочкой, увеличивающей момент сопротивления в горизонтальном и вертикальном сечениях (фиг. 80) до момента сопротивления сплошной плиты.

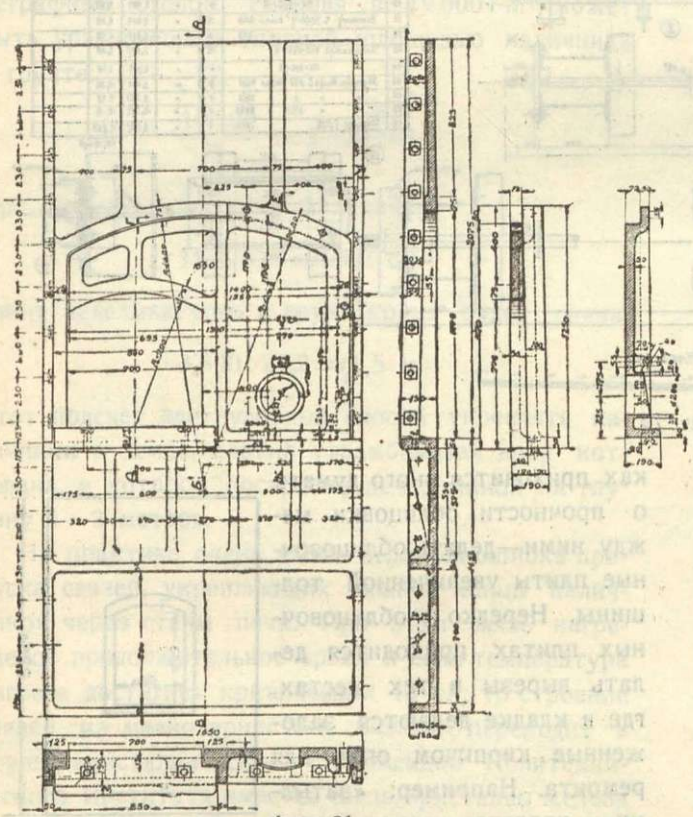
В заключение вопроса об облицовочных плитах мне остается рассмотреть конструкцию, когда облицовочные плиты заменяются красной кладкой. При обмуровке котлов и кладке регенераторов нередко применяется такая кладка. Между наличниками, состоящими из балок № 27 и входящими в состав каркаса котла или регенератора, выкладываются вогнутые, если смотреть снаружи, арки из красного кирпича в 1 кирпич. За этой внешней одеждой следует слой расщебенки, гарантирующий свободное расширение внутренней огнеупорной кладки печи или котла. Таким образом, наличники здесь использованы для создания дополнительной теплой одежды для котла и печи, но они теряют назначение наличников, ибо укреплены неподвижно. Их роль исполняет расщебенка, допускающая расширение внутренней футеровки котла или печи.

ГЛАВА XI.

Устройство окон.

Устройство окон.

Согласно гидравлической теории гидростатическое давление печных газов в рабочем пространстве не одинаково. На поду меньше, у свода больше. Прибавляя или убавляя тягу, можно так регулировать давление, что давление атмосферы придется по желанию или на поду пламенной печи, или на



Фиг. 81.

уровне середины рабочего пространства, или под самым сводом. Если мы установим атмосферное давление на поду печи, то под сводом получим максимум положительного давления и у верхнего края заслонки появится очень большой ореол пламени. Если мы установим давление атмосферы под сводом, то ореол исчезнет, но в щель под заслонку установится сильная тяга наружного воздуха. Установив давление атмосферы на уровень середины заслонки, мы получим небольшой ореол у верхнего края заслонки и небольшую тягу в щель под заслонку. Обыкновенно, так и работают. Но, очевидно, что как потеря печных газов, так и засасывание холодного воздуха под заслонку есть зло, которое надо избегать всеми возможными средствами. Я не говорю о неизбежном понижении температуры на поду. Эти недостатки, присущие окнам, покрываются излишком расхода горючего и ложатся на предприятие.

В вопросе об устройстве окон и их заслонок заинтересованы живейшим образом персонал, обслуживающий печь, и качество выпускаемого изделия. Выделяющийся у верхнего края ореол пламени дает копоть и жар в фабрике, делающийся летом, для свежего человека, иногда невыносимым. Засасываемый под заслонку воздух в печах для нагрева железа, стелется по поду (как тяжелая жидкость в легкой) и окисляет нагреваемые на поду железные предметы; он увеличивает угар при прокатке сортового железа и портит качество продукта при выделке кровельного железа, жести и при штамповке всяких изделий в горячем состоянии; термическая обработка возможна только в печах с положительным давлением на поду; засасывание холодного воздуха в них недопустимо.

Итак конструкция окон пламенных печей должна, по возможности, обеспечить печь от потери печных газов через верхний край заслонки и засасывания воздуха под нижний ее край.

Так как гидростатическое давление тем больше, чем больше разность уровней, то ясно, что для того, чтобы ослабить недостатки окон пламенных

печей надо принимать все меры для уменьшения высоты окон. Чем ниже окно, тем меньше ущерб им причиняемый.

Затем: все окна должны быть расположены на одном уровне. Это правило нарушается очень часто, даже лучшими строителями печей.

Примерами неправильной конструкции могут быть: общепринятая перекатная или методическая печь с восстающим сводом и подом, печь Моргана с восстающим сводом и т. п.

В этих печах садочное окно, расположенное выше окна для выдачи, является дымовой трубой для всех ниже расположенных окон. В печи Моргана с понурым сводом правило иметь все окна на одном уровне строго соблюдено. Конечно, если одно окно по условиям производства должно быть больше, другое меньше, то с этим недостатком печи приходится мириться. Однако, всегда когда вы проектируете печь, думайте о том, что верхние кромки окон нужно по возможности делать на одном уровне. Как совместить удобство перекатки слитков на поду печи с этим требованием, видно на чертежах печей для нагрева слитков (см. ч. IV). В этих печах все окна расположены на одном уровне, кроме круглых гляделок плотно закрытых крышками.

Итак, окна надо делать поменьше и располагать их на одном уровне.

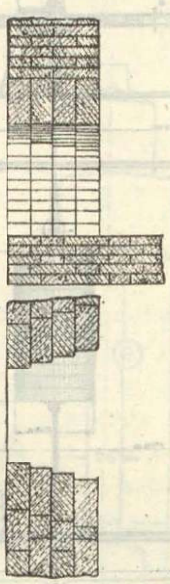
Очень часто в печах делаются очень большие окна потому, что раз в год в это окно садится какая-нибудь крупная вещь.

Предусмотрительность, конечно, похвальна, но она не должна итти в ущерб текущего дела, и в данном случае надо рекомендовать такой выход (фиг. 81): Если в ковочную печь можно предполагать посадку крупной поковки, например, коленчатого вала, то чугунная арматура окна делается по размерам этой максимальной поковки. По размерам этой поковки делается и капитальная кладка стен окна, для нормальной же работы внутри большого окна выкладывается маленькое, достаточное для текущей работы. Заслонка может остаться большая, она ничему не мешает. Когда понадобится, это маленькое окно может быть превращено в большое.

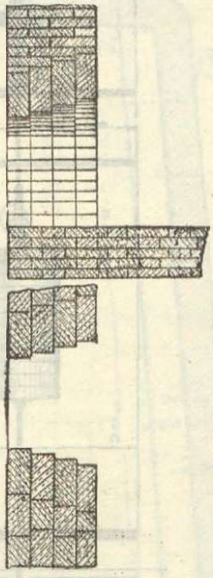
С целью уменьшения зева окна, его очень часто делают расходящимся в рабочее пространство печи. Расшириться окно может только в стороны фиг. 82, или в стороны и вверх фиг. 83.

Расширение в стороны важно для удобства маневрирования с предметами, посаженными на под. Расширение вверх обыкновенно довольно бесполезно, за исключением окон мартеновских печей, где приходится делать посадку скрапа иногда чуть не под самый свод печи.

Если окно расширяется внутрь печи, то пролет арки, его перекрывающей, увеличивается. При горизонтальных пятах и сохранении радиуса арки стрелка увеличивается и мы, естественно, получаем увеличение окна вверх (фиг. 83). Если это не желательно, то или надо увеличивать радиус арки, и, следовательно, делать ее более пологой, или опускать пяты вниз, как показано на фиг. 82.

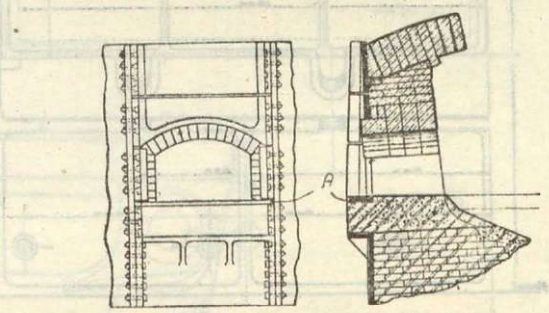


Фиг. 82.



Фиг. 83.

Так как через окна делается посадка и выдача материалов, при чем орудиями посадки являются тяжелые лопаты, кочерги и лома, то края окна приходится защищать от ударов прочной чугунной арматурой. Если арматура защищает стены от ударов, то сама страдает очень сильно от жары, что естественно, ибо температура печных газов



Фиг. 84.

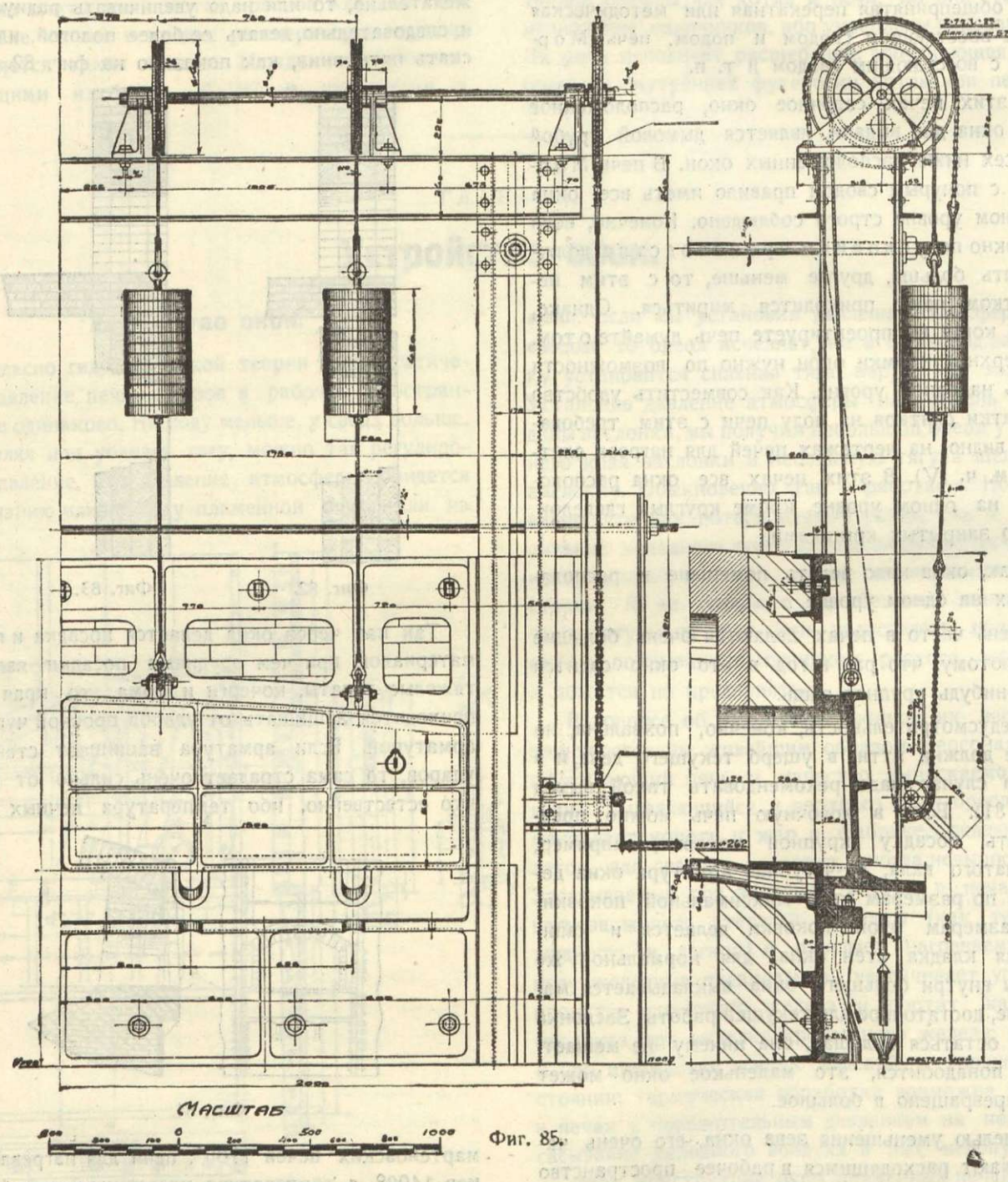
мартеновских печей 1700°, печи для нагрева слитков 1400°, а температура плавления чугуна 1100—1200°С. Особенно сильно страдает верхняя часть облицовки окна. Для удешевления ремонта облицовки окна она делится на две части: сменную верхнюю и капитально укрепленную нижнюю часть облицовки. К наличникам облицовка окна прикрепляется при помощи болтов с чеками.

Нижняя часть облицовки окна на уровне пода печи или уровне ванны имеет порог, на который опирается лопата (например, при посадке слитков).

В мартеновских печах этот порог (фиг. 84) делается ложным (*А*). Настоящий порог, составляющий одно целое с облицовкой окна делается ниже

В заслонках сварочных печей ложного порога не делают, но под порогом часто устраивают отверстие для спуска сварочного шлака.

Так как нижняя часть облицовки окна постепенно охлаждается струей засасываемого воздуха, то обыкновенно она служит очень долго.



Фиг. 85.

дюймов на 12—18, на уровне капитальной кладки окна. Во время ремонта доломитового пода ложный порог и временная кладка под ним снимается и тогда рабочие получают доступ к набивке пода, выламывать которую собираются.

Устройство заслонок.

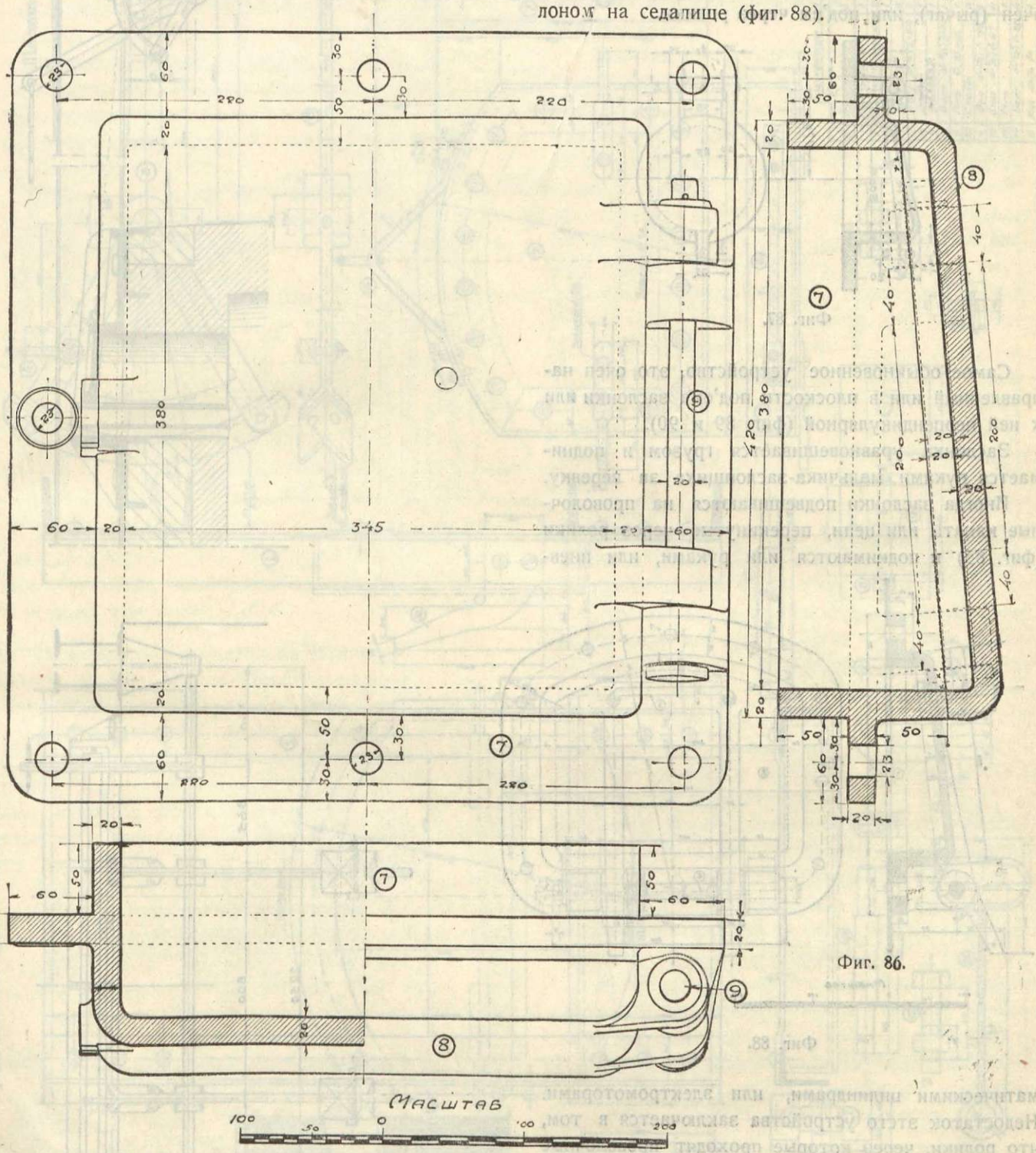
Главное требование, которому должна удовлетворять хорошо сконструированная заслонка—это плотность ее притвора. Чем уже щель, между полотном заслонки и облицовкой окна, тем меньше

ореол пламени у верхнего края заслонки и меньше засасывание у низа ее. Плотность притвора заслонки достигается следующими путями:

1) Заслонки, открывающиеся снизу вверх или вращающиеся на горизонтальных шарнирах, никогда не устраиваются в отвесном положении, а всегда в наклонном (фиг. 85, 87 и др.) чтобы, горизонтальная, составляющая силы тяжести, прижимала заслонку к седалищу.

2) Заслонки, открывающиеся справа налево, или обратно, не должны иметь вертикального шарнира, а всегда несколько наклонный, тогда горизонтальная, составляющая силы тяжести, прижимает заслонку к седалищу (фиг. 86).

3) Заслонки, открывающиеся сверху вниз, никогда не устанавливаются отвесно, а всегда с наклоном на седалище (фиг. 88).



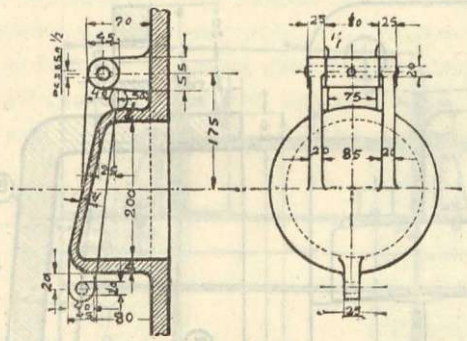
Фиг. 86.

4) У подвешенных на цепях заслонок точка подвеса должна быть отклонена от отвесной линии (фиг. 85 и 89), чтобы горизонтальная, слагающая силы тяжести, прижимала заслонку к несколько наклонным направляющим облицовочной плиты.

5) Иногда отступают от этого правила и зас-

лонку подвешивают по отвесной линии, но тогда заслонка останавливается не порогом окна, а ложится на крючья (фиг. 90), прижимающие заслонку к облицовочной плите.

Для под'ема заслонок применяется два устройства: очеп (рычаг), или под'ем через ролики.

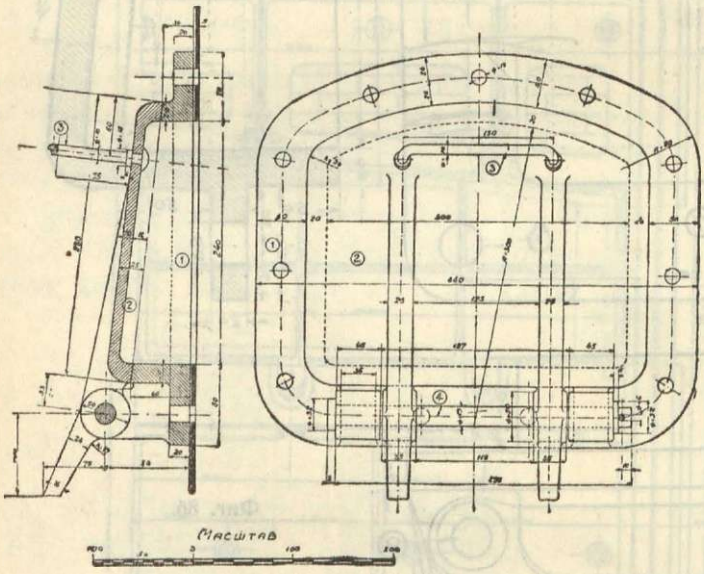


Фиг. 87.

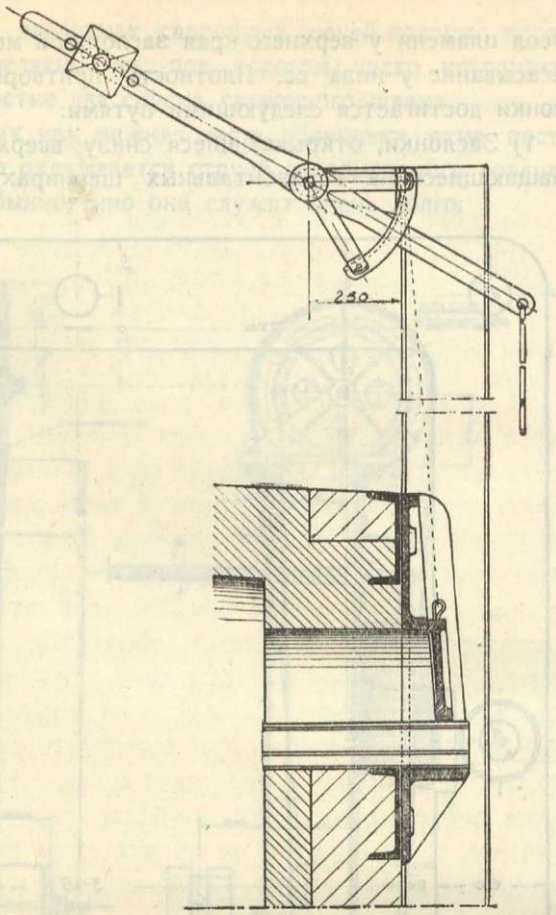
Самое обыкновенное устройство, это очеп направленный или в плоскости под'ема заслонки или к ней перпендикулярной (фиг. 89 и 90).

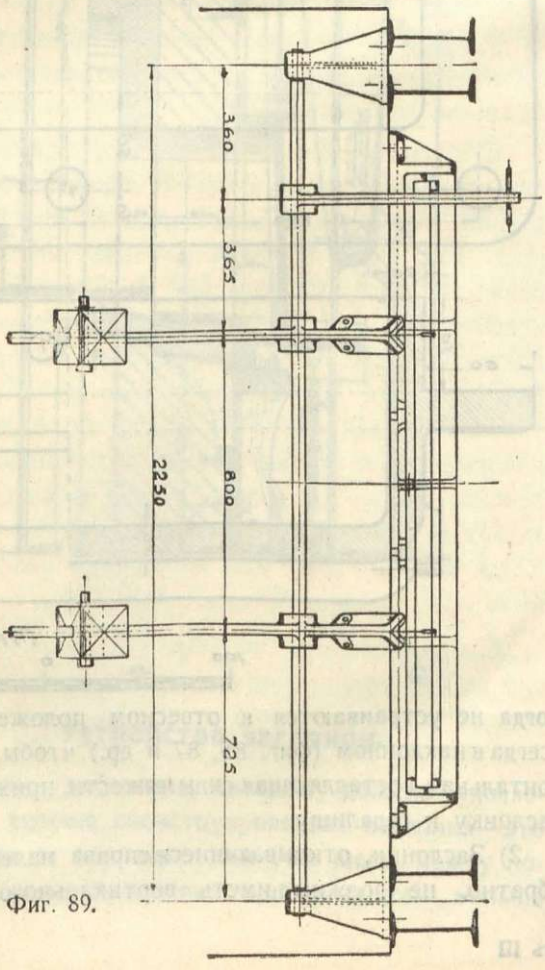
Заслонка уравновешивается грузом и поднимается руками мальчика-заслонщика за веревку.

Иногда заслонки подвешиваются на проволочные канаты или цепи, перекинутые через ролики (фиг. 85) и поднимаются или руками, или пневматическими цилиндрами, или электромоторами. Недостаток этого устройства заключается в том, что ролики, через которые проходят проволочные канаты, страдают от ореола пламени над заслонкой. Мазь на них не держится. Оси их забивает пылью и они с трудом вращаются. При механическом двигателе это беда не большая, для ручного же привода от этого устройства нужно воздерживаться.

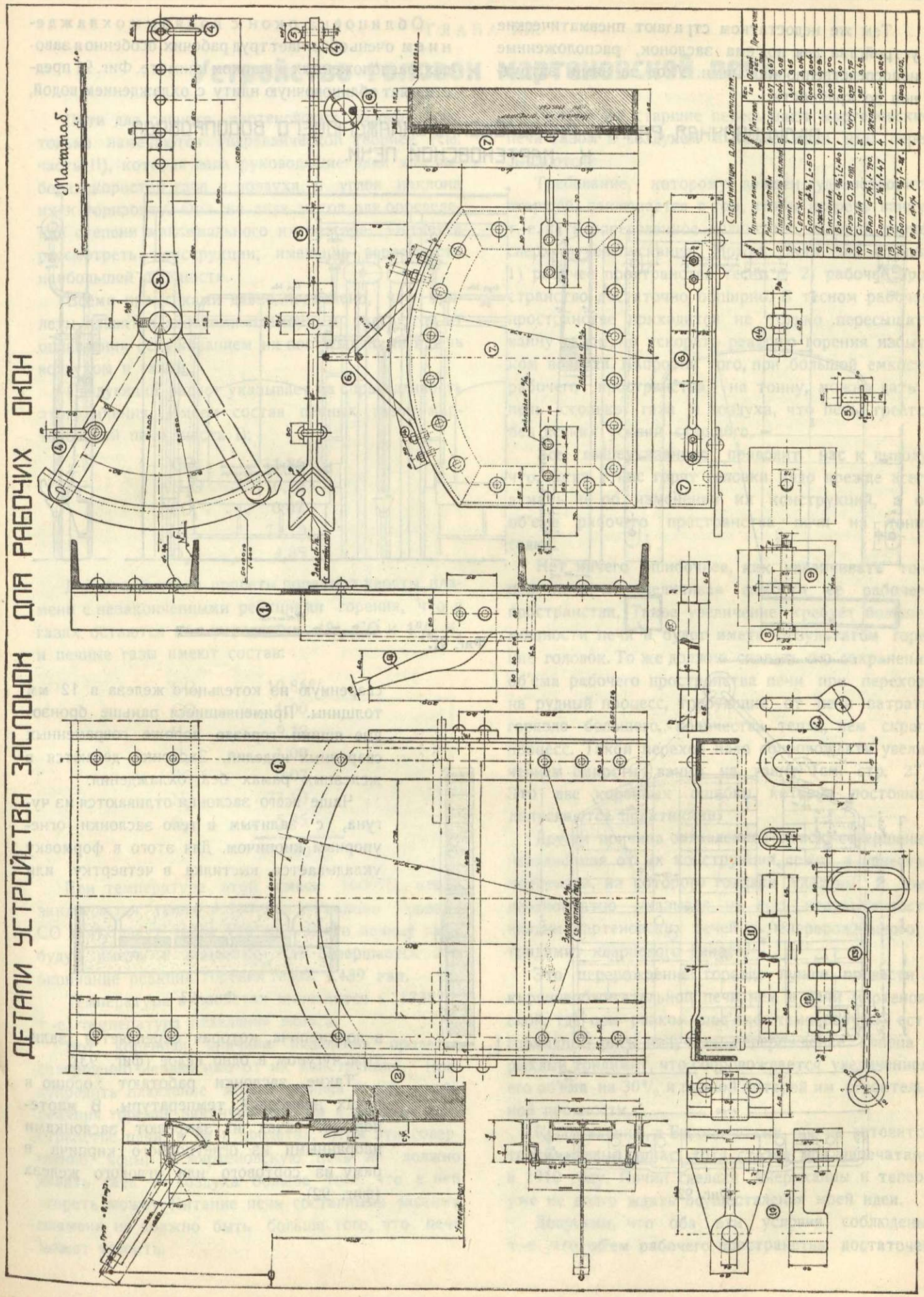


Фиг. 88.





Фиг. 89.

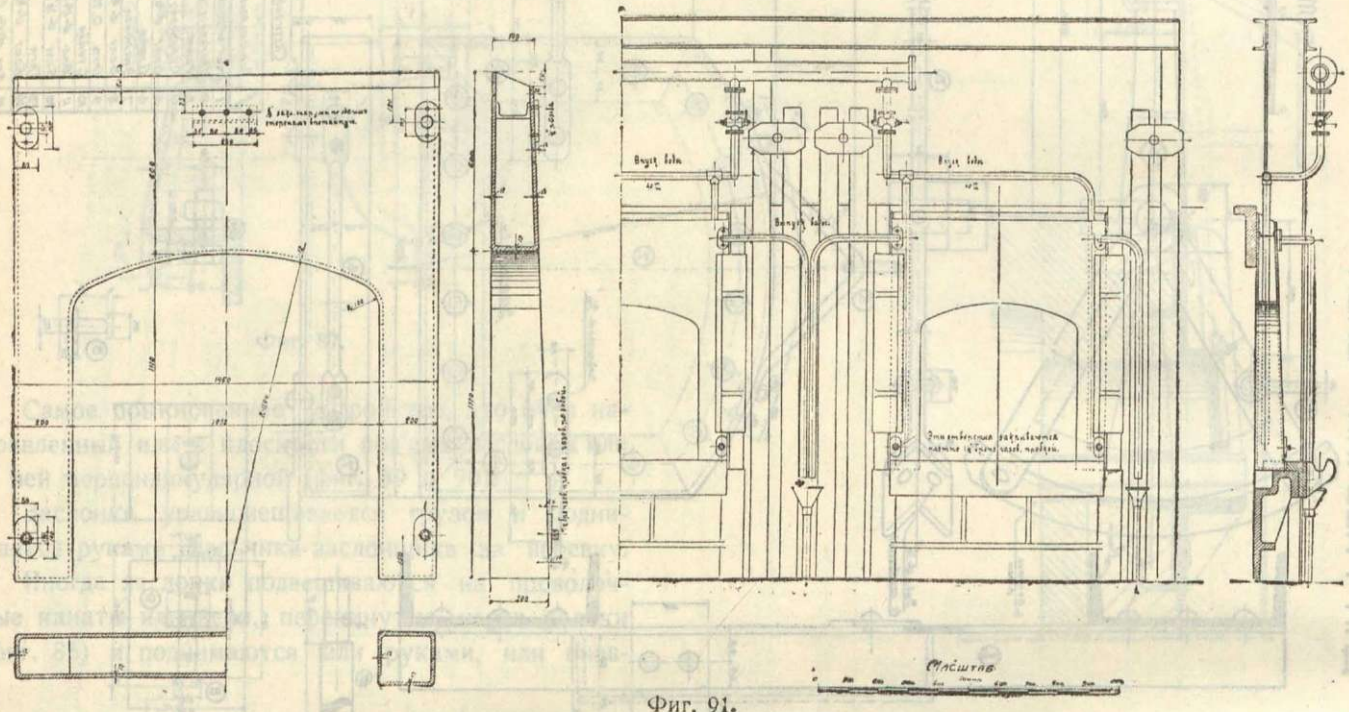


Фиг. 90.

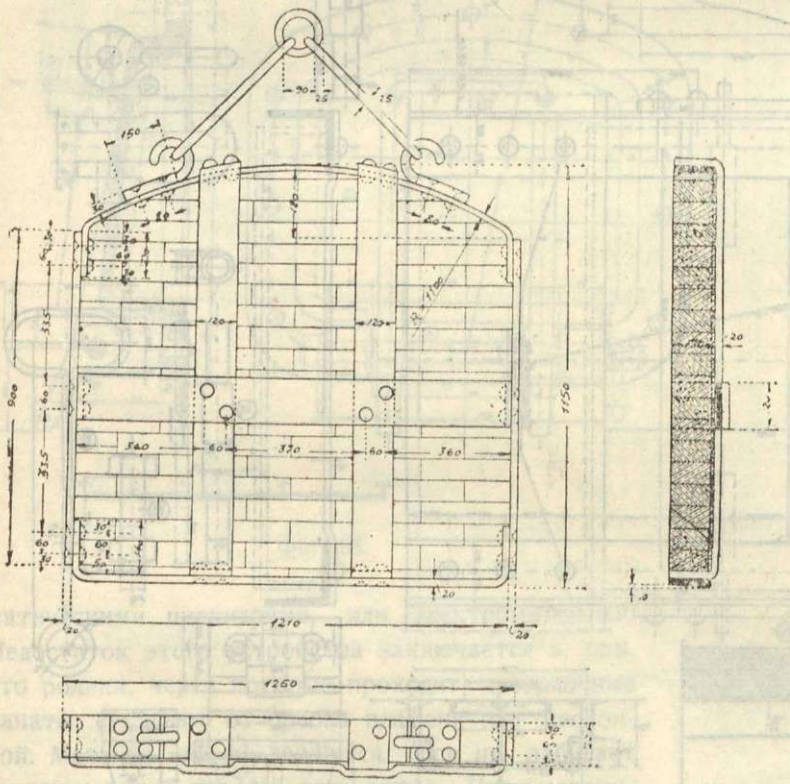
Тем же недостатком страдают пневматические устройства для под'ема заслонок, расположенные непосредственно над ними. Уход за ними затруднен до крайности.

Облицовка окон с водяным охлаждением очень облегчает труд рабочих, особенно в заводах, расположенных в жарком климате. Фиг. 91 представляет облицовочную плиту с охлаждением водой,

ОБЛИЦОВОЧНАЯ РАМА И РАСПОЛОЖЕНИЕ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОДОПРОВОДА К МАРТЕНОВСКОЙ ПЕЧИ.



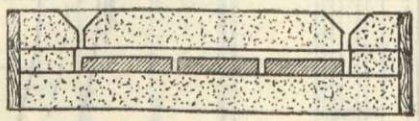
Фиг. 91.



Фиг. 92.

сваренную из котельного железа в 12 мм толщины. Применявшиеся раньше бронзовые ящики гораздо дороже современных сваренных изделий. Заслонки делаются в железных рамах без охлаждения.

Чаще всего заслонки отливаются из чугуна, с залитым в тело заслонки огнеупорным кирпичом. Для этого в формовку укладывается выстилка в четвертку или



Фиг. 93.

в полкирпича, которая скрепляется залитым чугуном в одно целое (фиг. 93).

Такие заслонки работают хорошо в печах невысокой температуры. В мартеновских печах их заменяют заслонками набранными из огнеупорного кирпича в раму из сортового или углового железа (фиг. 92).

ГЛАВА XII.

Устройство головок мартеновской печи.

Пути для расчета мартеновских головок пока только намечаются гидравлической теорией (см. часть II), которая дала руководящие идеи для выбора скоростей газа и воздуха, и углов наклона их к горизонту. Она же дала метод для определения степени максимального их разгара. Остается рассмотреть конструкции, имеющие вероятность наибольшей прочности.

Всеми практиками давно подмечено, что пролеты плавятся хвостами пламени, и спасаются от оплавления остуживанием их поступающими в печь воздухом и газом.

Следующий расчет указывает на справедливость этого мнения. Имеем состав печных газов мартеновской печи (часть I):

CO_2 . . .	11,86%
H_2O . . .	10,12
SO_2 . . .	0,07
N_2	73,10
O_2	4,85

Допустим, что в пролеты попадают хвосты пламени с незаконченными реакциями горения, что в газах остаются не сгоревшими 1% CO и 1% H_2 и печные газы имеют состав:

CO_2 . . .	10,86%
CO	1,00
H_2O	9,12
H_2	1,00
SO_2	0,07
N_2	73,10
O_2	5,85
	101,00%

При температуре этой смеси 1600°C в ней заключается тепла 1.313 кал. Реакции горения CO и H_2 дадут тепла 126 кал. Всего печные газы будут иметь в пролетах, где совершается это окончание реакций горения тепла 1.439 кал.

Температура в пролетах вычислится в 1737°C, т.-е. температура плавления динаса.

Вот коренная причина плавления пролетов совершенно независимо от их конструкций. Предупредить плавление можно приняв меры, чтобы реакция горения заканчивалась бы в рабочем пространстве печи, а не в пролетах. Меры эти совершенно ясны: в мартеновскую печь не должно давать газа и воздуха больше того, что в ней сгореть может. Питание печи составными частями пламени не должно быть больше того, что печь может усвоить.

Почему же старшие пересыщают мартеновские печи газом и воздухом и какие печи ими пересыщаются?

Требование, которому должен удовлетворить старшой, заключается в том, чтобы нагреть ванну, т.-е. дать определенное количество калорий ванне, сверх лучеиспускания. Может быть два случая: 1) рабочее пространство тесно и 2) рабочее пространство достаточно обширно. В тесном рабочем пространстве приходится не только пересыщать ванну газом, но ускорять реакцию горения избытком воздуха. Напротив того, при большой емкости рабочего пространства, на тонну, можно дать в печь столько газа и воздуха, что печь греется без всяких усилий старшого.

Все вышеуказанное приводит нас к выводу, что, когда у нас горят головки, надо прежде всего думать не об изменении их конструкций, а об об'еме рабочего пространства печи на тонну садки.

Нет ничего ошибочнее, как увеличивать тоннаж печи, не увеличивая емкости ее рабочего пространства. Такое увеличение требует большей мощности печи и будет иметь результатом горение головок. То же должно сказать и о сохранении об'ема рабочего пространства печи при переходе на рудный процесс, требующий от печи затраты гораздо большего количества тепла, чем скрап-процесс. Такой переход надо сопровождать увеличением емкости ванны на тонну (см. стр. 27). Это две коренных ошибки, которые постоянно допускаются практиками.

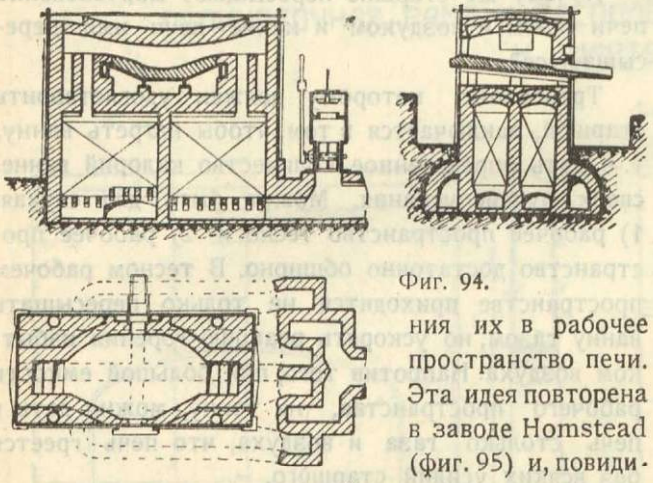
Другая причина оплавления головок, совершенно независимая от их конструкций, лежит в качестве материала, из которого головки сделаны. Я уже неоднократно указывал на всю непрактичность кладки мартеновских печей из неперерожденного в тридимит кварцевого динаса.

Это перерождение гораздо лучше провести в кирпичеобжигательной печи, чем в печи мартеновской, где при резком под'еме температуры есть громадный риск получить перерождение кварца в рыхлый тридимит, что сопровождается увеличением его об'ема на 30% и полной потерей им строительной прочности.

К сожалению, в Европе до сих пор не готовится тридимитовый динас, хотя статья моя напечатана в 1910 году. Почин сделали американцы и теперь уже не долго ждать осуществления моей идеи.

Допустим, что оба эти условия соблюдены, т.-е. что об'ем рабочего пространства достаточен

для завершения реакции горения и что головки сделаны из тридимитового динаса и рассмотрим идеи конструкций. В первой печи завода Sireuil (фиг. 94), газ и воздух смешивались до поступле-



Фиг. 94.

ния их в рабочее пространство печи. Эта идея повторена в заводе Homstead (фиг. 95) и, повидимому оставлена, хотя к ней очень часто возвращаются.

Действительно, опыт показывает нам, что температура печи со стороны впуска газа и воздуха не высока. Ванна греется хвостами пламени; поэтому смешать газ и воздух до поступления их в печь выгодно, ибо это уменьшает не горячую часть пламени. Невыгода этой конструкции заключается в следующем: при смешении газа и воздуха в печи пролеты спасаются от оплавления остуживанием их газом и воздухом; смешивая их в пролетах, мы пробуждаем в пролетах начало горения газа и воздуха. Так как время пребывания смеси в пролетах ничтожно, то опасаться, что в пролетах будет очень высокая температура нечего, но тем не менее начало горения будет иметь место и пролеты не будут охлаждаться газом и воздухом, а, следовательно, несколько потеряют в своей прочности. Поэтому я не думаю, чтобы эти головки в таком виде, как они делались, заслуживали бы подражания.

Следовательно, мы должны остановиться на головках, где смешение газа и воздуха происходят в печи.

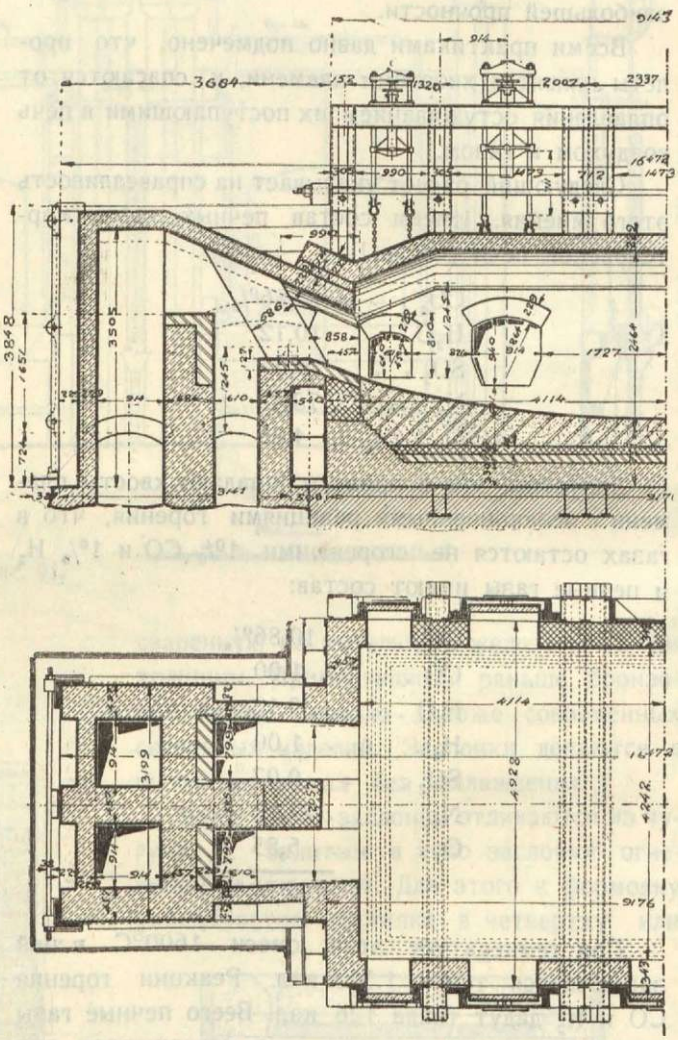
Здесь мы должны различать два типа головок:

1) Головки, очень длинные, при чем весь расчет в том, что головки постепенно плавятся и удлиняя головки, мы удлиняем кампанию печи.

2) Головки короткие с охлаждением водой.

Последний тип имеет сравнительно меньшее распространение в Европе и большее в Америке, однако на заводе Creusot головки с охлаждением водой работают много лет. Длинные, оплавляющиеся головки пользуются симпатией, ибо практики заметили, что по мере оплавления головок, очень часто, работа печи не только не ухудшается, но, напротив того, улучшается. На головки, таким образом, переносятся преимущества увеличения об'ема рабочего пространства вследствие разгара печи, которое в некоторых печах достигает 60% первоначального об'ема.

При проектировании длинных головок мартеновских печей нужно решить вопрос о их форме. На практике мы чрезвычайно часто видим головки по типу сходящихся насадок. Гораздо реже можно видеть пролеты, сохраняющие свою площадь сечения по всей длине.



Фиг. 95.

Какой конструкции нужно отдать преимущество? При разгаре головок первого типа скорости струй воздуха и газа будут уменьшаться не только вследствие оплавления пролетов, но, при уменьшении их длины, и вследствие геометрического увеличения их площади, что невыгодно. При разгаре головок второго типа их площадь сечения будет увеличиваться только от разгара, поэтому очевидно, что мы должны отдать преимущество этой конструкции. Если на практике пролетам давали вид сходящихся насадок, то исходили из желания потерять меньше скорости на трение в

насадках. Такое опасение, конечно, было справедливо, когда мы не отдавали себе отчета о движении газов в печах. Теперь нам опасаться потерь на трение нечего. Мы всегда имеем средства увеличить движущую силу газов и дать пролетам ту форму, которая для нас выгодна.

Что касается охлаждения пролетов трубками с водой, то я не привожу чертежей этих конструкций вследствие их общеизвестности, дабы не загромождать книгу излишними чертежами; скажу только об основных принципах этих охлаждающих трубок. Они должны удовлетворять нижеследующим условиям:

a) вода должна быть чистая и прозрачная;

b) циркуляция должна быть настолько энергична, чтобы вода нагревалась не выше 40—50°C;

c) вся система водопровода, снабжающего печь охлажденной водой, должна быть восстающей. Необходимо проследить весь путь могущего образоваться в воде пузырька воздуха и убедиться, что он не может где-либо остановиться и закупорить охлаждающую струю. С этой точки зрения опубликованный чертеж американских головок (Noble таб. XVII, левый верхний) явно неверен, конструкция левая нижняя - правильна.

В европейских мартеновских печах газу и воздуху дается примерно одна скорость около 20 м/сек. Американцы дают воздуху гораздо меньшую скорость: 6—10 м/сек газу же дают скорость 35 м/сек, и более.

Что предпочтительнее, сказать очень трудно, ибо в данном случае мы имеем задачу о смешении струй, решать которую мы имеем очень мало данных. Нужно бы строить модели и на них изучать процесс этого смешения. Однако, совершенно очевидно, что для того чтобы нагреть газовый регенератор, т.-е. протащить через него необходимое количество печных газов, нужна будет весьма значительная тяга дымовой трубы,— большая чем на пути воздуха.

Так же мало мы можем сказать и о прекрасных по своей простоте и дешевизне головках Merz'a (фиг. 97). Они очень удались Мерцу, но как их проектировать мы не знаем, ибо никакому подсчету они, повидимому, подчинены быть не могут.

Перейдем теперь к рассмотрению вопроса о преимуществах одноэтажных и двухэтажных головок. Наибольшей популярностью пользуются головки двухэтажные, хотя они менее огнестойки, чем одноэтажные. Первоначальные причины, заставившие Сименса перейти на двухэтажные головки отпали, тем не менее они так часто повторяются, что о них следует упомянуть.

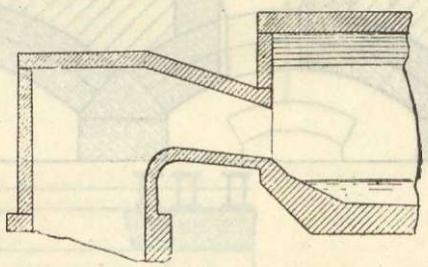
Сименс говорил: воздух тяжелее газа. Следовательно, вводя его в печь сверху, мы способствуем лучшему смешению газа и воздуха в пламени.

Вес 1 м³	0° C	1000° C
воздуха	1,29 кг	0,276 кг
генерат. газа	1,05 „	0,223 „
домен. газа	1,28 „	0,274 „

Небольшое превышение в нагреве воздуха над газом уничтожает эту разницу в весах и потому усложнять конструкцию головок из-за этой причины, казалось бы, не следовало.

Другая причина, почему одноэтажные головки не пользовались симпатией—это узкость простенков между пролетами, при расположении их в один ряд. Так было, пока ширина мартеновских печей при ручной посадке ограничивалась 3,3 метра. Теперь, при машинной загрузке, ширина печи может быть увеличина до 4,7 метра и простенки могут быть сделаны достаточно широкими.

Наконец, третья причина, почему эти головки не пользовались симпатией, было быстрое опла вление свода, обыкновенно снижаемого к таким пролетам.

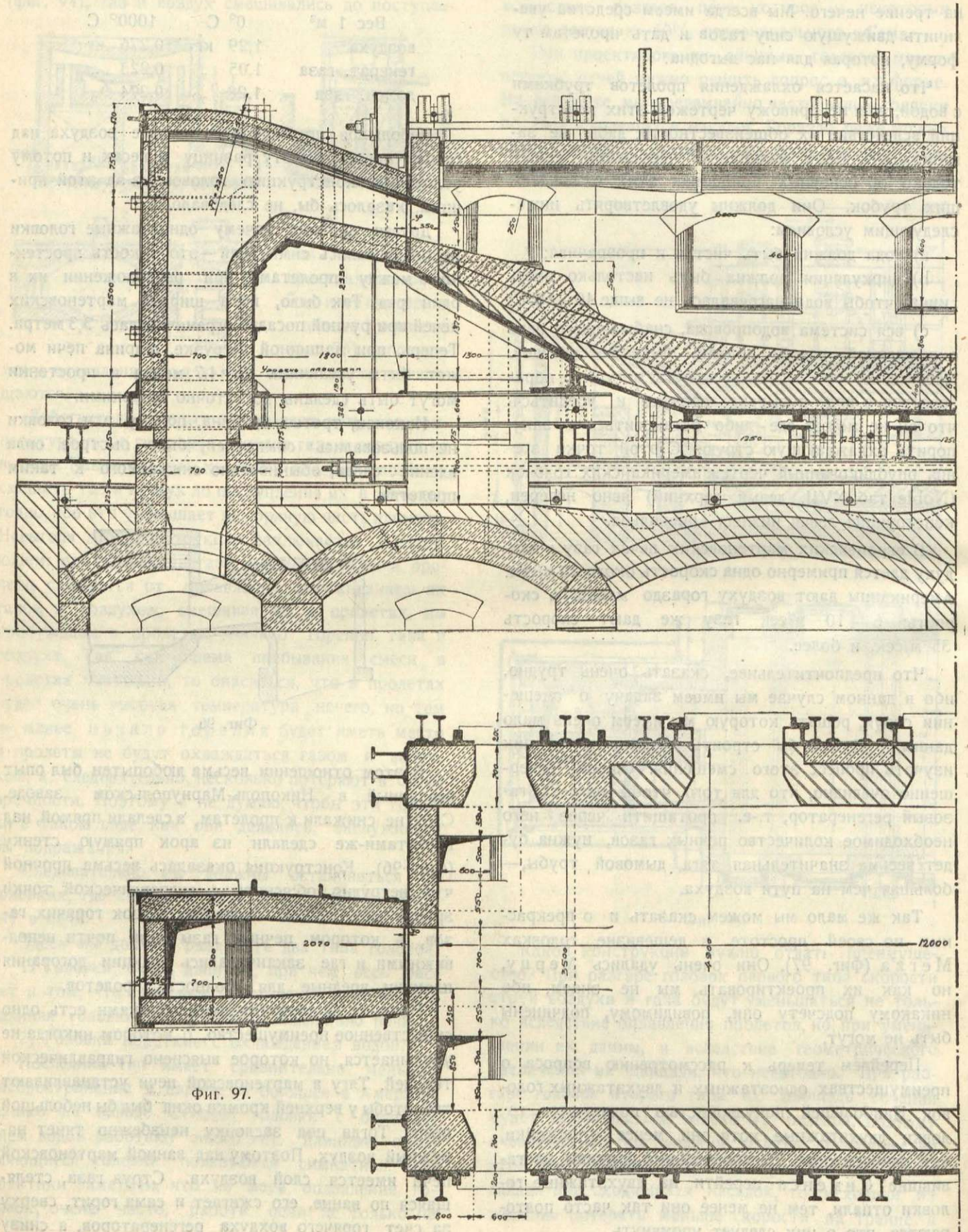


Фиг. 96.

В этом отношении весьма любопытен был опыт сделанный в Никополь-Мариупольском заводе. Свод не снижали к пролетам, а сделали прямой, над пролетами-же сделали из арок прямую стенку (фиг. 96). Конструкция оказалась весьма прочной что нетрудно об'яснить с гидравлической точки зрения: под сводом получился мешок горячих газов, в котором печные газы были почти неподвижными и где заканчивались реакции догорания пламени, вредные для прочности пролетов.

Наконец, за двухэтажными головками есть одно существенное преимущество, о котором никогда не упоминается, но которое выяснено гидравлической теорией. Тягу в мартеновской печи устанавливают так ,чтобы у верхней кромки окна был бы небольшой ореол. Тогда под заслонку неизбежно тянет наружный воздух. Поэтому над ванной мартеновской печи имеется слой воздуха. Струя газа, стелящаяся по ванне, его сжигает и сама горит, сверху за счет горячего вохдуха регенераторов, а снизу

Головки Мерца 40 тон. Мартен. печи.

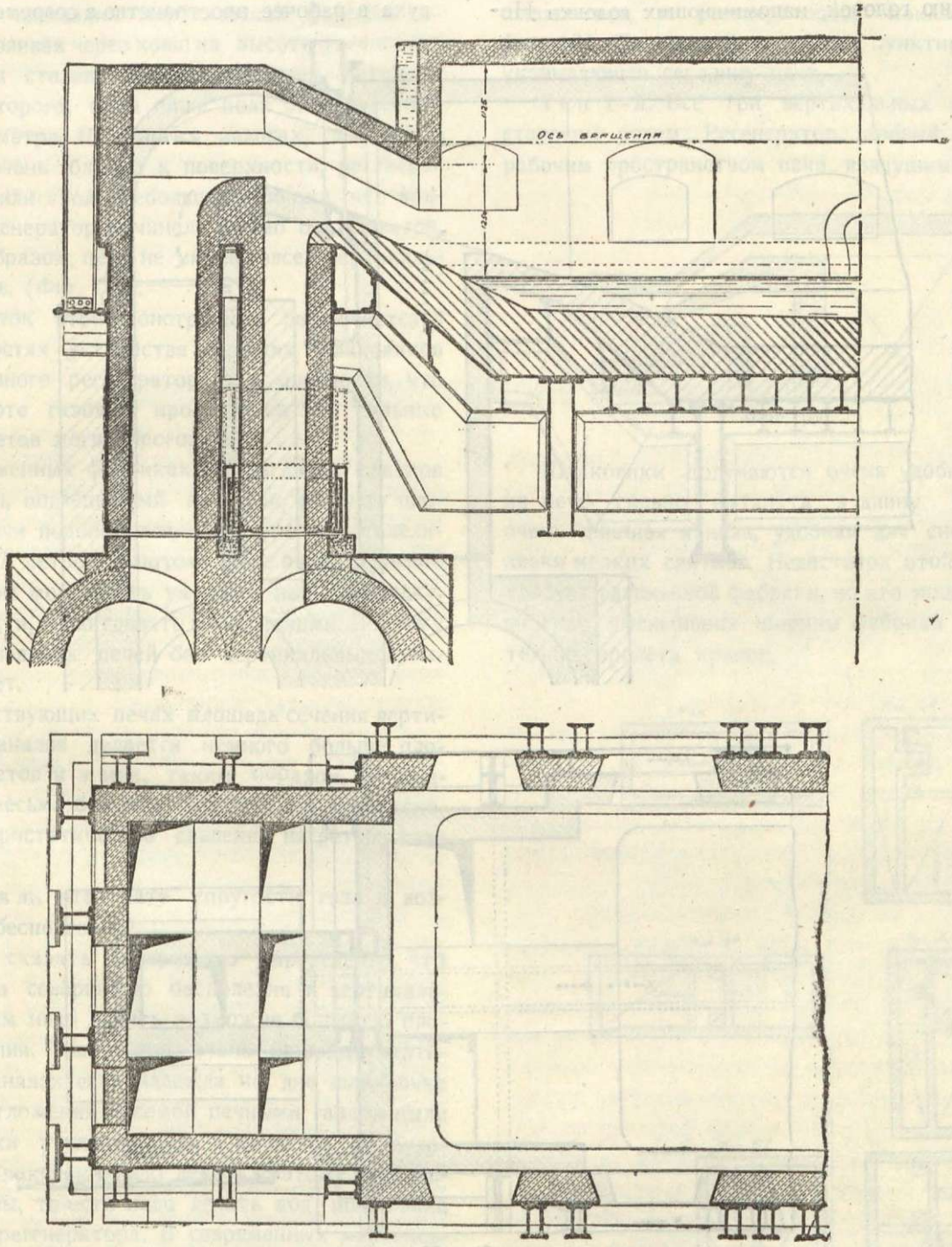


Фиг. 97.

за счет засасываемого через окна воздуха. При расположении пролетов в один ряд мы этого не достигаем, и холодные струи воздуха могут распространяться очень далеко по ванне, что не выгодно.

Громадным недостатком двух, этажных головок является нагревание арочек, разделяющих газовые

В последнее время применяются сменные головки. Эта идея была бы хорошей, если бы эти головки делались бы из перерожденного в тридимит динаса. Пока же такого динаса в продаже нет, эти головки хорошо работать не могут. Кварцевый динас нельзя нагревать так быстро, как прихо-



Фиг. 98.

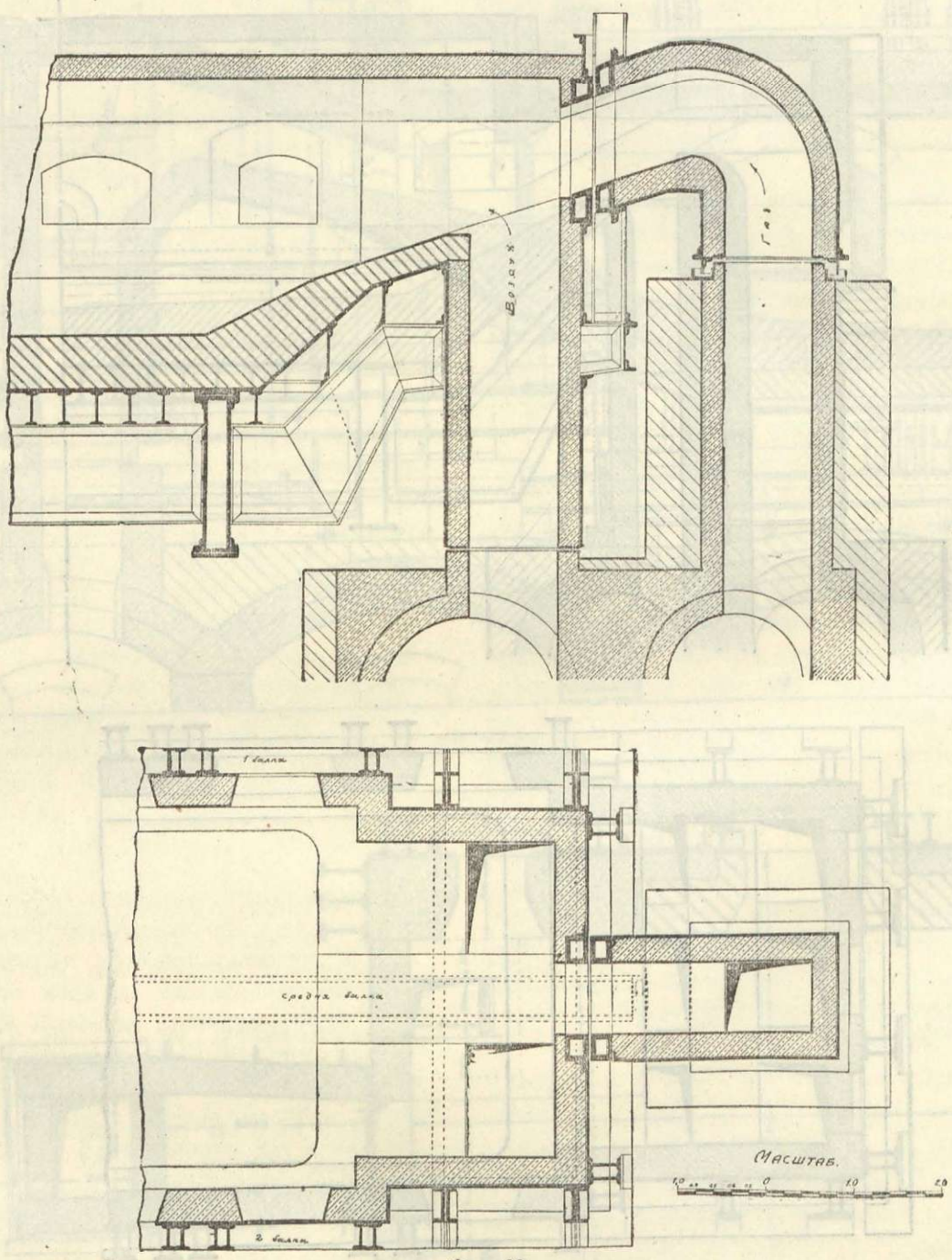
и воздушные окна; эти арочки нагреваются с обеих сторон и им приходится очень трудно. В одноэтажных головках арочки, перекрывающие пролеты, студятся наружным воздухом. Это преимущество так велико, что лично я отдаю предпочтение головкам одноэтажным.

дится нагревать эти головки и потому они должны быть очень недолговечны, вследствие разрушения динаса при быстром перерождении в тридимит.

От'емные головки качающихся печей Вельмана представляют слабое место этих печей и я думаю, что конструкция печей Вельмана может быть

значительно улучшена, если головки укрепить к качающемуся рабочему пространству, придав им конструкцию фиг. 98. (Заяв. Св. № 1072). При таком устройстве щель между неподвижной частью печи и качающейся переносится в вертикальные каналы на $3^1/_2$ метра ниже. По типу мы получим конструкцию головок, напоминающих головки Но-

диаметром (фиг. 99), неизбежная через щель потеря воздуха с рабочей стороны и засасывание наружного воздуха и потеря печных газов со стороны дымовой трубы будет немного нарушать режим регенераторов. Но сие не так вредно, как потеря печных газов и засасывание холодного воздуха в рабочее пространство в современных печах.



Фиг. 99.

mestaed, со всеми сомнениями в их долговечности при малой емкости рабочего пространства.

Ту же идею легко применить, снабдив качающуюся печь Вельмана головками Мерца. Вместо щелей в обеих сторонах рабочего пространства диаметром = 1750 мм, в затылочной стене головок Мерца будет круглое отверстие в 800 мм

Что касается щели у регенераторов, то подсыпкой песка можно эту щель довести до минимума, как и влияние ее на работу регенераторов.

Если описанные устройства несколько сомнительны для мартеновских печей, то для миксеров с отоплением на доменном газе эти устройства не вызывают никаких сомнений.

ГЛАВА XIII.

Устройство вертикальных каналов, шлаковиков и камер регенераторов мартеновских печей.

Уровень площадки мартеновской фабрики делали при разливах через ковш на высоте 3—4 метра над уровнем сталелитейного отделения, литейная канава, которого, была ниже пола сталелитейной на 1—1½ метра. Во многих заводах, где грунтовые воды очень близки к поверхности, регенераторы выходили столь небольшого об'ема, что воздушный регенератор начинали прямо от пролетов, и, таким образом, печь не имела совсем вертикальных каналов. (Фиг. 100).

Недостаток этой конструкции заключается в невозможностях устройства хороших шлаковиков для воздушного регенератора и в опасности, что при повороте газовых пролетов на 90°, тыльные части пролетов могли прогореть.

В современных фабриках при отливке слитков через ковш, подвешенный на кран, рабочая площадка у печи поднимается выше уровня сталелитейной на 7 метров и потому даже очень большие регенераторы могут быть умещены под площадку, в особенности, если сделать их лежачими. Поэтому тип мартеновских печей без вертикальных каналов отпадает.

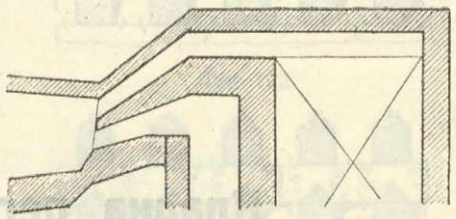
В существующих печах площадь сечения вертикальных каналов делается немного больше площади пролетов и в них, таким образом, устанавливается весьма большая скорость, на что расходуется гидростатическое давление нагретого газа и воздуха.

Полезная ли эта трата упругости газа и воздуха, или бесполезная?

Можно сказать совершенно определенно, что затрата эта совершенно бесполезна и вертикальным каналам надо давать возможно большую площадь сечения. Только при очень широких вертикальных каналах есть надежда на дне шлаковика получить отложения несомой печными газами пыли и шлаковики утилизировать в качестве пылеуловителей. Шлаковики надо делать поэтому наибольшей глубины, то-есть надо делать под шлаковика на уровне регенератора. В современных мартеновских печах делается один пролет газовый и два воздушных. Удобство конструкции требует, чтобы каждая пара регенераторов, вместе с шлаковиками, связывалась бы в один массив, который можно было бы или заключить в клепанный кожух, или удобно связать наличниками и связями.

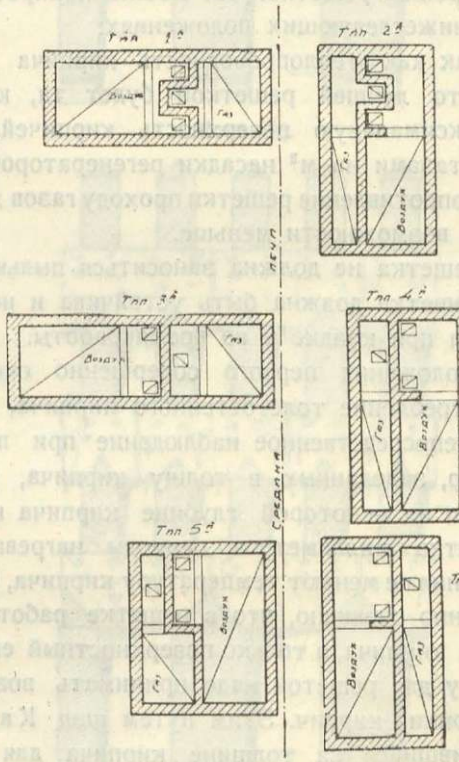
Исходя из этого положения, мы видим, что возможны шесть типов расположения каналов, шлаковиков и регенераторов, показанных на фиг. 101. По средине проведена пунктирная линия, указывающая середину печи.

Тип 1-й. Все три вертикальных канала поставлены рядом. Регенератор газовый сделан под рабочим пространством печи, воздушный вынесен.



Фиг. 100.

Шлаковики получаются очень удобной формы, но печь сильно вытянута в длину. Получается очень длинная канава, удобная для сифонной отливки мелких слитков. Недостаток этой печи: она требует удлиненной фабрики, но это можно сделать за счет уменьшения ширины фабрики и, следовательно, пролета кранов.



Фиг. 101.

Тип 2-й. Вертикальные каналы рядом, но регенераторы помещены под рабочей площадкой. Газовый шлаковик очень хорош. Хуже шлаковик

воздушный, ибо струя вертикального канала, ближайшая к воздушному регенератору, может портить работу шлаковика и в нем осаждение пыли может быть хуже, чем при другом расположении.

Длина мартеновской печи при этом расположении выходит минимальной, и здание дешевое.

Тип 3-й. Воздушные вертикальные каналы отодвинуты назад. Длина рабочего пространства печи определяется положением газовых вертикальных каналов. Шлаковики очень хороши, но печь выходит очень длинна, что может быть допущено при отливке мелких слитков в канаву за счет уменьшения ширины фабрики.

Тип 4-й. Расположение вертикальных каналов то же. Воздушный шлаковик хуже. Но печь компактнее.

Тип 5-й. Газовый вертикальный канал выдвинут назад, что делается на практике очень часто. Воздушный регенератор под рабочим пространством печи умещен быть не может и потому эта конструкция в чистом виде неудобна. На фигуре показаны регенераторы, помещенные частично под площадкой.

Тип 6-й. Очень популярная конструкция. Газовый канал выдвинут назад. Воздушные шлаковики несколько хуже типа 1-го 3-го и 5-го.

ГЛАВА XIV.

Кладка регенеративной решетки.

Число способов кладки регенеративной решетки, или насадки регенераторов, громадно. Число патентов на различную форму кирпичей настолько велико, что приводить их здесь невозможно и бесполезно. Это обилие усилий создать нечто лучшее существующего происходит вследствие весьма плохого понимания требований, которым должна отвечать хорошая решетка. Их можно конкретизировать в нижеследующих положениях:

1. Так как теплопроводность кирпича весьма плоха, то лучшей решеткой будет та, которая даст максимальную поверхность кирпичей, омываемых газами на м³ насадки регенераторов.

2. Сопротивление решетки проходу газов должно быть по возможности меньше.

3. Решетка не должна заноситься пылью.

4. Решетка должна быть устойчива и не обрушиваться при кладке и во время работы.

Из положения первого совершенно очевидно, что употребление толстостенного кирпича, не выгодно. Непосредственное наблюдение при помощи термопар, заделанных в толщу кирпича, указывает, что на некоторой глубине кирпича всего в два десятка миллиметров, периоды нагревания и охлаждения не меняют температуру кирпича, откуда совершенно очевидно, что в решетке работает не весь вес кирпича, а только поверхностный его слой и потому для решеток надо принимать возможно более тонкий кирпич. Этим путем шел Каупер, остановившийся на толщине кирпича для своих аппаратов в 50 мм. Также совершенно очевидно, что класть кирпич к кирпичу, т.-е. сдваивать толщину решетки также неразумно, как употреблять толстый кирпич.

Требование второе, чтобы решетка представляла наименьшее сопротивление проходу газов, будет удовлетворено: 1) в том случае, когда она будет иметь в свету наибольшую площадь, и 2) в том случае, когда струйки при проходе решетки будут возможно реже менять свои скорости.

Требование третье будет удовлетворено, если решетка представит наименьшую горизонтальную поверхность для осадки пыли.

При описании решетки придется указывать % поверхности решетки, который может быть утерян во время работы, вследствие покрытия его пылью.

Материалом для решеток может служить: 1) динас, 2) шамотный кирпич, 3) кирпичи, выпиленные из талькового камня.

Динас в газовых регенераторах, где железо находится в виде FeO, жадно пьет железисто-известковую пыль, впитывает ее в себя и с пылью дает черное стекло, склеивающее решетку в монолит.

В воздушных регенераторах железо остается в виде окиси и светло-бурое стекло, ею даваемое, не впитывается в динас, но тоже склеивает решетку в монолит. Пыль на шамотном кирпиче образует тягучий железистый шлак, не впитывающийся в кирпич, но заклеивающий проходы для газов в решетках. В холодных частях регенератора пыль просто скапливается и висит на стенках газовых проходов в виде сталактитов.

Сопротивление забитого пылью регенератора к концу кампании печи увеличивается все больше и больше и насадку регенератора приходится менять. Это представляет большие неудобства, поэтому, чтобы продолжать кампанию мартеновской печи, стали применять дутье.

Каменноугольные генераторы почти всегда работают на дутье, а потому, по мере засорения газовых регенераторов, дутье только усиливают. К воздушным регенераторам присоединяют вентиляторное дутье через 150—200 плавок.

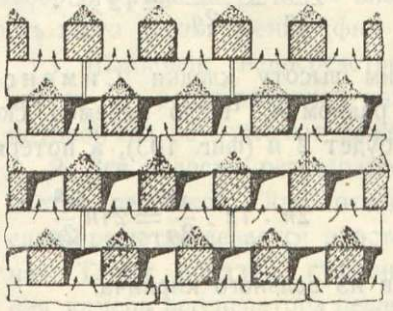
При смене насадки вертикальных регенераторов приходится ломать сверху слипшийся динас, затем слипшийся шамот и только нижние части регенератора разбираются так легко, что кирпич вынимается целым и может быть вторично положен в решетку.

При лежачих регенераторах дело упрощается. Первый куст решетки можно сделать из динаса, так как он пьет железную пыль, и так как склеенная в монолит, решетка остается чистой, то ее можно оставить, а не ломать. Перебирать можно только заднюю часть кладки решетки, где кирпич легко разбирается, так что может быть только очищен от пыли и вновь употреблен в дело. При большой емкости регенераторов на тонну садки расход на полную смену кирпича в решетках регенератора играет большую роль. При емкости пары регенераторов 6 м³ на тонну или 12 м³ в четырех регенераторах кирпича придется израсходовать на тонну вместимости около десяти тонн или 600 пудов, что составит для 50 тонной печи около 30.000 пудов, а это стоит не дешевле 10.000—15.000 руб.

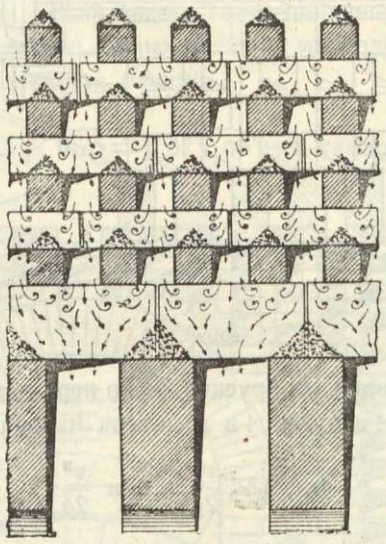
Из сказанного очевидна выгода лежачих регенераторов, при устройстве коих надо предвидеть частичную смену отдельных их секций, через специальные окна.

Сименс применял для укладки решетки вертикальных регенераторов бруски 56 × 56 × 112 мм, которые так укладывались, что каждый брусок обмывался печными газами со всех сторон. Такая укладка представляет громадное сопротивление на трение и легко заносится пылью, что видно из фиг. 102. Тогда укладка брусков была изменена, и промежуток делался против промежутка (фиг. 103). Следующий этап для уменьшения сопротивления решетки была система класть ее не из брусков, а из кирпича нормального размера 56×112×225 мм, чем было уменьшено вдвое число рядов и, следовательно, число перемен скоростей (фиг. 104).

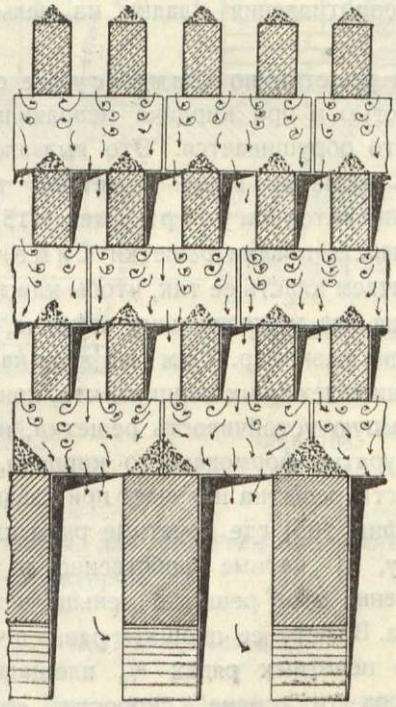
Назовем скорость движения газов, по свободной от решетки части регенератора, через v. Она будет равна об'ему протекающих по регенератору газов, деленному на полную площадь сечения регенератора. При проходе газов в первый ряд скорость эта увеличивается в 2 раза—$2v$; а при проходе из ряда в ряд увеличивается и уменьшается, колеблясь от 2 до $4v$, так как площадь регенератора в свету равна всего $^1/_4$ площади сечения регенератора. Следовательно, скорость газов, протекающих по решетке меняется от $2v$ до $4v$ столько раз, сколько рядов кирпичей, т.-е. в каждом ряде скорость должна увеличиться от $2v$ до $4v$. Предположим, что при перемене скорости от $2v$ до $4v$ теряется весь напор (см. часть II). Опыты показывают, что



Фиг. 102.



Фиг. 103.



Фиг. 104.

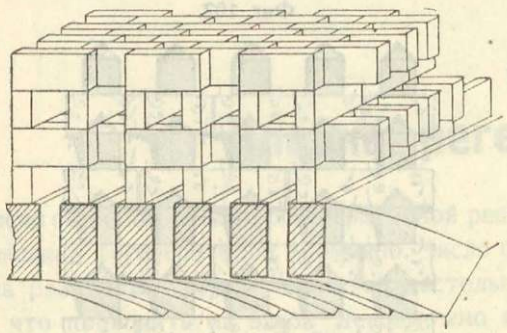
это не так, но я делаю это допущение, не имея более точных данных, и предполагая, что решетка свободна от пыли. Тогда напор, затраченный в каждом ряду, будет:

$$\frac{(4v)^2}{2g} - \frac{(2v)^2}{2g} = 12\,\frac{v^2}{2g}.$$

Выразим высоту кладки Сименса в числе кирпичей равном n. Число перемен скорости от $2v$ до $4v$ будет $2\,n$ (фиг. 103), а потеря в напоре

$$2n \,.\, 12 \,.\, \frac{v^2}{2g} = 24n\,\frac{v^2}{2g}$$

для кладки из цельного кирпича.



Фиг 105.

Для кладки из брусков число перемен скоростей от $2v$ до $4v$ будет $4n$ и потеря напора

$$4n \,.\, 12 \,.\, \frac{v^2}{2g} = 48n\,\frac{v^2}{2g},$$

т-е. сопротивление кладки из брусков в два раза больше сопротивления кладки из цельного кирпича.

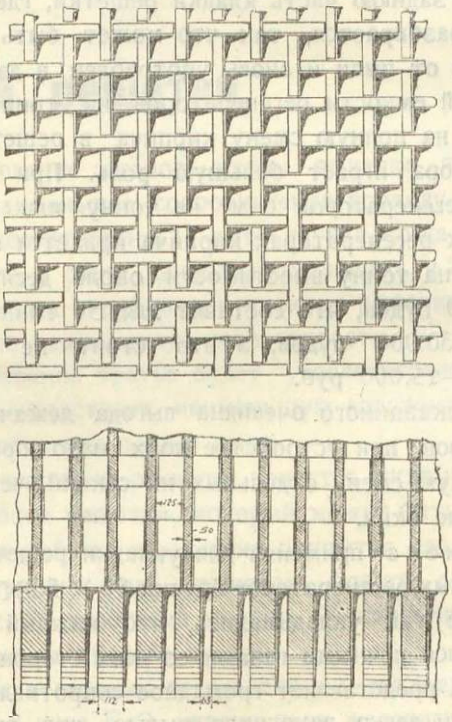
Кладка решетки по Сименсу не отличается устойчивостью и при кирпиче неправильных размеров часто обрушивается. Это вызвало правило не делать решетку выше 4 метров, тогда как решетка аппаратов Каупера бывает 15 м и выше. Неустойчивость кладки решетки Сименса об'ясняется обычаем класть ее так, чтобы каждый кирпич опирался на два нижележащих кирпича, что допускает кирпич разномер. Сименс клал каждый кирпич на 3 нижележащих кирпича, что, конечно, дает очень большую устойчивость решетки, но требует очень аккуратно формованного кирпича. Большую устойчивость решетка получает при кладке в разбежку (фиг. 105) где нечетные ряды кладутся по Сименсу, а четные собственно в разбежку. Сопротивление этой решетки меньше чем решетки Сименса. В свету ее площадь равна в четных рядах $^1/_3$, в нечетных рядах $^2/_3$ площади сечения регенератора и смена скорости совершается однажды в двух рядах от $1{,}5\,v$ до $3v$.

Сопротивление решетки в разбежку будет равно:

$$\left(\frac{(3v)^2}{2g} - \frac{(1{,}5v)^2}{2g}\right)n = 6{,}75n \,.\, \frac{v^2}{2g},$$

т.-е. в 3,5 раза меньше, чем в решетке сложенной по Сименсу из кирпича и в 7 раз меньше решетки сложенной из брусков. Из сказанного очевидна выгода кладки решетки в разбежку.

Еще меньше сопротивление решетки, сложенной по Каупер у (фиг. 106) из кирпича $300\times150\times50$. Здесь вся решетка получается из совершенно равных, с гладкими стенками, каналов со скоростью течения газов равною $2v$, ибо в свету эта решетка имеет площадь равную половине площади регенератора.



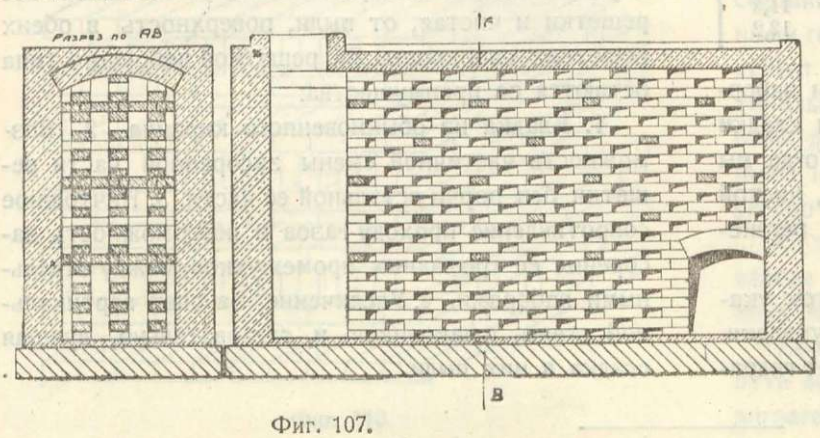
Фиг. 106.

Решетка эта заносится пылью гораздо меньше чем предыдущие. Действительно, смена скоростей протекающих газов в каждом ряду (решетка Сименса) или в каждых 2 рядах (решетка в разбежку) сопровождается превращением скорости поступательной в вихревую, при которой осадка пыли производится особенно успешно. Размер каналов в свету у Сименса 56×56 мм в разбежку 56×112 мм и у Каупера 125×125, т.-е. в отношении 1 : 2 : 5, что говорит само за себя.

Из этого короткого разбора различных систем кладки решетки регенераторов видно, какое серьезное значение имеет этот вопрос для продолжительности кампании печи.

Насадка лежащих регенераторов, сделанная по Сименсу, будет в свету равна $^1/_4$ площади се-

чения регенератора. Конус пыли уменьшит ее до $^1/_6$, со сменой скоростей четыре раза на длине одного кирпича. При кладке в разбежку решетка в свету будет в два раза больше, т.-е. $^1/_3$ полной площади; конус пыли уменьшит ее до $^1/_4$. Очевидно, эти насадки не приспособлены для лежачих регенераторов.



Фиг. 107.

Это заставило меня предложить укладывать решетку лежачих регенераторов по новому типу кирпичных заборов (фиг. 107). Устанавливая их на расстоянии $^1/_2$ кирпича друг от друга, мы получаем решетку с площадью в свету равной $^1/_2$ площади сечения регенератора, при чем эти промежутки свободны сверху до низу и, следовательно, не могут быть забиты пылью. Пыль свободно упадет на под регенератора общим слоем.

Для того, чтобы заборы не падали, их можно взаимно распереть и упереть в стены регенератора распорными кирпичами, которых можно делать больше или меньше, в зависимости от высоты регенератора и устойчивости заборов. Последняя зависит прежде всего от правильности формы кирпича.

В последнее время строятся печи на пылевидном топливе. Для этого типа печей регенераторы с насадкой заборного типа есть единственно возможный тип. Просветы в заборах, конечно, будут заноситься пылью довольно скоро и, таким образом, потерянная поверхность нагрева будет довольно велика, но этот тип насадки регенераторов даст возможность выгребать пыль из регенераторов, чего другие решетки не допускают.

Вес кладки решеток всех типов, кроме заборного, почти одинаковый; в них об'ем промежутков равен об'ему кирпича, а потому при весе 1 куб. метра кирпича 1800 кг, вес 1 м³ решетки равен 900 кг.

Решетка заборного типа из кирпича размером $225 \times 112 \times 56$ мм вмещает всего $\sim 37\%$ кирпича и имеет 63% промежутков. Из сказанного следует, что эта решетка менее выгодна, чем другие, но это неверно.

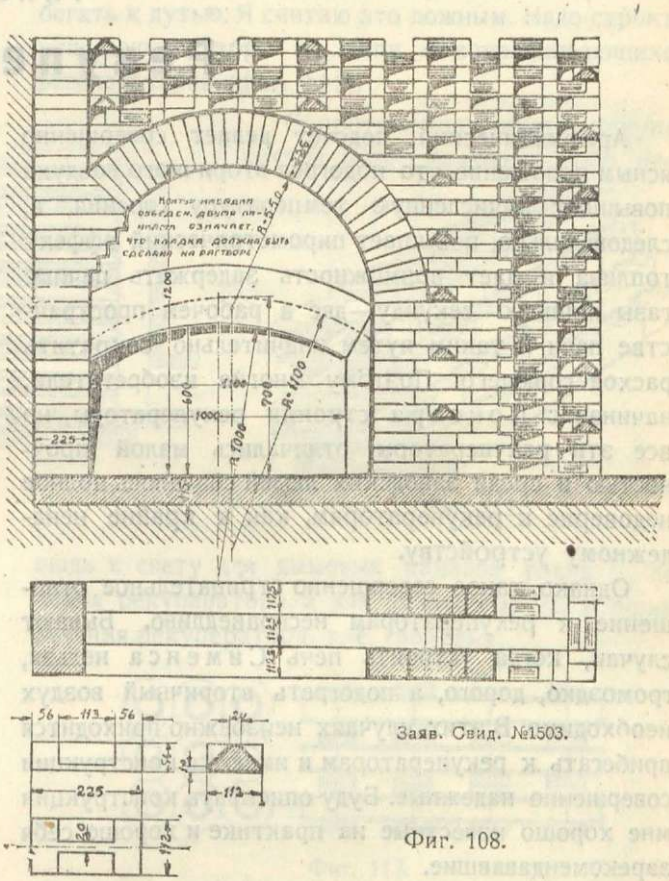
В вертикальных регенераторах над решеткой и под решеткой остаются пустые камеры, распределяющие газы по ячейкам решетки; поэтому решетка занимает не больше 75% всей емкости камеры регенератора. В лежачих регенераторах с насадкой заборного типа достигается значительная компактность всего расположения (фиг. 107).

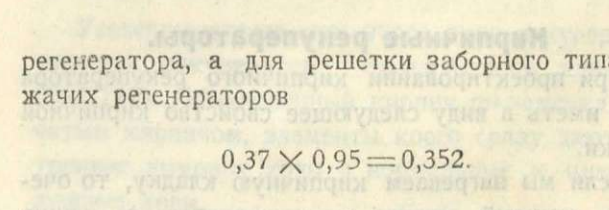
1. Шлаковик непосредственно сливается с регенеративной камерой, от которой его не отделяют даже стенкой.

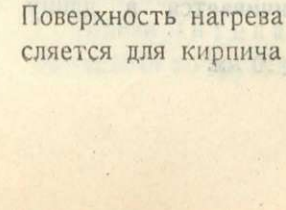
2. Вся полость регенератора заполняется решеткой. Для отвода дыма в самой решетке делается просторный канал. Таким образом, степень заполнения камеры регенератора решеткой оказывается более 95%.

Если ввести эту поправку, то для вертикальных решеток мы получим об'ем кирпича равный:

$$0{,}5 \times 0{,}75 = 0{,}375 \text{ об'ема камеры}$$







Заяв. Свид. №1503.

Фиг. 108.

регенератора, а для решетки заборного типа лежачих регенераторов

$$0{,}37 \times 0{,}95 = 0{,}352.$$

Поверхность нагрева 1 м³ кладки решетки вычисляется для кирпича $225 \times 112 \times 56$ мм:

Система решетки.	На 1 м³ кладки решетки.			Чистой поверхн. на 1 м³ полости регенер.
	Поверх. нагрева в м².	Покрыто пылью в %.	Чистой поверхн. в м².	
Сименса	22,3	10,0	20,0	15,0
В разбежку . .	17,8	8,3	17,3	13,0
Заборн. типа. .	14,8	20,0	11,9	11,3
Каупера [1]) . . .	16,2	0,0	16,2	12,2

Чтобы избежать загрязнения решетки заборного типа пылью можно применить для кладки кирпич специальной формы (фиг. 108). Тогда мы получим на 1 м³ решетки заборного типа, чистой поверхности — 14,8 м², а на 1 м³ полости регенератора 14,0 м³.

Заключение: Анализ кладки решеток указывает нам на важность выбора системы укладки. Кампания регенераторов всецело зависит от гидравлического сопротивления решетки и мы должны отдать решительное преимущество для вертикальных регенераторов решетке Каупера, а для лежачих кладке заборного типа.

При расчете 30-тонной мартеновской печи (см. V, гл. IV). сделано два варианта решеток, кауперовской и заборного типа [2]). Активный вес решетки и чистая, от пыли, поверхность в обеих решетках одинаковы. За решеткой заборного типа остаются ее преимущества:

1. Кладка из обыкновенного кирпича. 2. Возможность частичной смены засоренной части решетки без порчи остальной ее части. 3. Ничтожное сопротивление проходу газов и невозможность засорения ее громадных промежутков между отдельными заборами. 4. Увеличение, за счет вертикальной стены, шлаковиков и, следовательно, лучшая осадка в них пыли.

[1]) Размер кирпича 300 × 150 × 50 мм.

[2]) Там же см. расчет распределения печных газов между газовым и воздушным регенераторами и расчет об'емов их насадок.

ГЛАВА XV.

Рекуператоры.

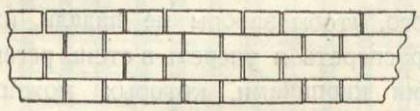
Арифметический подсчет делает совершенно ясным положение, что подогрев вторичного воздуха повышает вычисленную температуру горения, а, следовательно, повышает пирометрический эффект топлива и дает возможность задержать печные газы лишнюю секунду—две в рабочем пространстве печи и таким путем значительно сократить расход горючего. Поэтому многие изобретатели, начиная с Понсара строили рекуператоры, но все эти рекуператоры отличались малой прочностью и среди заводских людей создалось полное недоверие к рекуператорам, как к крайне ненадежному устройству.

Однако, такое совершенно отрицательное отношение к рекуператорам несправедливо. Бывают случаи, когда устроить печь Сименса нельзя, громоздко, дорого, а подогреть вторичный воздух необходимо. В этих случаях неизбежно приходится прибегать к рекуператорам и имеются конструкции совершенно надежные. Буду описывать конструкции мне хорошо известные на практике и хорошо себя зарекомендававшие.

Кирпичные рекуператоры.

При проектировании кирпичного рекуператора надо иметь в виду следующее свойство кирпичной кладки.

Если мы нагреваем кирпичную кладку, то очевидно каждый кирпич увеличивается в длину. Удлиняясь, он толкает соседа и кладка раздается в стороны. При охлаждении кирпичи сжимаются и в швах получается зазор (фиг. 109).

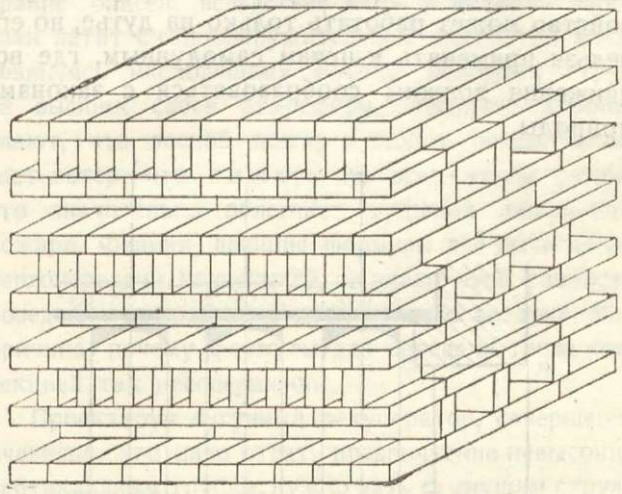


Фиг. 109.

Замечательно, что при следующем нагревании зазор этот не служит для расширения и не закрывается. Трение кирпича по кирпичу так велико, что при вторичном нагреве кладка вновь раздается в стороны и зазоры при вторичном охлаждении в швах увеличиваются. Чем больше нагреваний и остуживаний претерпела печь, тем шире зазоры в швах. В печи появляются трещины и, несмотря на арматуру, печь разваливается. Посмотрите на старые печи. Арматура, поставленная вертикально, косится, кривится и стены печи, наконец, настолько выходят из вертикального положения, что печь перекладывается под страхом ее разрушения.

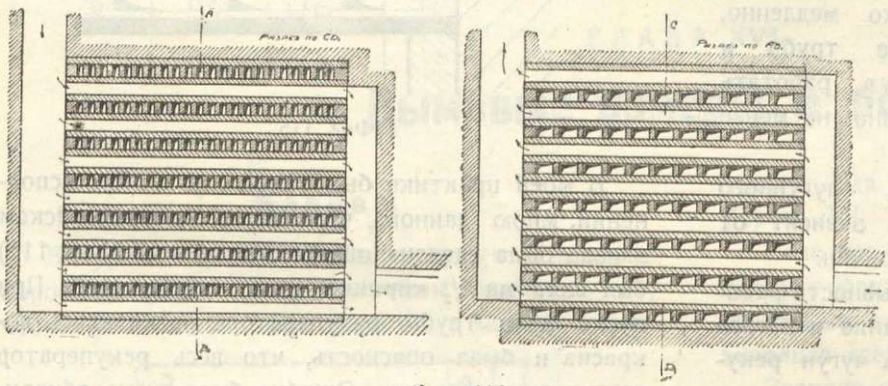
Если так щелится сплошная кладка, то что же сказать о решетке, где теплота от дымовых ходов должна передаваться воздушным каналам. Очевидно, такая решетка вся разобьется трещинами и гер-

метичность воздушных каналов нарушится, а следовательно, теплый воздух попадает не в печь, а в дымовую трубу и печь перестанет работать.



Фиг. 110.

Вот рассуждение совершенно верное и основанное на опыте. Однако, если хорошенько продумать сказанное выше, то мы приходим к выводу, что щели появляются и увеличиваются только в



Фиг. 111.

вертикальных швах. В горизонтальных швах появившаяся щель не увеличивается, ибо тут кирпич лежит на кирпиче и движение одного кирпича по другому происходит под вертикальным давлением веса кладки. Итак, в предыдущем рассуждении мы должны сделать поправку, «при повторных нагревах и остуживании кирпичной кладки вертикальные швы раскрываются, появляются постепенно увеличивающиеся вертикальные щели».

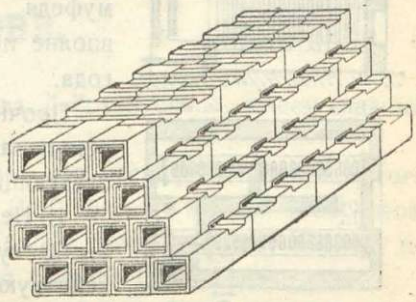
Следовательно, если вы хотите создать рекуператор, то вы должны принять меры, чтобы раскрытие вертикальных швов не нарушило бы его герметичности. Эта задача решается конструкцией фиг. 110. Здесь дымовые каналы и каналы подогреваемого воздуха горизонтальны и расположены слоями. Начнем снизу. Первый слой дымовых горизонтальных каналов, идущих вдоль чертежа, каналы размеров 168×112 мм. Над ним расположен слой воздушных горизонтальных каналов нормально к чертежу и под углом 90° к дымовым. Размеры каналов 56×112 мм. Засим опять слой дымовых, слой воздушных и т. д.

Если вы хорошо продумаете эту решетку, то увидите, что вертикальные швы, которые могли бы соединить дым и воздух, перекрыты горизонтальными герметичными швами и потому раскрытие их не делает кладку не герметичной. Не прикрытые вертикальные швы существуют только между соседними дымовыми каналами, или соседними воздушными каналами. Они могут раскрываться сколько угодно и это делу не повредит.

С таким рекуператором работал в Выйском заводе много лет шплейзофен, спроектированный инж. И. П. Залесским.

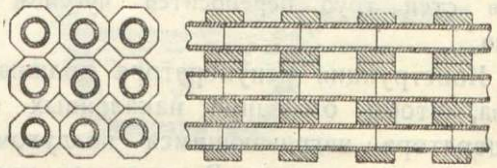
Почти всегда, устраивая такой рекуператор, путь воздуха и газа удлиняют, делая несколько зигзагов и пуская струю воздуха и газа навстречу друг другу. В результате сопротивление рекуператора делается столь огромно, что приходится прибегать к дутью. Я считаю это ложным. Надо строить эти рекуператоры по типу самоуравнивающихся регенераторов (фиг. 111).

Сопротивление такого рекуператора будет ничтожно, ибо пло-



Фиг. 112.

щадь в свету для дымовых каналов равна $^1/_4$ сечения рекуператора, а для воздушных $^1/_6$ площади сечения рекуператора, т.-е. громадна.



Фиг. 113.

Усовершенствованием этого типа рекуператора является рекуператор Германсена или Ифе (фиг. 112). Обыкновенный кирпич он заменил трубчатым кирпичом, элементы коего сразу дают внутренние дымовые ходы и нормальные к ним воздушные ходы.

В печи Питцка (Pitzk) рекуператор (фиг. 113) был сделан из трубчатых кирпичей, вкладывающихся

один в другой. Судя по тому, что печь эта удерживалась в работе в з. Witkowitz в продолжение двух десятилетий, надо думать, что рекуператор этот достаточно прочен. Подобный рекуператор сделан мною в Ленинградском Арсенале и работал благополучно.

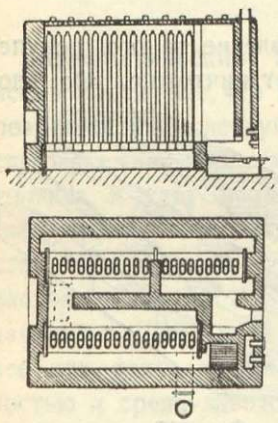
Чугунные рекуператоры.

Теплопроводность, т.-е. количество тепла, проходящее через 1 м² в час от одной поверхности материала к другой, удаленной от первой на 1 м при 1° С разности температур обоих поверхностей равна

для кирпича 0,70 кал.
„ чугуна 40,0 „

т.-е. для чугуна в 57 раз больше, чем для кирпича. Это делает употребление чугуна для воздухонагревателей, в виде тонких отливок, очень выгодным.

Правда, под влиянием печных газов, содержащих в своем составе кислород, чугун окисляется, но это окисление происходит настолько медленно, что чугунные трубы и муфеля могут работать вполне исправно не менее года.



Фиг. 114.

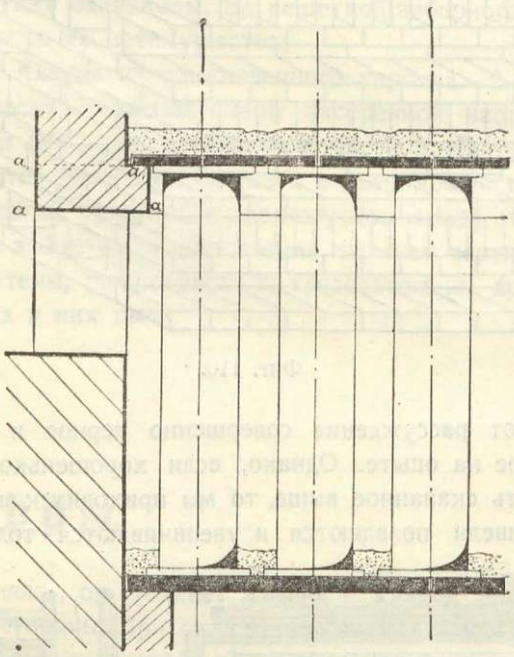
Прочность чугунного рекуператора зависит от следующих причин.

1. Непрерывности работы. Остуживание и нагрев действуют на чугун рекуператора вредно.

2. Нагревать воздух выше 400° в чугунных рекуператорах не следует; нагрев чугунных труб до температуры 700° С переносится довольно благополучно[1]). Более высокий нагрев стен труб переносится чугуном очень трудно.

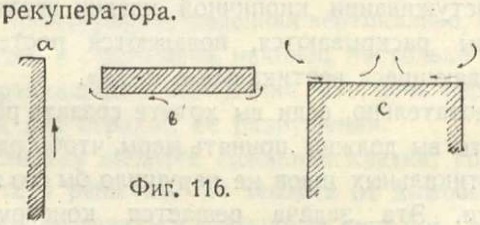
3. Конструкция рекуператора должна быть такова, чтобы омывание накаленных стенок рекуператора нагревающимся воздухом шло непрерывно и энергично. Рекуператор, имеющий в своей конструкции мешки горячего воздуха, может хорошо работать только при энергичном принудительном движении дутья.

Например, в воздухонагревателе для домен типа з. Bessège (фиг. 114) верх трубы представляет мешок горячего воздуха. Пленка раскаленного воздуха снимается с раскаленной поверхности трубы только принудительным движением воздуха из воздуходувной машины, сдувающей горячие струйки вниз, когда они стремятся, вследствие своего меньшего веса, подняться кверху. Это устройство может работать только на дутье, но его нельзя применять к печам самодувным, где все движения должны сообразоваться с законами природы.



Фиг. 115.

В моей практике был такой случай. При исполнении, мною данного, чертежа в Адмиралтейском заводе была сделана ошибка: пролет a (фиг. 115) был взят на $^1/_2$ кирпича ниже верха труб. При пуске печи трубы рекуператора раскалились докрасна и была опасность, что весь рекуператор сгорит в два-три дня. Ошибка была мною обнаружена. Печь остановлена и пролет перенесен в положение $a_1 a_1$, после чего печь благополучно пущена и проработала без ремонта много месяцев. Рекуператор нагревался не выше 500° С. Об'яснение просто: пролет a_1 снимает с поверхности чугунных досок и верха труб все теплые струйки нагреваемого воздуха и, таким образом, энергично студит верх рекуператора.



Фиг. 116.

Когда проектируется рекуператор, надо учитывать разницу в конвекции в зависимоси от положения горячей стенки. Стенка вертикальная (фиг. 116-*a*) студится прекрасно; стенка горизонтальная, обращенная лицом книзу, (*b*) студится при

[1]) Чугунный муфель в Путиловском заводе работал в печи для закалки непрерывно 14 месяцев.

значительных ее горизонтальных размерах—довольно скверно; стенка (*c*) студится еще хуже. Авиаторы хорошо знают, что перелет в тропиках днем крайне опасен, вследствие «ям», в которых аэроплан летит с головокружительной быстротой вниз, повинуясь нисходящему потоку холодных струй из высших слоев атмосферы. Лесничие хорошо знают, что лесной пожар в тихую погоду вызывает ветер «на пожар» по всем углам румба, что значительно облегчает тушение напольного пожара. Физики, дающие формулы для вычисления теплопередачи конвекцией, не знают этой разности поведения различных струек теплого воздуха. Вот причина, почему формулы для передачи тепла конвекцией так несовершенны.

Проектируя чугунный рекуператор, совершенно очевидно, что надо отдать предпочтение невысоким вертикальным трубам; нужно дать стынущим струям печных газов нисходящее направление, а нагревающимся струйкам воздуха направление восходящее. Так именно спроектирован чугунный рекуператор печей Моргана (см. часть II), представляющий прекрасную очень дешевую и прочную конструкцию, которую я смело рекомендую читателям.

Для расчета поверхности рагрева рекуператора, можно пользоваться табличкой проф. И. А. Тиме из справочной книги Горных инженеров (изд. 1879 г., стр. 202), которая может дать приблизительное представление о температуре воздуха, которую можно ждать от рекуператора.

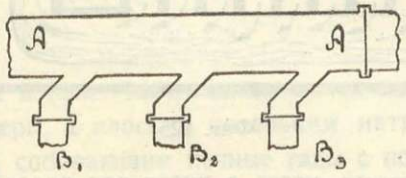
Температура нагретого воздуха в ° С.	Нагревательная поверхность труб на 1 м³ воздуха, поставленного в 1 мин. в м².
150°	0,6
250° до 300°	0,75 до 1
300° „ 350°	1 „ 1,5
400° „ 500°	3 „ 3
„ 600°	„ 5 м²

ГЛАВА XVI.

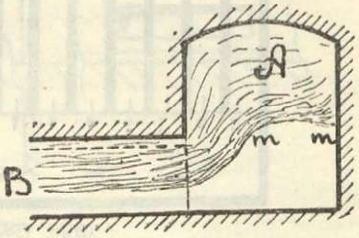
Дымовые камеры и борова.

Борова.

В курсах паровых котлов пишут, что дымовые борова должны быть присоединены к главному так, чтобы не мешать один другому, и потому рекомендуется вводить их в дымовой боров под острыми углами. Например, на фиг. 117 указан общий боров AA, в него должен собираться дым от боровов B_1, B_2 и B_3, подведенных под острыми углами по пути движения печных газов. Такой способ присоединять печные газы не всегда удобен, ибо требует очень много мест и потому с удобством может быть заменен более компактным присоединением под прямыми углами, но на



Фиг. 117.

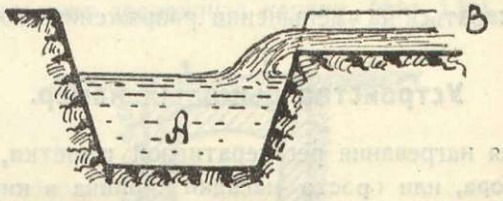


Фиг. 118.

уровне пода борова. Действительно, имеем главный боров AA.

Если мы сделаем его несколько выше, чем того требует формула И. Г. Есьмана для газосливов, то печные газы будут течь по этому борову, не заполняя всего его сечения (фиг. 118).

Зеркало этой газовой реки будет на уровне mm, под нею же будет слой неподвижного газа. Подводя на уровне пода боровки BB, B_1 B_1 и т. д. мы не делаем никакой помехи освобождению их от печных



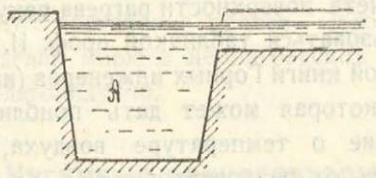
Фиг. 119.

газов,—а они один другому мешать, конечно, не могут. Чтобы это было нам совершенно ясно, представим себе магистральный канал с водой AA и побочный BB (фиг. 119).

При таком устройстве очевидно канал BB всегда будет отдавать свою воду совершенно свободно.

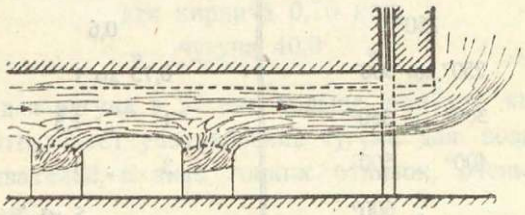
Он не может быть «подперт» или «подпружен» водой канала AA. Это может случиться только

тогда, когда уровни воды в BB и AA совпадут (фиг. 120).



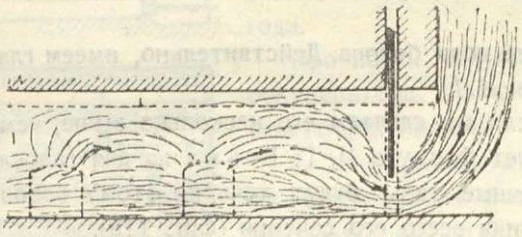
Фиг. 120.

Поэтому, если мы собираем в один магистральный боров различные струи дыма, то надо сделать в месте сбора его несколько глубже, чего требует формула И. Г. Есьмана, и подвести все эти струи на уровне пода. Отчетливая работа бо-



Фиг. 121.

рова совершенно этим обеспечивается, при том однако условии, что дымовая заслонка у дымовой трубы поднята (фиг. 121) на всю высоту, а регулировка тягой производится при помощи заслонки у самой печи или котла.



Фиг. 122.

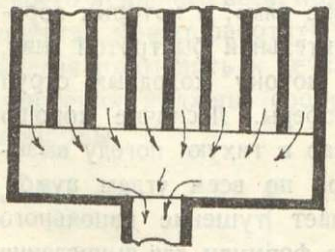
Если опустить заслонку у пня дымовой трубы, (фиг. 122), то газовая река окажется подпруженной и вредное влияние этой подпруды может сейчас же сказаться на уменьшении разряжения в боровах.

Устройство дымовых камер.

Для нагревания регенеративной решетки, рекуператора, или просто насадки кирпича в кирпичеобжигательной печи поток пламени делится на нисходящие струйки, которые собираются затем в дымовой камере и удаляются в дымовую трубу. Каково должно быть устройство дымовой камеры, чтобы холодная струйка, не задерживаясь, попала бы в дымовую трубу, а горячая заняла бы ее место?

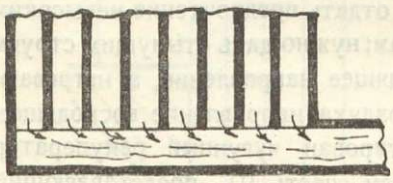
Имеем регенератор мартеновской печи. Какое устройство должно быть дано дымовой камере, чтобы отработавшие печные газы равномерно удалялись бы из нее и чтобы дымовая камера способствовала бы равномерной работе решетки.

Идеально решается этот вопрос конструкцией, фиг. 123. Тут струйки, пройдя решетку, успокаиваются в дымовой камере. Холодные попадают на дно и тотчас уходят в дымовую трубу. Горячие задерживаются и задерживают газы в соответствующей клетке решетки. Решетка самоуравнивает свою температуру.



Фиг. 123.

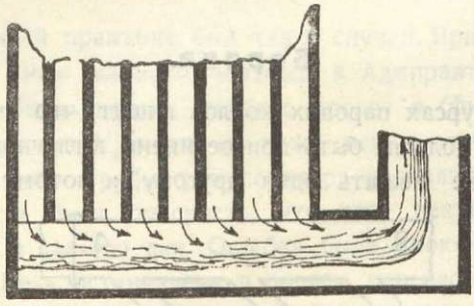
На фиг. 124 дымовая камера отсутствует. Ближайшие ячейки работают, функционирование остальных затруднено.



Фиг. 124.

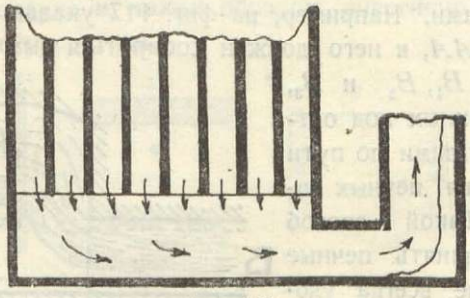
Фиг. 125 — дымовая камера существует, но устроена неправильно и работает плохо. На поду есть мешочек газов, занимающий без пользы место.

Фиг. 126 исправленный случай фиг. 125. Камера та же, но приняты меры, чтобы газы собирались в дымовой боров с пода, т.-е. дано преимущество остывшим струйкам.



Фиг. 125.

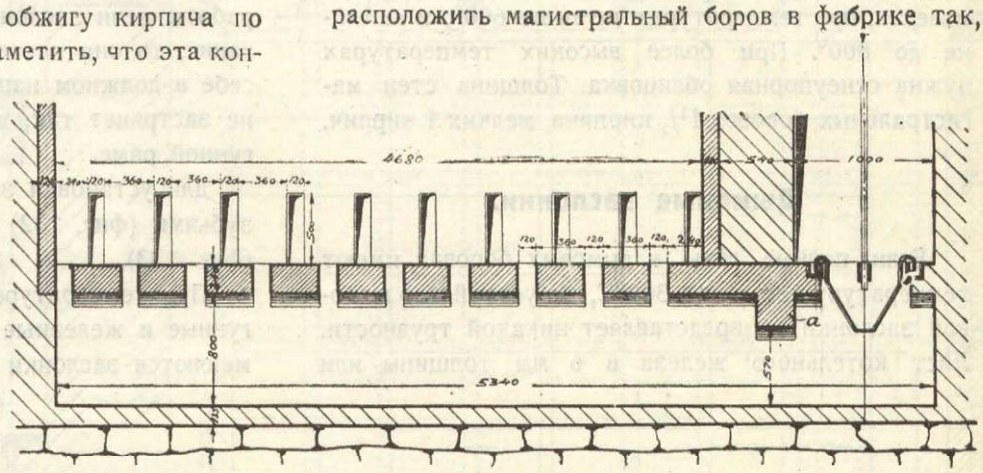
В то время, когда я писал это рассуждение, я вспомнил свой проект 16 камерной печи для обжига шамотного кирпича. Дымовая камера была



Фиг. 126.

сделана без занавески a (фиг. 127). Это, конечно, ошибочно. Рассчитываю высоту газовой реки, при температуре 200°С. Высота по формуле Есьмана опре-

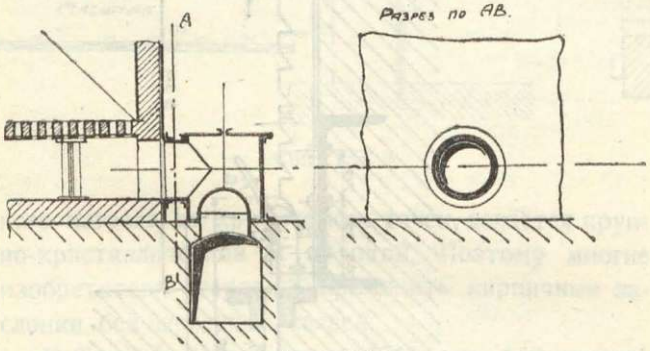
делилась в 560 мм. Очевидно, для правильности работы дымовой камеры я должен ввести арку *a* в один кирпич (фиг. 127). Это стеснение выхода дыма увеличит работу дымовой трубы, но будет способствовать равномерному обжигу кирпича по длине всей камеры. Должно заметить, что эта конструкция дымовой камеры оказалась потому ложной, что дым отводится кверху. Обычно дымовая заслонка поднятая не на всю высоту, прижимает струю дыма к поду и улучшает работу дымовой камеры.



Фиг. 127.

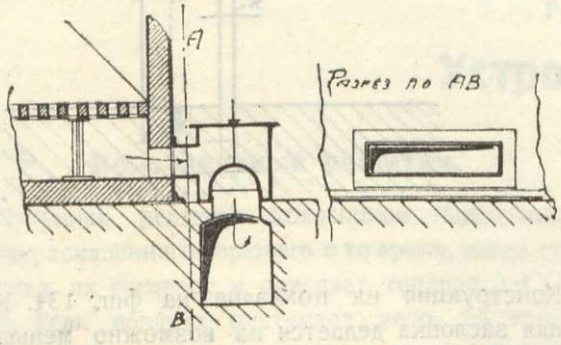
В регенераторах печи Сименс-Мартена перекидные клапана берут дым кверху и в дымовых камерах регенераторов надо остерегаться делать ошибку подобную сделанной.

В последние годы, для улучшения работы кауперовских аппаратов из дымовой камеры их проводят два и даже три патрубка. В этом нет надобности, нужно только дым отводить не круглым



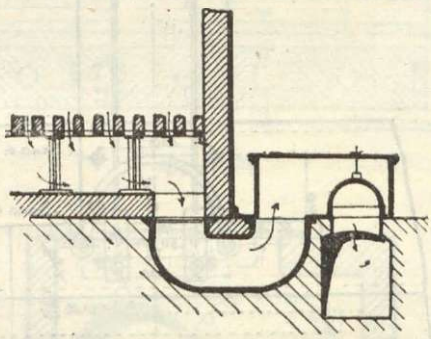
Фиг. 128.

отверстием *a* (фиг. 128), равным почти высоте дымовой камеры, а плоским низеньким натрубком *b* (фиг. 129), собирающим печные газы с пода аппарата, или еще лучше конструкция фиг. 130.

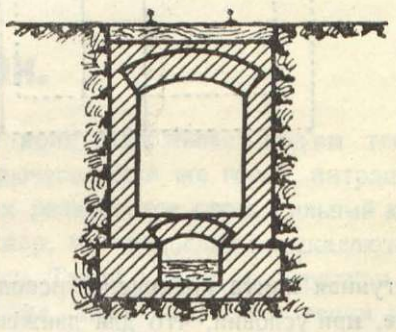


Фиг. 129.

При проектировании фабрик проекту боровов уделяется очень мало места. О них не думают, и совершенно неправильно. Расположение магистральных боровов определяет вид фабрик, при всех ее многочисленных перестройках за время ее существования, и правильная планировка боровов имеет существенное значение. Поставим себе вопрос, как расположить магистральный боров в фабрике так, чтобы к нему был свободный доступ, и так, чтобы он никогда не помешал постановке машин, печей и т. п. устройств. Для такого помещения борова имеется в фабрике одно место—это направление ж.-д. пути, по которому подаются и вывозятся из


Фиг. 130.

фабрики материалы. Этот путь никогда не будет застроен; боров, расположенный под путем, всегда будет иметь доступ. Если под магистральным боровом сделают дренажную канаву, (фиг. 131), если


Фиг. 131.

в такой имеется надобность, то этим решается и второй вопрос о канализационной сети, которая должна удовлетворять тем же условиям.

На случай чистки борова его выгодно иметь высотой в рост человека (1700) и шириной около 700 м.

Класть борова надо из красного кирпича на извести, при температурах не выше 600°, и на глине до 800°. При более высоких температурах нужна огнеупорная облицовка. Толщина стен магистральных боровов $1^1/_2$ кирпича, мелких 1 кирпич.

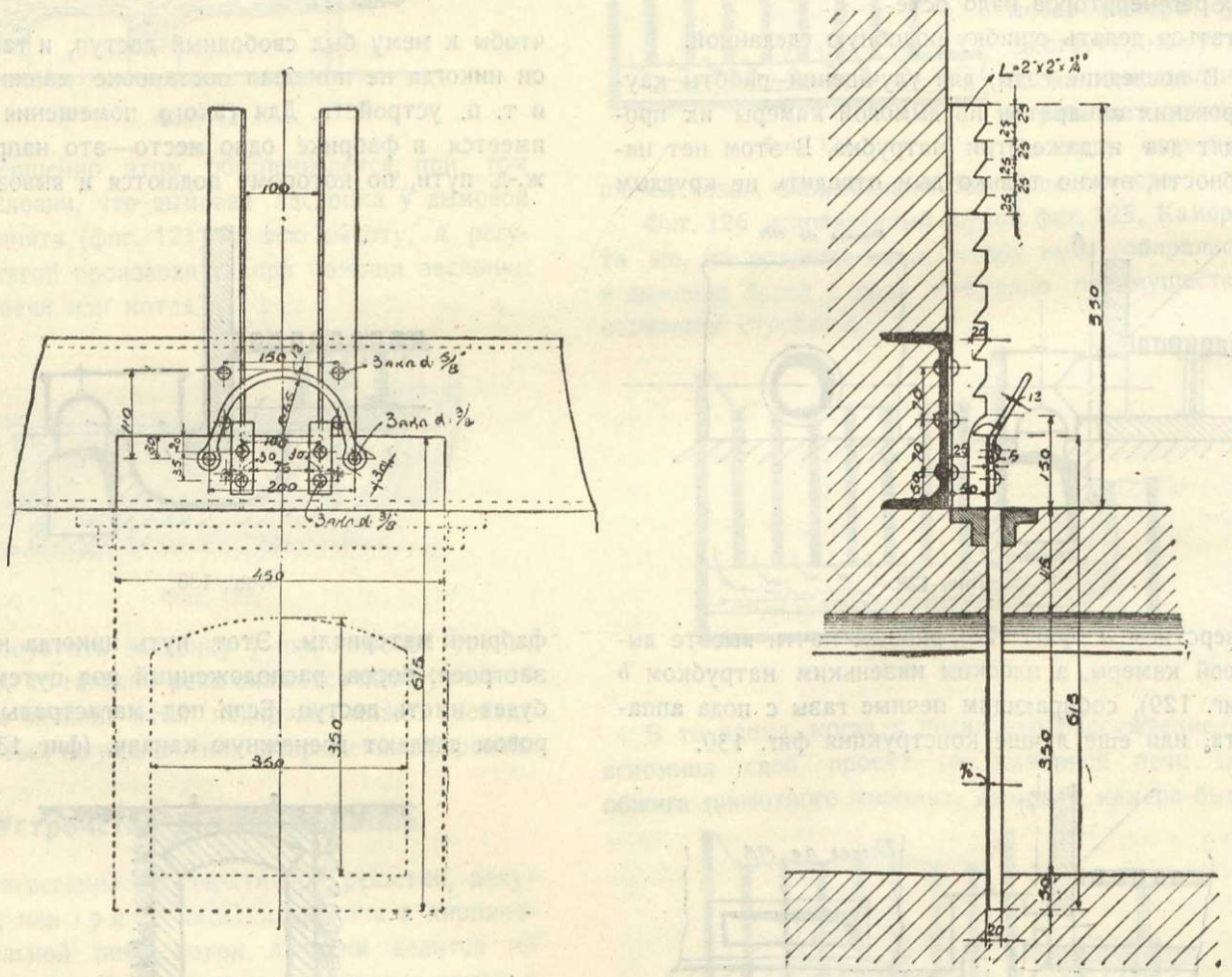
Дымовые заслонки.

Если печные газы в дымовых боровах имеют температуру не выше 300°С, то устройство дымовой заслонки не представляет никакой трудности. Лист котельного железа в 6 мм толщины или тонкая чугунная плита прекрасно исполняют это назначение, при условии, что для движения их не будет вложена в кладку чугунная рама с пазами, как это обыкновенно принято.

Такое устройство никуда не годится. Обыкновенно эту раму ведет в одну сторону, заслонку в другую и движение заслонки делается невозможным. Железная или чугунная заслонка должна двигаться в пазах выложенных из кирпича во время кладки борова (фиг. 132 и 133). Если во время работы печи заслонку начнет коробить от нагревания, то она постепенно при движении разотрет себе в должном направлении этот паз, но никогда не застрянет так, как застревает заслонка в чугунной раме.

Для установки заслонки применяется скоба с зубьями (фиг. 132) или просто колонка с грузом (фиг. 133).

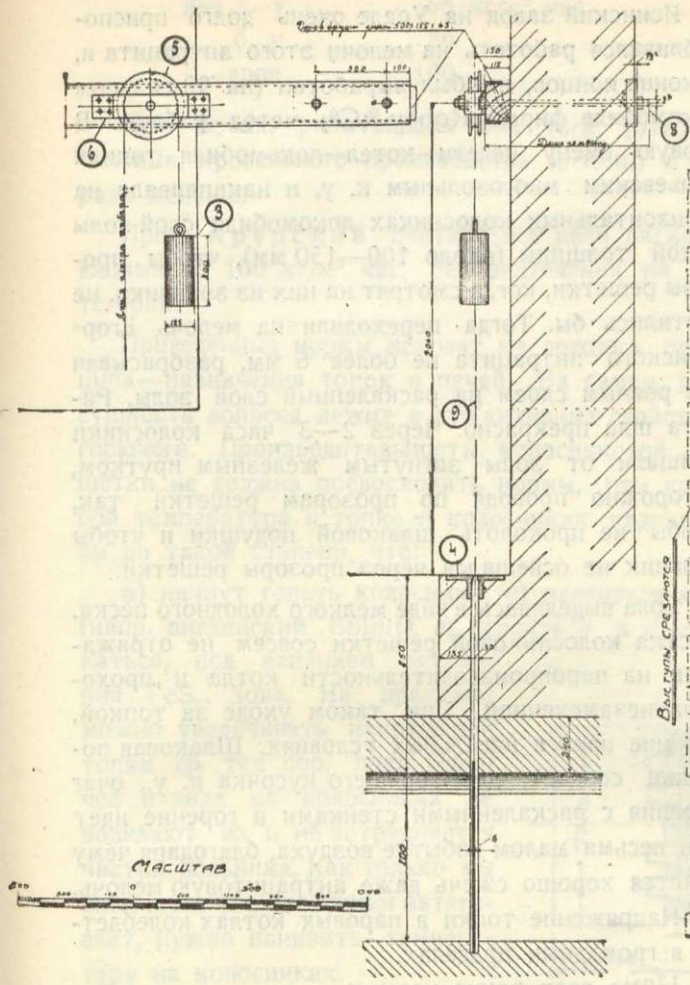
При температуре дыма выше 600—700°С чугунные и железные заслонки недолговечны и применяются заслонки кирпичные.



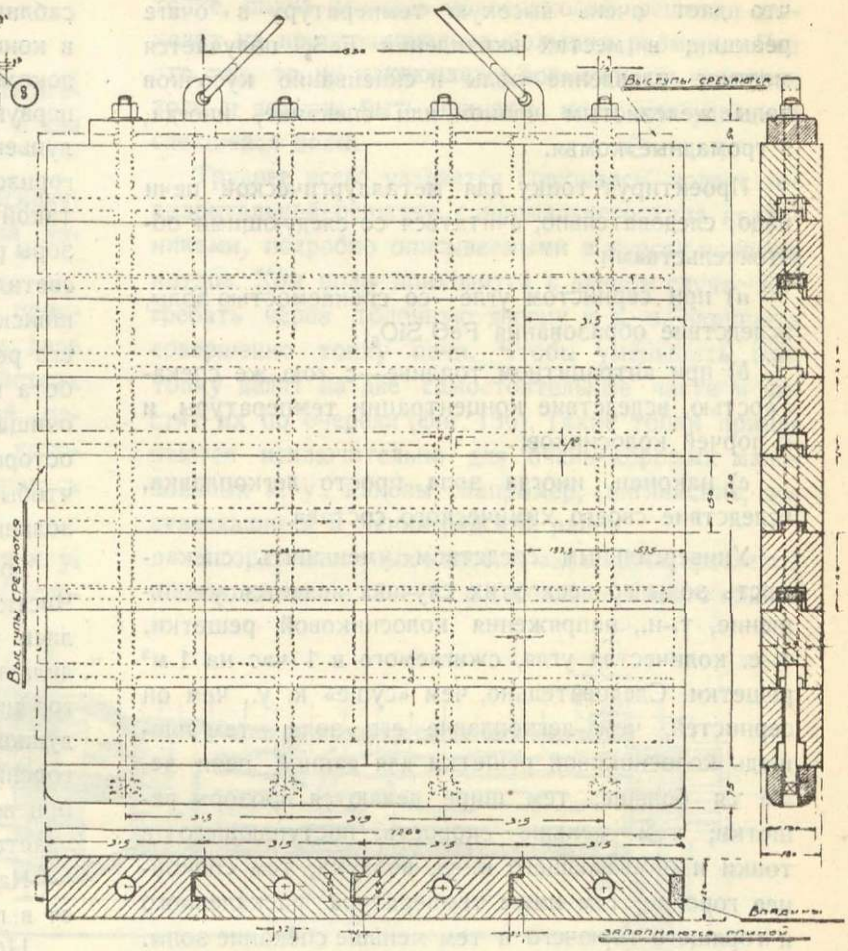
Фиг. 132.

Конструкция их показана на фиг. 134. Кирпичная заслонка делается из возможно меньшего числа отдельных камней, скрепленных потайными железными связями.

Однако такие заслонки не прочны. Мы знаем, что железная связь не выдерживает продолжитель-



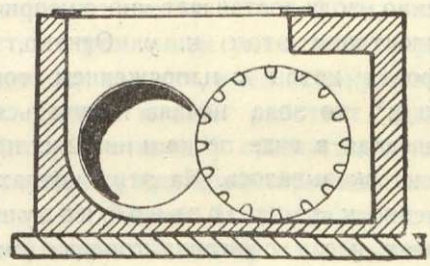
Фиг. 133.



Фиг. 134.

ного нагрева до критических точек, делается крупно-кристаллической и хрупкой. Поэтому многие изобретатели старались применить кирпичные заслонки без железных связей.

В Tonindustrie-Zeitung 1911 стр. 162 предложена круглая перекатываемая заслонка (фиг. 135), в которой нет железных частей. Для небольших боровков эту идею можно использовать.



Фиг. 135.

ГЛАВА XVII.

Устройство топок.

Колосниковые решетки.

Чугунная решетка колосников поддерживает куски раскаленного горючего в то время, когда струя воздуха их омывает и окисляет топливо в CO_2 и H_2O. Если воздуха поступает мало, то горение идет замедленным темпом, потери на лучеиспускание увеличиваются, температура очага горения подымается не так высоко, чтобы раскалять колосники, и последние служат долго. То же происходит, если горючее содержит много летучих, выделение коих задерживает под'ем температуры кусков горючего. Если же горит антрацит, то на колосниках развивается столь сильный концентрированный жар, что колосники раскаляются и даже оплавляются. Такой под'ем температуры на колосниках, кроме порчи их, имеет своим следствием плавление и спекание золы в громадные комья, удалять кои бывает чрезвычайно копотно и тяжело для рабочих. Чем сернистее горючее, тем легче получаются комья спекшейся золы, что чрезвычайно просто об'ясняется термичностью реакции:

$FeS_2 + 2{,}5O_2 + SiO_2 = FeO\,SiO_2 + 2SO_2 + 180.893$ кал, что дает очень высокую температуру в очаге реакции; в местах вкраплений FeS_2 получается местное плавление золы и склеивание кусочков золы железистым шлаком или спекание, иногда, в громадные комья.

Проектируя топку для металлургической печи надо, следовательно, считаться со следующими обстоятельствами:

a) при сернистом угле—со спекаемостью золы, вследствие образования $FeO\,SiO_2$;

b) при антрацитном топливе—с тою же спекаемостью, вследствие концентрации температуры, и с порчей колосников;

c) наконец, иногда зола просто легкоплавка, вследствие своего химического состава.

Универсальным средством уменьшить спекаемость золы во всех этих случаях является уменьшение, т.-н., напряжения колосниковой решетки, т.-е. количества угля, сжигаемого в 1 час на 1 м² решетки. Следовательно, чем «суше» к. у., чем он сернистей, чем легкоплавче его зола,—тем площадь колосниковой решетки для данной печи делается больше; тем шире делаются прозоры решетки; тем меньше скорость, поступающего в топки и обмывающего к. у., воздуха; тем спокойнее горение; тем ниже температура раскаленного и горящего горючего и тем меньше спекание золы. Мне пришлось иметь дело с Луньевским к. у., содержащим до 3—5% серы и до 25—40% золы. Обыкновенно, зола доставляет много неприятностей при эксплоатации этого к. у. Однако, когда я спроектировал котлы с напряжением топки равным 50 кг/м², то зола начала получаться совершенно холодная в виде песка и никаких признаков спекания не оказывалось. На этих котлах удалось вести горение к. у. на зольной подушке, что представляет идеал сжигания топлива (см. ниже). Чем менее напряжена топка, тем легче в ней получить горение к. у. с малым избытком воздуха. Поэтому, я всегда рекомендую делать решетку металлургических печей, как можно больше. Я не раз сетовал на себя за малую площадь решетки и не раз увеличивал ее в работавших печах. Но ни разу не досадовал на себя, что сделал площадь сечения слишком большой. При очень большой площади решетки я переходил на самую приятную работу на шлаковой подушке.

На Урале существует горючее, о котором очень много говорят и пишут, но употребляют которое чрезвычайно неохотно. Это Егоршинский антрацит. По составу он прекрасен, малосернист, малозолен, но мелок игольчатого сложения и трескается в жару.

Исинский завод на Урале очень долго приспосабливался работать на мелочи этого антрацита и, в конце концов, им был выработан (на 90-сильном локомобиле фирмы Robey &C°) метод работы. В первую смену недели котел локомобиля топили луньевским многозольным к. у, и накапливали на горизонтальных колосниках локомобиля слой золы такой толщины (около 100—150 мм), чтобы прозоры решетки, когда смотрят на них из зольника, не светились бы. Тогда переходили на мелочь Егоршинского антрацита не более 6 мм, разбрасывая его ровным слоем на раскаленный слой золы. Работа шла прекрасно. Через 2—3 часа колосники очищали от золы загнутым железным прутком, осторожно проводя по прозорам решетки так, чтобы не проколоть шлаковой подушки и чтобы зольник не освещался через прозоры решетки.

Зола выделялась в виде мелкого холодного песка. Чистка колосниковой решетки совсем не отражалась на паропроизводительности котла и проходила незамеченной. При таком уходе за топкой, горение идет в идеальных условиях. Шлаковая подушка создает, для горящего кусочка к. у., очаг горения с раскаленными стенками и горение идет при весьма малом избытке воздуха, благодаря чему удается хорошо сжечь даже антрацитовую мелочь.

Напряжение топки в паровых котлах колеблется в громадных пределах.

Hütte дает такие нормы:

Горение очень медленное . .	40 — 50	кг/м² час.
„ медленное	50 — 70	„
„ нормальное	70 — 100	„
„ усиленное (локомобили)	100	„
Пароходные котлы с естественной тягой . . .	85 — 95	„
То же среднее дутье	130 — 140	„
Паровозы	350 — 500	„

Gruner (Т. I стр. 227) в своей металлургии, для печей дает такие нормы:

Для обжига сернистых руд .	15 — 40	кг/м² час.
Для постоянных паровых котлов	40 — 100	„
Печи для спекания и плавки свинцовых руд	60 — 80	„
Печи для плавки медных руд	75 — 150	„
Пудлинговые печи	100 — 150	„
Сварочные печи	150 — 200	„
Горна для стали	200 — 400	„
Топки паровозов	400 — 500	„

Немецкая строительная фирма Эрнст Шматола при проектах своих печей рекомендует расход топлива при естественной тяге:

для к. у. . . . . 66 кг/м² час.
„ „ б. у. . . . . 80 „
„ дров . . . . 100 „

При печах, работающих без тяги (отжигательные, кровельного производства и т. п.) в два раза меньше.

Проф. Крупский считает все печи расходующими по 100 кг/м² час, без разделения на категории.

Приведенные нормы исходят из ложного принципа—назначения топок и печей. На самом деле сущность вопроса лежит в суб'ективных свойствах горючего. Производительность колосниковой решетки не должна превосходить нормы, при которой температура в топке и колосниках поднялась бы до такой степени, что:

a) начнут гореть колосники, *b*) плавиться к. у. (напр. английский Splint), *c*) плавиться и *d*) спекаться, под влиянием окисления FeS_2, зола. На практике можно увеличивать напряжение топки до тех пор, пока горючее и зола на колосниках не заливают их и не затрудняется чистка зольника. Как только мы замечаем, что колосники затягивает, нужно понизить температуру на колосниках.

Этого можно достигнуть следующими путями:

a) наливая под колосники воду или вводя пар в дутье и используя реакцию

$$H_2O_{пар} + C = H_2 + CO - 28.330 \text{ кал},$$

b) уменьшая напряжение колосниковой решетки,

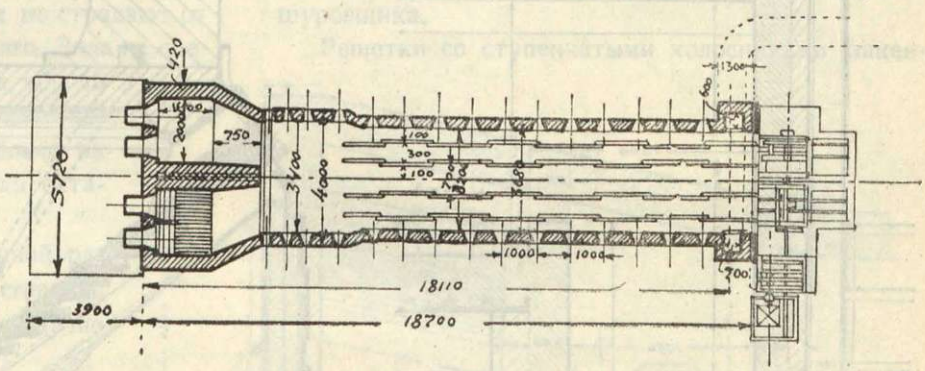
c) при столь жирных к. углях, как Splint, заливающий колосники и плавящийся на них, рекомендуются генераторные топки, с сильно развитой зоной сухой перегонки. Жирные угли, пройдя ее, лишаются главной массы летучих веществ, и горят на колосниках гораздо спокойнее.

Из сказанного ясно, почему печь, хорошо работавшая на одном горючем, работает плохо при переходе на другой сорт и почему вопрос о топке является для проектирующего самым трудным вопросом проекта.

Казалось бы, выход из этого простой: надо давать малое напряжение в топке и тем вопрос решается. Действительно, имеется категория печей, где вопроса этого не существует; таковы все печи для термической обработки, кирпичеобжигательные и т. п. печи малой мощности. Напротив того, для печей большой мощности, каковы, например, печи для нагрева слитков, расход горючего так велик, что поневоле приходится давать большое напряжение топке, иначе площадь колосниковой решетки выходит не пропорционально больших размеров. Раз это так, то не исключается возможность спекания золы и должны быть приняты меры для удаления спекшейся золы.

Труднее всего удаляется спекшаяся зола с горизонтальной решетки с нормального типа колосниками, подробно описываемыми в курсах паровых котлов. Ком золы приходится в данном случае выгребать через топочную дверцу и т. о. нарушать совершенно топку печи. Чтобы уменьшить зло, топку делят на две самостоятельные части и чистят их по очереди (фиг. 136). Такие топки применяются исключительно для очень хороших малозольных к. у., каковы, например, английские, доставлявшиеся в Ленинградский район.

В горизонтальных колосниках, ширина просветов обычно делается 10 — 12 мм и больше, вместо принятых в паровых котлах 3, 4 и 5 мм, эта разница об'ясняется стремлением уменьшить сопротивление топки проходу воздуха, в чем есть крайняя необходимость. Топка котлов работает разряжением дымовой трубы и потому стесняться уменьшением площади сечения, при проектировании колосников, этих топок не следует. Напротив того, уменьшение живого сечения прозоров и увеличение скорости всасывающего воздуха для горения даже выгодно, ибо струя воздуха при большой скорости лучше омывает кусочки угля, и удаляет лишенные кислорода продукты горения.

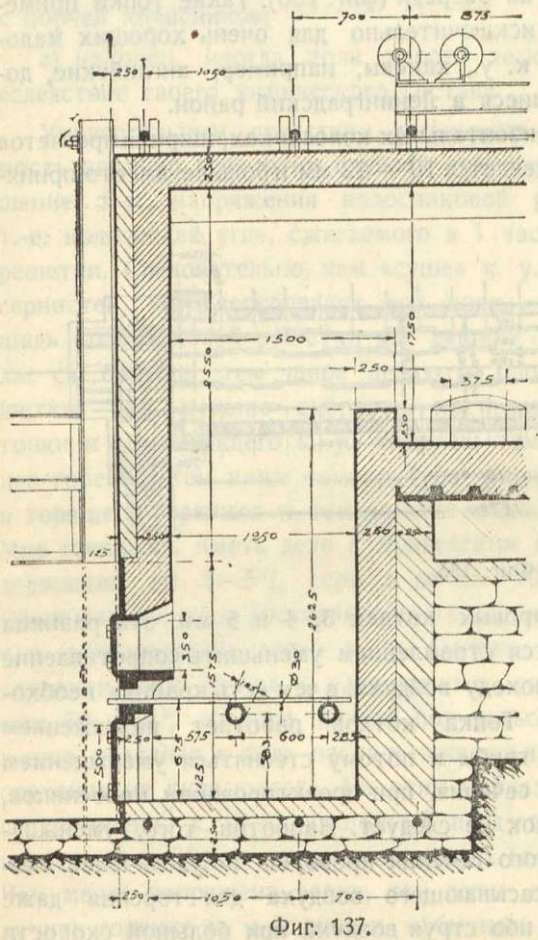


Фиг. 136.

Совсем другое дело топка пламенной печи. Она работает гидростатическим давлением, получающимся вследствие разности горизонтов колосников и пода печи; поэтому надо быть очень экономным в расходовании этого гидростатического давления и не тратить его бесполезно на возбуждение излишней скорости в прозорах решетки. В моей практике был такой случай. Спроектированная мною печь с трудом давала надлежащую температуру отжига и после насадки ее холодным металлом для отжига, температура ее поднималась очень медленно, несмотря на совершенно доста-

точную площадь решетки. Дело об'яснилось просто. Без моего ведома были положены колосники с очень узкими прозорами. Когда колосники были заменены другими и площадь живого сечения решетки увеличилась, печь пошла нормально.

Конечно, через увеличенные зазоры может просыпаться мелкий уголь, а потому в случае мелкого угля горизонтальной решетки лучше не делать. Очень часто в печах нормальные чугунные колосники заменяются сортовым железом 25 × 25 мм или квадратными чугунными брусками (фиг. 137). Чистка решетки с такими колосниками происходит упрощенным порядком. Если на колосниках есть

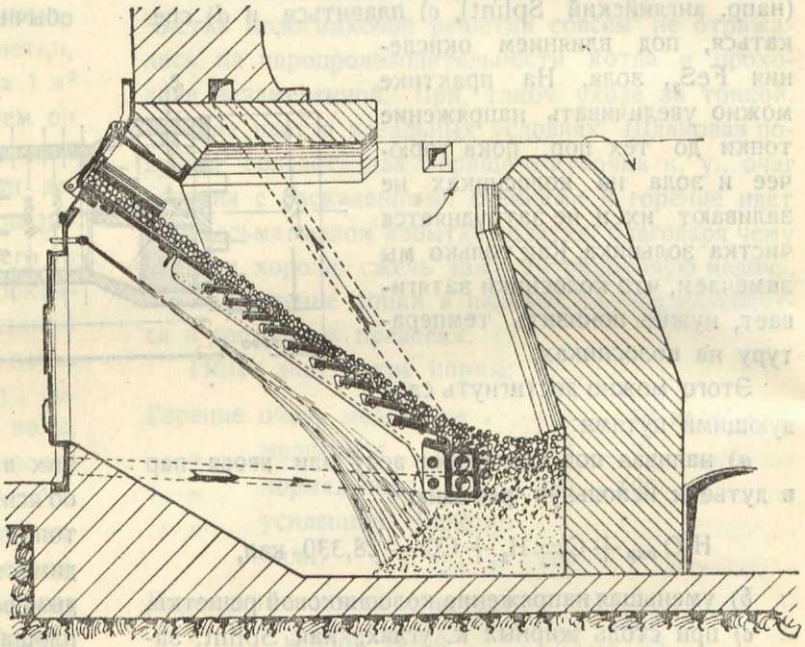


Фиг. 137.

ком спекшейся золы, то два, три колосника выдергиваются и через получившееся отверстие спекшаяся зола вместе с жаром, т.-е. углем или коксом, спускается в зольник. Вообще, эти колосники устанавливаются с большими прозорами; потеря через них горючего громадна и масса его теряется в сгарках. Если оставить жар в зольнике под колосниками, то температура поступающего под колосники воздуха поднимается, колосники сильно горят, а зола спекается. Несколько лучше идет дело на этих колосниках при топке на дровах, где горючее крупно и потеря его не так велика. Вообще устройство это рекомендовать нельзя.

Продолжительность службы колосников решетки может быть увеличена во много раз, если класть их не на треугольные призмы, или брусья, как это принято, а на водопроводные трубы с циркулирующей в них водой или воздухом (см ниже).

Неудобство очистки горизонтальных колосниковых решеток заставляет делать решетки ступенчатые. Недостаток их с гидравлической точки зрения указан в части II: через низ решетки поступает в топку воздуха гораздо больше, чем через верхние ступени, слой же горючего внизу обыкновенно тоньше, чем вверху. При плохом уходе очень часто горючее внизу прогорает совсем и тогда в топку поступает громадный избыток воздуха. Этот недостаток может быть легко исправлен, если сделать уклон ступенчатой решетки более угла естественного откоса, т.-е. 45° (см. ниже).



Фиг. 138.

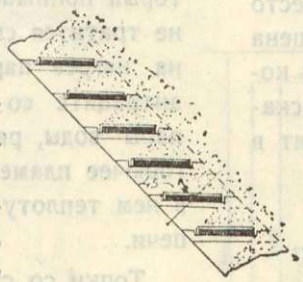
Но у этой решетки есть крупное достоинство: эта решетка пригодна для самого мелкого горючего, ибо порошкообразное горючее останавливается откосом в 45° и не может просыпаться в зольник.

В прежнее время эти решетки устраивались так, что промежуток между ступеньками был равен толщине ступени (фиг. 138), т.-е. 15—20 мм; ширина ступеней делалась не больше 75—100 мм. Вследствие такой частоты ступеней и узости их решетки сильно страдали от жара и часто прогибались.

В настоящее время решетки делаются из ступеней в 300—350 мм ширины при расстоянии между ними в 100—200 мм. Ступени не закладываются, как бывало раньше, в пазы тетивы, (фиг. 139), так что их вытащить во время работы

трудно, а лежат свободно на выступах *bb* (фиг. 140), но с некоторым уклоном к горизонту (10—15°), удерживаясь от продвигания в топку выступами *a*. Такая ступень вынимается с тетивы и вкладывается обратно без всякого затруднения.

Благодаря громадной ширине ступеней, их большой поверхности, решетка хорошо охлаждается воздухом. Живое сечение решетки громадно и оно составляет до $^7/_8$ всей площади сечения решетки. На этих широких ступенях весьма легко осуществляется сжигание топлива на шлаковой подушке.



Фиг. 139.

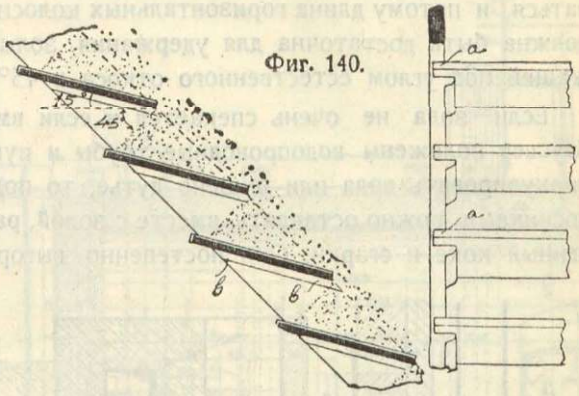
Если напряженность горения на такой решетке не очень велика, то обыкновенно на ступени оставляется слой золы, а на слое золы уже лежит слой кокса. Мы видели уже, что это самый лучший способ сжечь к. у. с небольшим избытком воздуха. Ступени при этом совсем не страдают от жары и решетка служит очень долго. Зола не спекается и в ней совсем нет сгарков, ибо со ступеньки сгребается ломиком только совершенно холодная зола. Как только на ступени появится кокс, очистку золы останавливают.

Конечно, при очень напряженной работе решетки, золу приходится сгребать начисто и в золе получается в этом случае много сгарков.

Мы видели, что через прозоры нижних ступеней воздух всасывается с гораздо большей интенсивностью чем через верхние, поэтому уклон ступенчатой решетки должен обеспечивать легкое передвижение угля вдоль решетки, откуда следует, что уклон решетки надо делать более угла естественного откоса. Это есть поправка, которую вводит в эти топки гидравлическая теория.

Если ступенчатая решетка внизу оканчивается горизонтальной решеткой, то и эта последняя тоже должна быть прикрыта естественным откосом угля. Это правило очень часто совершенно не соблюдается и мы имеем в заводах нередко совершенно неправильные конструкции, как напр., топка фиг. 141.

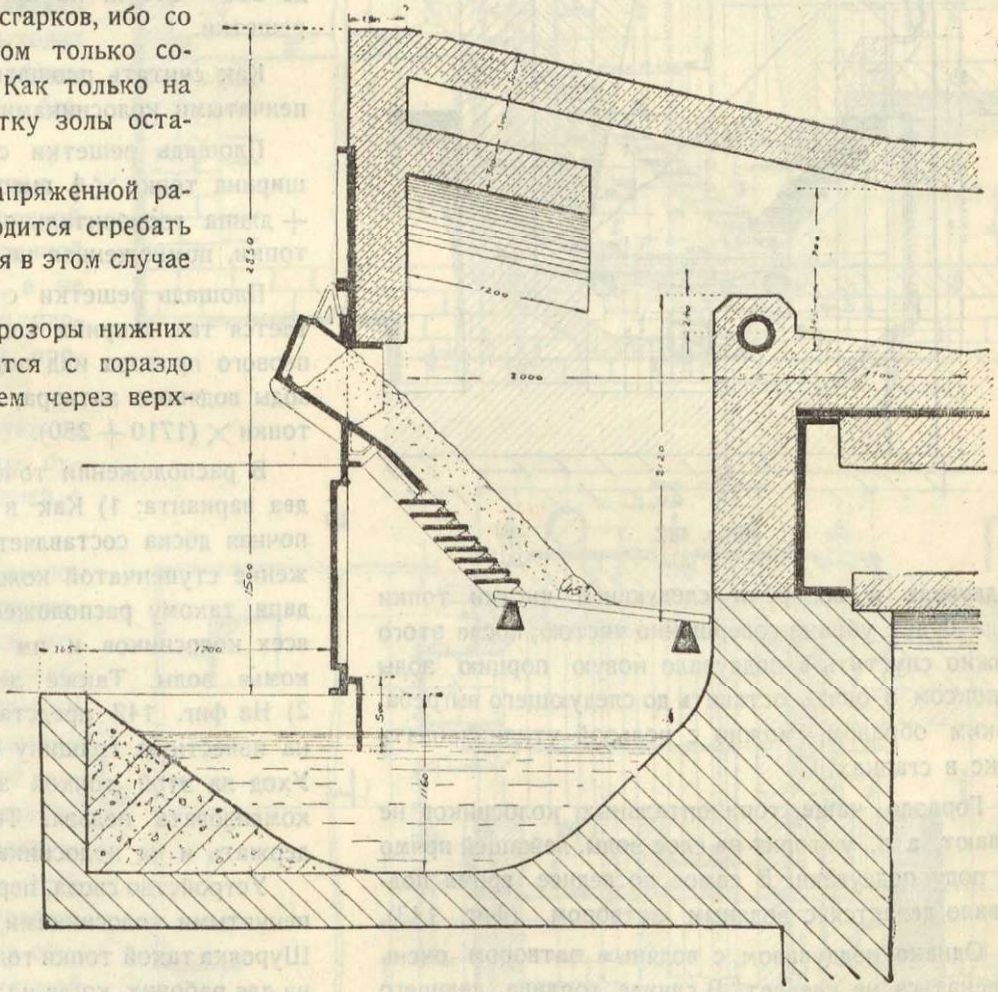
Здесь углем, расположенным по углу естественного откоса, прикрыта только половина горизонтальной колосниковой решетки, и поэтому работа шуровщика очень затруднительна, ибо ему приходится проталкивать уголь вперед пехлом или кидать его лопатой прямо на горизонтальные колосники,—



Фиг. 140.

задача очень трудная для осуществления. Т. о., работа печи ставится в зависимости от усердия шуровщика.

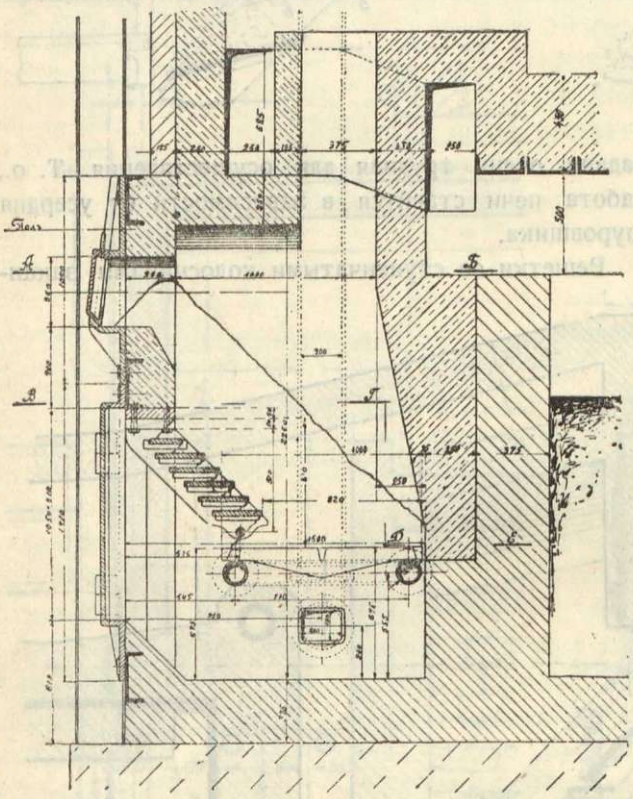
Решетки со ступенчатыми колосниками заканчиваются или горизонтальными колосниками, или откосом золы и кокса очень часто подтопленного водой. Если делаются горизонтальные колосники, то их должно делать такой длины, чтобы между по-



Фиг. 141.

следней ступенькой и поверхностью горизонтальных колосников можно было бы вытащить те комья золы, которые получаются в топке, т.-е. 200—300 мм. Но в эту щель кокс и уголь не должны вываливаться, и потому длина горизонтальных колосников должна быть достаточна для удержания золы, лежащей под углом естественного откоса в 45°.

Если зола не очень спекается и если вместо брусьев положены водопроводные трубы и пущена циркулировать вода или пущено дутье, то под колосниками можно оставлять, вместе с золой, раскаленный кокс и сгарки. Они постепенно выгорят в



Фиг. 142.

поддувале и во время следующей чистки топки зола будет убрана совершенно чистою; после этого можно спустить в поддувало новую порцию золы с коксом и опять оставить до следующего выгреба. Таким образом, можно с пользой утилизировать кокс в сгарках.

Гораздо чаще горизонтальных колосников не делают, а к. у. горит на слое золы, лежащей прямо на поду поддувала. В самое последнее время поддувало делается с водяным затвором (фиг. 143).

Однако поддувалом с водяным затвором очень увлекаться не следует. В случае топлива, дающего сильный жар на колосниках, например кокс, водяной затвор безусловно необходим, иначе мы так быстро будем жечь колосники, что расход на них будет слишком велик; но газовые, бурые, к. у., торф, дрова, конечно, следует жечь без водяного затвора. Нужно опереть только тетивы решетки на водопроводные трубы и можно считать это достаточным для прочности решетки. Естественный откос сгарков с выгорающим коксом прекрасно исполняет роль горизонтальных колосников. Выгода этого устройства та, что в топочные газы при сухом поддувале не вносится баласт водяных паров, который понижает их пирометрическую способность, не тратится скрытая теплота на испарение воды и на нагрев паров ее до температуры дыма. При антраците со всем этим можно помириться, ибо пары воды, разлагаясь на H_2 и CO, делают это горючее пламенным и переносят заключающуюся в нем теплоту из топки в рабочее пространство печи.

Топки со ступенчатыми колосниками для дров применять не следует. Для газовых печей здесь мною на практике выработалась конструкция шахтной топки (см. фиг. 149). Малозольность дров, отсутствие серы допускает здесь напряжение топки до 200 — 300 кг на кв. метр идеальной площади решетки.

Как считать площадь решетки в топках со ступенчатыми колосниками?

Площадь решетки считается так (фиг. 142): ширина топки $\times$ { высота ступенчатой решетки $+$ $+$ длина горизонтальной решетки }, т.-е. ширина топки, помноженная на $(650 + 820)$.

Площадь решетки с водяным поддувалом считается так: ширина топки $\times$ h, где h есть высота первого прозора над подом поддувала или уровнем воды водяного затвора, или, для фиг. 143,—ширина топки $\times (1710 + 250)$.

В расположении топочных дверец мы встречаем два варианта: 1) Как в топке фиг. 143 — предтопочная доска составляет непосредственное продолжение ступенчатой колосниковой решетки. Благодаря такому расположению, лом проходит вдоль всех колосников и им удобно спускать вниз все комья золы. Также легко опускается и уголь. 2) На фиг. 142 представлена топка, расчитанная на известную толщину слоя к. у. на колосниках. Уход за этой топкой затруднен, поэтому ее рекомендовать нельзя. Толстый слой угля можно держать и на колосниках топки фиг. 143.

Устройство свода, перекрывающего топку со ступенчатыми колосниками, имеет свои особенности. Шуровка такой топки только тогда не затруднительна для рабочих, когда из дверец и через шуровочное отверстие не пышет пламя, а это может иметь место только тогда, когда подсводовое пространство может вместить газовую реку топочных газов, текущую вдоль этого свода, т.-е. когда высота подсводового пространства равна по высоте

глубине газовой реки, вычисляемой по формуле Есьмана:

$$h = A \sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 l}}.$$

Это одно из последних моих достижений в области гидравлической теории, поэтому на многих чертежах, мною спроектированных ранее, свод опущен слишком низко над колосниками.

При проектировании ступенчатой решетки, площадь ее выходит иногда недостаточной для того напряжения, которым мы хотели бы задаться, чтобы избегнуть опасности сплавления золы и происходящих от сего бед.

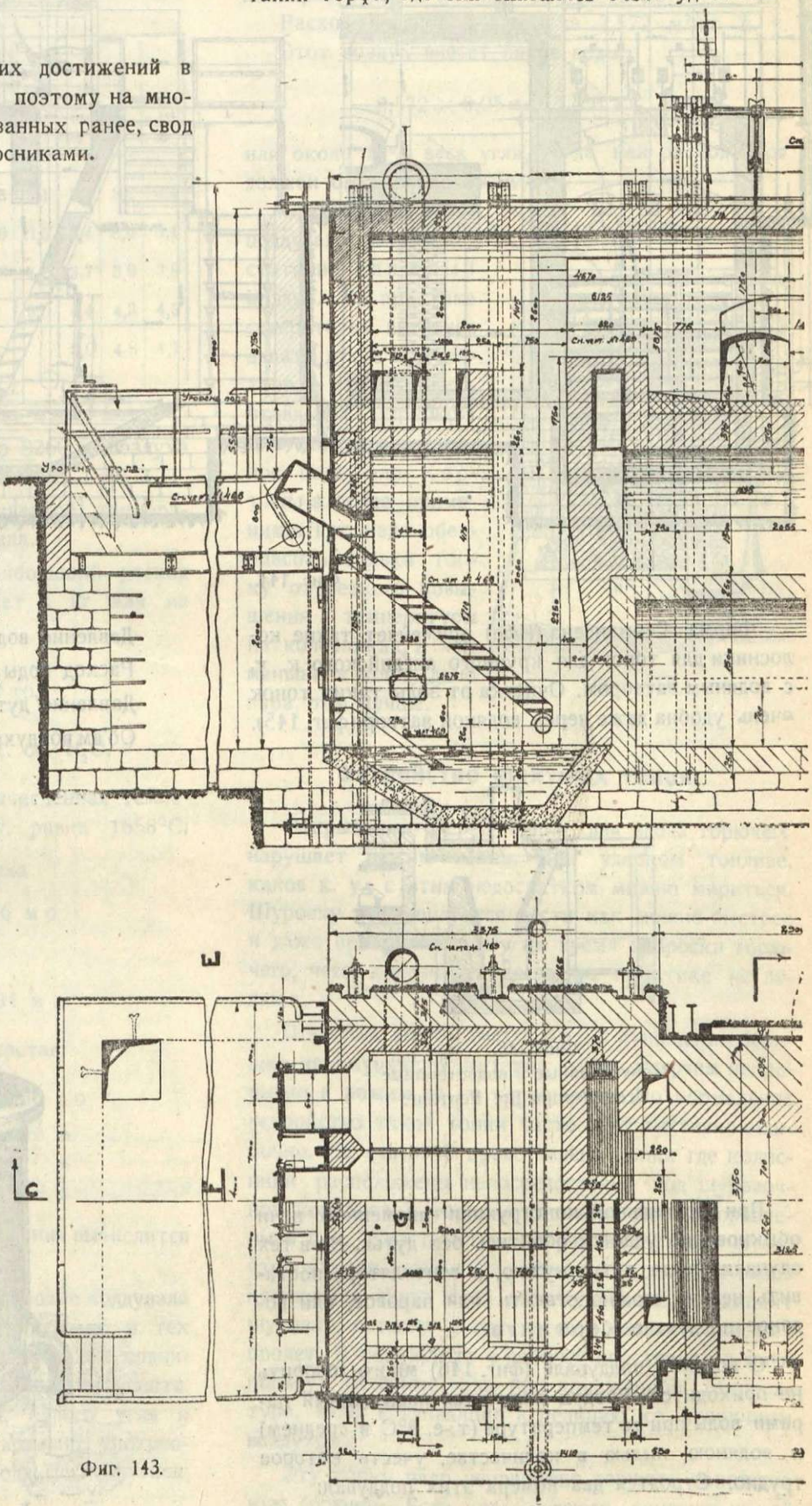
Предельная длина ступенчатой решетки два метра; длиннее решетку делать нельзя, ибо лом для шуровки выйдет безмерно длинен. Приходится увеличивать ширину, и если она выходит много шире печи, то в общем чертеж печи оказывается безобразным.

В таких обстоятельствах я разрабатывал чертеж сдвоенной топки (фиг. 144), направленной вдоль длинной оси печи, а не поперек, как обыкновенно, площадь которой может быть произвольно велика.

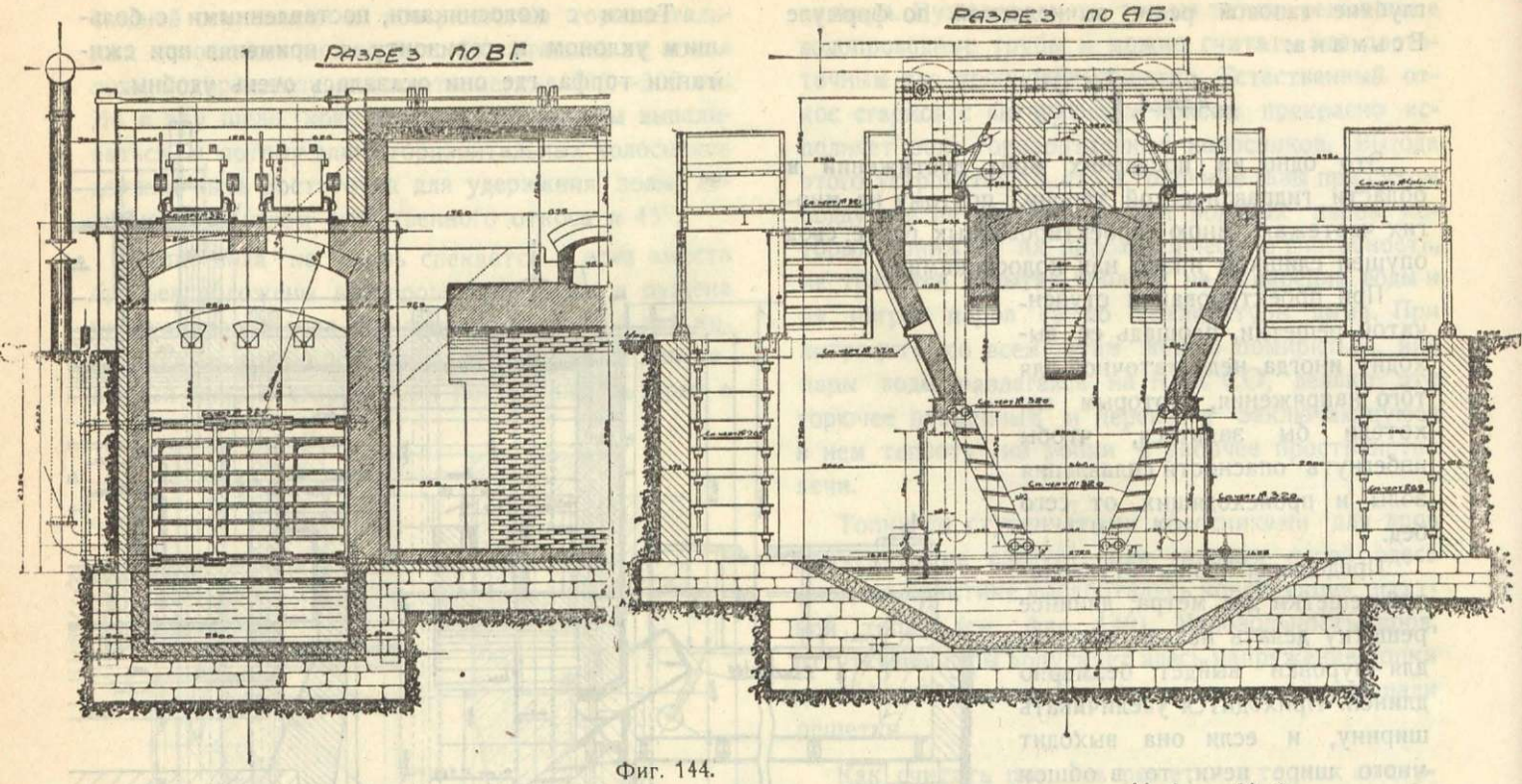
Эта топка имеет следующее громадное преимущество для бурых углей и каменных углей с легкоплавкой золой.

Обыкновенные топки прислоняются к кирпичной стенке. Роль стенки весьма велика: это аккумулятор тепла, способствующий газефикации свежих порций горючего и бездымному сжиганию продуктов сухой перегонки. Но при легкоплавкой золе стенка эта часто затрудняет работу шуровщика тем, что на нее налипает сплавленная зола и ее приходится сбивать со стенки. В прилагаемой топке есть свод, играющий роль аккумулятора тепла, но нет стенки, на которую налипает зола, что облегчает работу шуровщика.

Топки с колосниками, поставленными с большим уклоном к горизонту, я применял при сжигании торфа, где они оказались очень удобны.

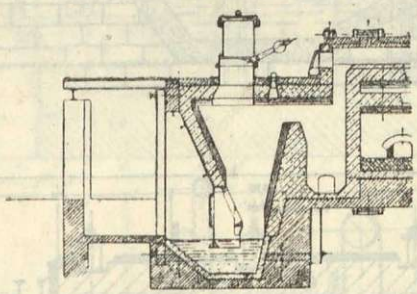


Фиг. 143.



Фиг. 144.

Фирма Германсена (Ифе) применяет такие колосники для топок для крупного английского к. у. с водяным затвором. Очистка от золы таких топок очень удобна даже через водяной затвор (фиг. 145).

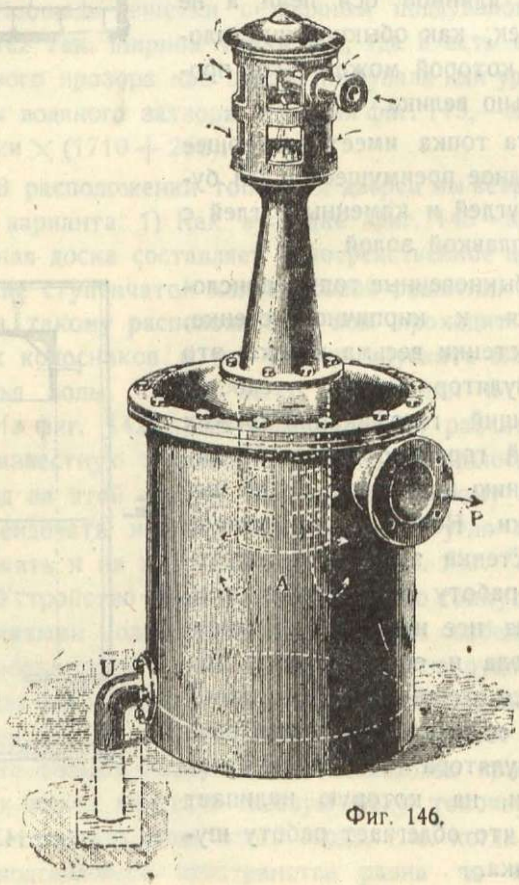


Фиг. 145.
Пароустройные и водоструйные вентиляторы Бр. Кертинг.

При правильной конструкции пламенной печи обыкновенно удается обойтись без дутья. Но в тех случаях, когда дутье нужно, а вентилятора поставить нельзя, можно ставить или паровое, или водяное поддувало Кертинга.

О водяном поддувале (фиг. 146) много говорить не приходится. Воздух получится насыщенный парами воды при ее температуре (т.-е. 9°С в среднем) и водяною пылью в количестве, учесть которое трудно. Строятся два номера этих поддувал:

	№ 1.	№ 2.
Давление воды . . .	4	10 атм.
Расход воды . . .	2700	6100 литр./час.
Давление дутья. . . .	45	50 мм.
Об'ем воздуха (в час).	410	600 м³.



Фиг. 146.

Для пароструйных вентиляторов (фиг. 147) фирма Бр. Кертинг дает расход пара на 100 м³ воздуха в кг:

Давление пара в атм. / Противодавление в мм вод. ст.	2 атм.	3 атм.	4 атм.	5 атм.	6 атм.	8 атм.
15	3,6	3,5	3,1	3,1	3,2	3,4
30	4,4	4,0	3,5	3,4	3,5	3,4
45		4,8	4,0	3,7	3,9	3,8
60			5,0	4,4	4,3	4,3
75				5,0	4 8	4,7

Производительность от 136 до 8260 м³ воздуха в час.

Определим понижение теоретической температуры горения при работе поддувала.

Из таблицы следует, что наибольший расход пара на 100 м³ воздуха достигает 5 кг или на 1 мол. об. воздуха:

$$5000 : \frac{100}{0{,}0224} = 1{,}12 \text{ гр},$$

$$1{,}12 : 18 = 0{,}062 \text{ мол. об. } H_2O.$$

При $1^1/_2$ расходе воздуха вычисленная температура горения хорошего к. у. равна 1658°C.

На 100 гр к. у. расход воздуха

$$34{,}777 \times 1{,}5 = 52{,}166 \text{ м о}$$

Пара поддувалом будет внесено

$$52{,}166 \times 0{,}062 = 3{,}234 \text{ м о}$$

Продукты горения будут иметь состав:

$CO_2 + SO_2$	6,356	м о
H_2O	5,712	„
N_2	41,257	„
O_2	3,652	„

Теоретическая температура горения вычислится в 1558°C, т.-е. на 100° ниже.

Этот расчет указывает, что паровые поддувала Кертинга должны применяться только в тех случаях, когда температура на колосниках поднимается безмерно, как, например, при антраците. При употреблении дров, торфа, бурого угля и пламенных каменных углей их, конечно, употреблять не следует также, как и водяные поддувала; лучше обходиться без них.

Паровое Кертингское поддувало в применении к генераторам (фиг. 147) доставляет слишком мало паров воды, а именно (см. часть I).

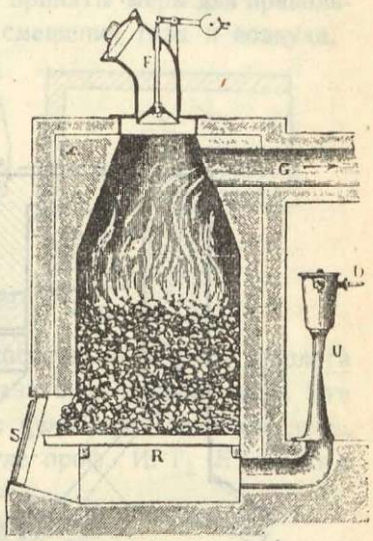
Расход первичного воздуха 2,572 м³/кг к. у.

Этот воздух внесет паров воды:

$$2{,}572 \times 0{,}05 = 0{,}1286 \text{ кг},$$

или около 13% веса угля, тогда как расход пара должен быть около 30%.

Следовательно — поддувало дает недостаточно влажный воздух. На практике генераторам выгоднее давать дутье вентилятора, а пар проводить отдельной трубкой. Для полугазовых топок поддувало Кертинга более применимо. Тут надо обезопасить только топку от резкого повышения температуры на колосниках, и чем меньше в топку дано пара, тем лучше.



Фиг. 147.

Устройство шахтных топок.

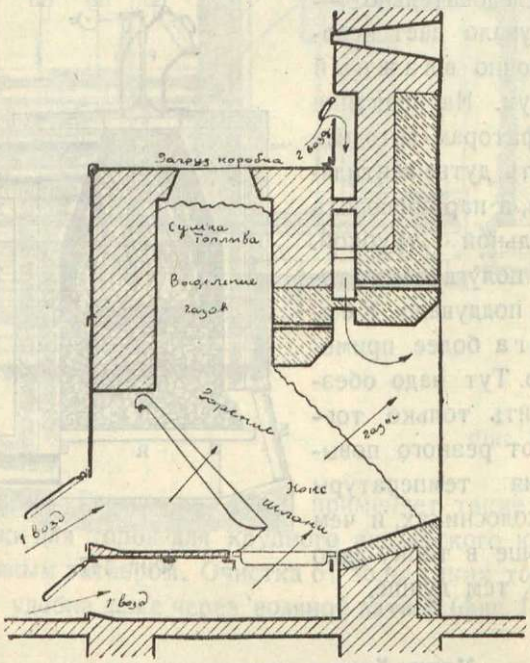
Открывание дверец топки для ввода горючего нарушает режим топки. При удобном топливе, каков к. у., с этим недостатком можно мириться. Шуровку рекомендуется вести как можно быстрее и даже прикрывать тягу на время заброски горючего, чего, конечно, никогда на практике не делают.

Шахтные топки имеют в этом отношении большие преимущества: питание топки горючим непрерывно, и режим ее не нарушается. Но нормальное устройство такой топки часто конструктивно ошибочно. На фиг. 148 представлена топка где колосники расположены непосредственно под шуровочной коробкой, а горячие топочные газы направлены в бок. Конструктор не учитывает при этом, что пузырек легких раскаленных топочных газов направится через слой горючего вверх и накалит шуровку, остынет и спустится в назначенный ему пролет. В результате в рабочее пространство печи попадут топочные газы при пониженной температуре, вяло вступающие в реакцию со вторичным воздухом.

Эту топку надо непрерывно держать заполненную горючим. Если хоть немного опустить в ней

слой горючего, то в шуровку пробиваются раскаленные газы, загрузочная коробка коробится и перестает запираться.

Правильная конструкция таких топок показана на фиг. 149. Пролет печных газов должен находиться над колосниками и должен улавливать топочные газы в пролет, не допуская поднять их к шуровочной коробке. При таком устройстве шуровочные коробки остаются совершенно холодными;



Фиг. 148.

очень часто их заменяют просто крышкой из тонкого котельного железа.

Спуск топлива несколько затрудняется изгибом шахты и потому горючее приходится изредка пошевеливать, встряхивать ломиком через специально устроенный глазок. Можно впрочем избегнуть этого, устраивая специальный «трясун» от мотора в наклонной части шахты.

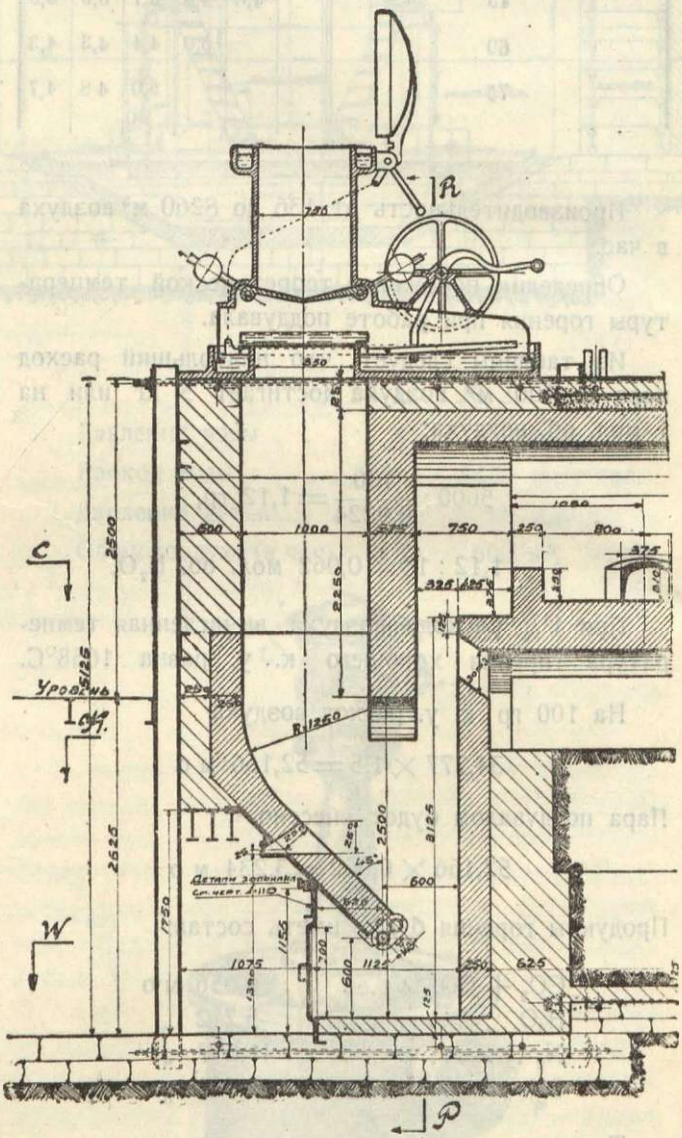
Подвод вторичного воздуха.

Мы видели, что под'ем температуры в топке выше 1100° — 1200°C очень невыгоден, ибо может сопровождаться спеканием золы или кокса. Напротив того, понижение температуры в топке эндотермическими реакциями получения генераторного газа:

$$CO_2 + C = 2\,CO - 38.790 \text{ кал}$$
$$H_2O + C = CO + H_2 - 28.380 \text{ кал}$$

до этой нормы очень выгодно. Осуществляются эти реакции крайне просто увеличением толщины слоя к. у. на колосниках. Вот почему топки с получением полугенераторного газа весьма распространены. Если на колосниках в топке получается полугенераторный газ, то является вопрос, как подвести для его сжигания вторичный воздух, чтобы достигнуть наилучшего смешения, и следовательно, быстроты реакции горения при малом избытке вторичного воздуха.

Вторичный воздух бывает или холодный, или слабо нагретый, поэтому он гораздо тяжелее горячего полугенераторного газа. Например, приняв вес полугенераторного газа равным 1,16 кг/м³, при 1100° найдем его равным $1{,}16 \times 0{,}2 = 0{,}232$ кг/м³.



Фиг. 149.

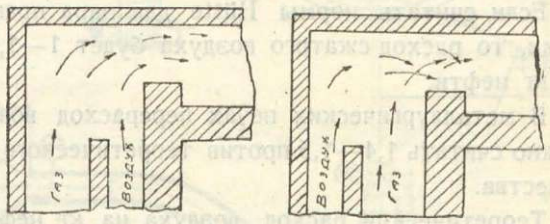
Вторичный воздух при 300° будет иметь вес м³ равным $1{,}29 \times 0{,}48 = 0{,}62$ кг/м³, т.-е. в 2,7 раза тяжелее газа. Холодный вторичный воздух будет тяжелее газа в 5,6 раза.

Из сказанного ясно, что наша задача состоит в том, чтобы смешать две жидкости, тяжелую с легкой. При таком смешении нужны некоторые предосторожности.

В первой части я уже рассмотрел несколько примеров смешения газа и воздуха, теперь же я только отмечу, что вообще воздух всегда лучше подводить сверху или сзади газа (дальше от порога), а не наоборот (фиг. 150). В случае несоблюдения этого правила мы получаем полное основание для разслоения струи. Легкий газ займет верхнее положение, а тяжелый воздух нижнее. Смешение и, следовательно, реакция пойдут крайне медленно и температура в печи будет низкая.

Если для смешения газа и воздуха приняты меры, то в узком пламенном окне нет никакой нужды и в печах, мною проектируемых, я совсем не делаю узкого окна над порогом и высокого порога, считая это излишним.

Порог надо сделать такой высоты, чтобы сварочный шлак не попал бы в топку. Это единственное его назначение. Чем ниже порог, тем лучше, ибо чем медленнее вступает пламя в рабочее пространство, тем лучше. Правильно спроектированное рабочее пространство печи представляет обыкновенно мешок горячих газов. Образующиеся языки пламени высокой температуры устремляются под свод и там, если смешение газа и воздуха удовлетворительно, горение заканчивается. Пережим струи в пороге был бы полезен только в том случае, если бы предварительное смешение газа и воздуха было бы неудовлетворительно. Я не имею совершенно никаких соображений о проектировании этого сужения в порог. Повидимому, тут надо руководиться такою скоростью потока, чтобы поступательная скорость струи обратилась бы в вихревую. Вопрос пока совершенно не освещенный аэродинамикой. Это обстоятельство заставляет меня проектировать печи без сужения пламени в пороге, что вполне возможно, если приняты меры для правильного предварительного смешения газа и воздуха.



Фиг. 150.

Таким образом, относительно высоты пролета над порогом я могу указать на один размер. Эта высота должна быть не меньше высоты газослива, вычисляемого по формуле проф. И. Г. Есьмана

$$h = A\sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 t}}.$$

ГЛАВА XVIII.

Нефтяные пламенные печи.

Форсунки в применении к печам.

Нефть представляет из себя идеальное топливо. Ни золы, ни серы; для нее не нужно шуровщика, ибо она сама течет, куда ей указано; регулировка ее идеальна, теплотворная способность колоссальна; и, тем не менее, это своеобразное и трудное топливо. Это слишком жирное топливо, и сжечь нефть до конца, быстро и без копоти—задача нелегкая. Посему несколько советов, как с ней обращаться будут не бесполезны.

Нефть жгут большей частью в распыленном состоянии при помощи форсунок. В известных случаях весьма хороши капельники. Колосников Нобеля мне применять в широком масштабе не приходилось, и потому о них я умолчу.

Распыление нефти можно произвести тремя способами:

а) Бесшумными форсунками Кертинга, где нефть под давлением 3—4 атм продавливается через маленький улиткообразный канал и разлетается в пыль. С этой форсункой я не работал и об ней тоже умолчу.

в) Затем распыление производится паром или сжатым до 3—4—8 атм воздухом. Если распыление происходит паром, то весь воздух засасывается форсункой снаружи. Если форсунка воздушная, то большая часть воздуха доставляется извне.

с) Наконец, самые простые форсунки устраиваются так, что берется дутье от кузницы, упругостью около 25 мм ртути или 350 мм воды. В этом случае весь воздух для горения дается форсунке вентилятором, и форсунка не должна сосать воздуха снаружи.

В форсунках, работающих паром или воздухом высокого давления (3—4 атм.), металлурга интересует прежде всего расход пара или воздуха. Испытаний форсунок в этом направлении сделано очень мало.

Для расхода пара русский перевод Hütte дает 5% (в среднем) и 7% (максимум) испарительности нефти, которую можно принять в среднем, кроме расхода пара на форсунку, 12,2—12,5 кг. Откуда расход пара на 1 кг нефти будет 0,61—0,87 кг.

Эти данные очень близки к испытаниям форсунок, произведенным в Московском Техническом

Училище в 1907 г. (Бюллетени Полит. Общ.), где расход пара колебался от 0,28 до 0,92 кг.

Если бы вместо пара расходовался воздух, жидкость более тяжелая, то, вероятно, количество его было бы больше, пропорционально весам единицы об'ема; 1 мо пара весил 18 гр, воздуха 28,8 гр; значит, цифры последней строчки надо помножить на $\frac{28,8}{18}=1,6$. Если мы и погрешим при таком элементарном расчете количества воздуха, то только в сторону увеличения количества воздуха.

Если считать нормы Hütte для пара правильными, то расход сжатого воздуха будет 1—1,5 кг на кг нефти.

В металлургических печах перерасход воздуха нужно считать 1,4—1,5 против теоретического количества.

Теоретический расход воздуха на кг нефти — 10,84 м³ или 14,0 кг, следовательно действительный 19,6 — 21,0 кг воздуха на кг нефти. Откуда следует, что сжатого воздуха расходуется примерно 5—8% всего расходуемого воздуха. Это существенно знать, когда заходит речь о работе, на подогретом в рекуператорах или регенераторах, воздухе.

Здесь следует рассмотреть еще форсунку, работающую паром или сжатым воздухом, как прибор для всасывания наружного воздуха.

В пламенных печах должно царствовать давление выше атмосферного. Только при этом условии через заслонки в печь не будет засасываться наружный воздух и не будет студить расположенных на поду предметов. Отсюда следует, что если мы расположим форсунку, под сводом печи, то форсунка эта должна будет всосать наружный воздух в среду с давлением немного выше атмосферного. Может ли это быть достигнуто современными форсунками? Казалось бы, этого вопроса быть не может. Если на поду печи давление ровно нулю, то на высоте максимум 2 м, в печи, при $t=1200°$, $\delta_{max}=1,29\left(1-\frac{1}{1+\alpha t}\right)2=2,1$ мм воды. Форсунка, работающая, казалось бы, при давлении пара или воздуха в 3—4 атмосферы, легко преодолеет противодавление печных газов, max в 2 мм воды. И однако, это оказывается не справедливо. Круглая форсунка с плоским прозором (В. И. Береснева) не способна инжектировать нужный для горения воздух при противодавлении в 1—2 мм воды, в такой мере, что мне пришлось отказаться для нефтяных печей с форсункой в своде от форсунок, работающих при высоких давлениях. Мне не пришлось испытывать так других типов форсунок, но имеющиеся данные об испытании паровых котлов говорят, что в топке господствует отрицательное давление от 2,25 до 20,6 мм водяного столба, откуда следует, что отрицательное давление в топках котлов считается нормой при работе форсунок. Поэтому в тех случаях, когда расположение форсунки под сводом вызывается необходимостью производства, я ставлю форсунки низкого давления, где весь воздух дается дутьем. Тип такой форсунки виден на приложенном чертеже (фиг. 151), данные о расходе воздуха помещены в таблице. Тип этот неприменим к печам регенеративным и рекуперативным. Форсунки эти работают на холодном дутье. Если бы желательно было бы пустить их на горячем дутье, то отработанные печные газы пришлось бы пустить в настоящий воздухонагреватель с чугунными трубами. Форсунки расходом нефти (до 20 кг.) можно свернуть из газовых труб и тройников.

Способы наилучшего смешения распыленной нефти и воздуха.

Для получения высокого пирометрического эффекта в печи необходимо, чтобы облако нефтяной пыли хорошо смешивалось бы с воздухом. Только при этом горение пойдет с надлежащей быстротой, и получится высокая температура. В противном случае по печи будет носиться туманное облако не сгоревшей нефтяной пыли, а температура в печи не поднимется выше 1000°. При очень плохом смешении в печных газах появляются плавающие искорки горящего нефтяного кокса, медленно падающие на под печи. При таком горении нефти печные газы с незаконченными реакциями горения водорода и окиси углерода попадут в рекуператор или дымовой боров и там температура поднимется выше всякой меры.

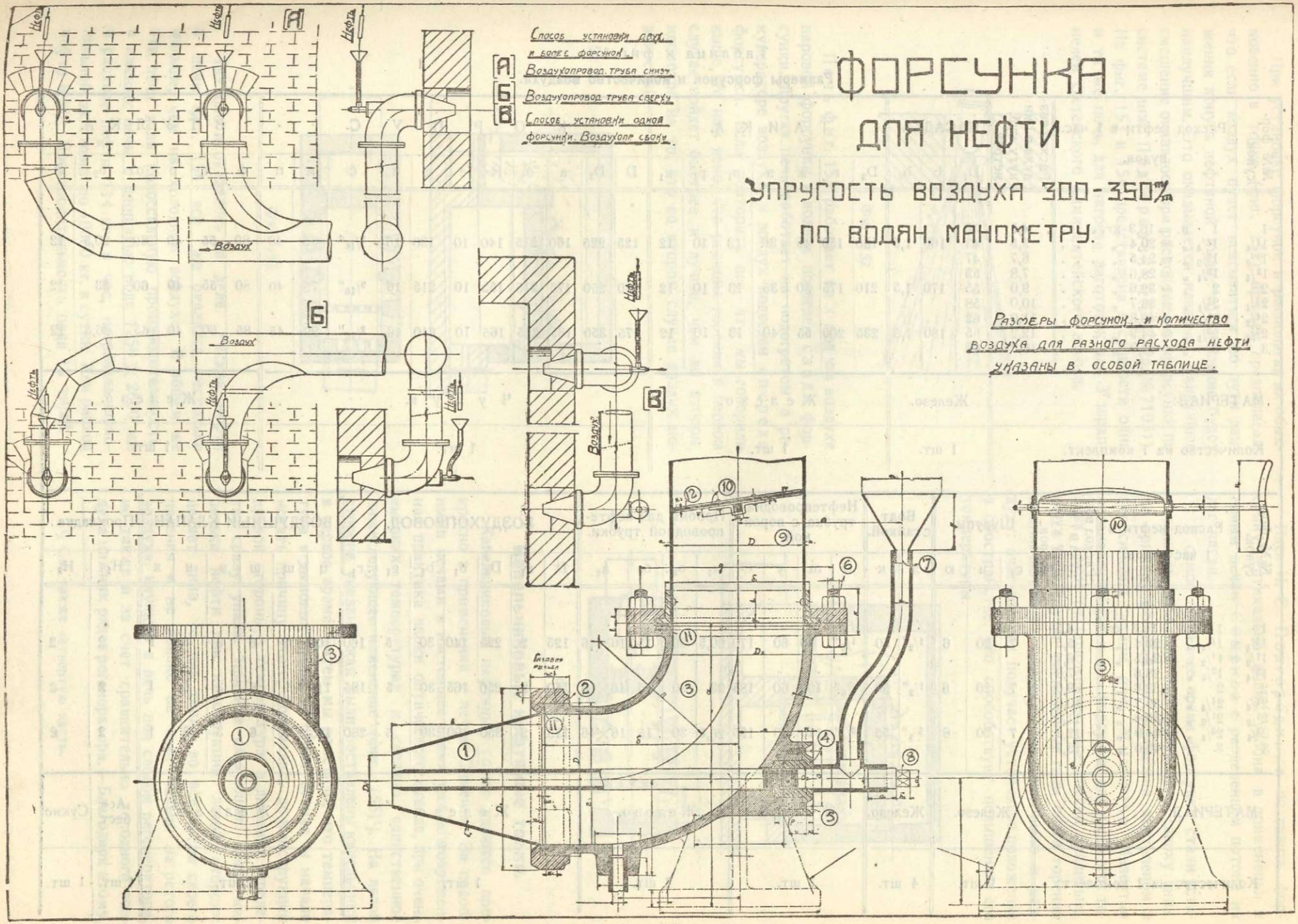
Для того, чтобы получить конкретное представление о крупности капелек нефти, распыливаемой дутьем, проф. Б. Н. Селиванов приложил формулу Лапласа для поверхностных натяжений и вычислил диаметр капелек нефти, распыливаемой дутьем. Им получены такие диаметры их:

упругость дутья мм воды —	30	50	75	90	100	150	200	250	300
диаметр капель мм —	0,47	0,28	0,19	0,16	0,14	0,10	0,07	0,06	0,05

при давлении 4 — 5 — 6 атмосфер.

диаметр — 0,0004 — 0,0003 — 0,0002 мм.

Время испарения капелек прямо пропорционально, об'ему капельки и обратно пропорционально ея поверхности, следовательно, пропорционально $\frac{2}{3}d$, что дает уже конкретное представление о зависимости времени реакции горения от давления дутья.


ФОРСУНКА
ДЛЯ НЕФТИ
УПРУГОСТЬ ВОЗДУХА 300-350 мм
ПО ВОДЯН. МАНОМЕТРУ.
Способ установки двух и более форсунок.
А Воздухопровод труба снизу
Б Воздухопровод труба сверху
В Способ установки одной форсунки. Воздухопр сбоку
Размеры форсунок и количество воздуха для разного расхода нефти указаны в особой таблице.
Воздух
Нефть

Фиг. 151.

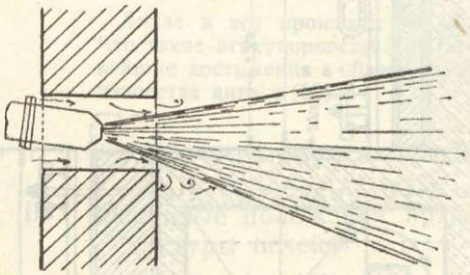
Таблица к фиг. 151.

Размеры форсунок и количество воздуха.

№№ форсунок.	Расход нефти в 1 час. пудов.	Расход воздуха в 1 минуту куб. метров.	НАСАДКА.			ГАЙКА.							КОРПУС.											ВТУЛКА.					
			D_1	b	b_2	D_3	г	ж	з	n_1	p_1	$к_1$	D	D_2	а	б	R	e	g	i	с	м	n	ф	х	р	о	o_2	Н
1	1 п. = 16,3 кг. . . .	4,5	40																										
1¼	1¼ „ = 20,4 „ . . .	5,5	43	160	1,5	180	150	45	30	13	10	12	125	225	160	215	140	10	190	16	9/16"	65	40	80	55	40	60	20,5	12
1½	1½ „ = 24,5 „ . . .	6,7	47																										
1¾	1¾ „ = 28,6 „ . . .	7,8	52																										
2	2 „ = 32,6 „ . . .	9,0	55	170	1,5	210	175	50	35	13	10	12	150	250	175	215	155	10	215	16	9/16"	75	40	80	55	40	60	23	12
2¼	2¼ „ = 36,7 „ . . .	10,0	58																										
2½	2½ „ = 40,8 „ . . .	11,0	62																										
2¾	2¾ „ = 44,9 „ . . .	12,2	65	180	1,5	235	200	55	40	13	10	12	175	350	185	215	165	10	310	16	9/16"	90	45	85	60	40	65	26,5	12
3	3 „ = 49,0 „ . . .	13,3	68																										
МАТЕРИАЛ:			Железо.			Железо.							Чугун.											Железо.					
Количество на 1 комплект:			1 шт.			1 шт.							1 шт.											1 шт.					

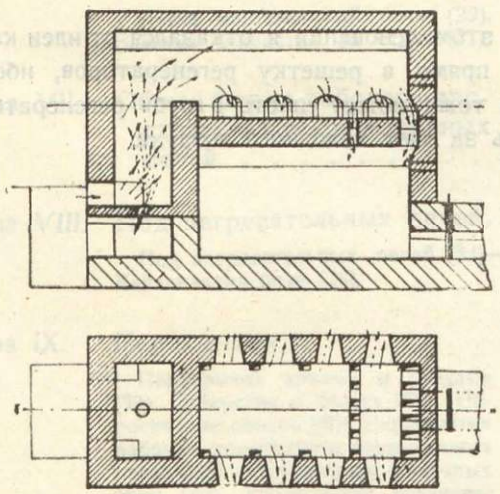
№№ форсунок.	Расход нефти в 1 час пудов.	Расход воздуха в 1 минуту куб. метров.	Шурупы.			Болт с гайкой.		Нефтепроводная трубка с воронкой.				Пробка для нефтепроводной трубки.				ВОЗДУХОПРОВОД.							ВОЗДУШНЫЙ КЛАПАН.						Прокладка.	
			c_1	и	ю	л	к	d	m	у	Θ	$м_1$	o_1	$б_2$	a_2	D	a_1	D_2	$б_1$	b_1	g_1	$г_1$	ц	щ	ш	э	ч	я	H_1	H_2
1	1 п. = 16,3 кг.	4,5																											
1¼	1¼ „ = 20,4 „	5,5	7	20	6	1/2"	50	1/2"	90	60	170	20,5	30	15	16×16	125	2	225	140	30	5	160	100	9	6	3	6	1	2	2
1½	1½ „ = 24.5 „	6,7																											
1¾	1¾ „ = 28,6 „	7,8																											
2	2 „ = 32 6 „	9,0	7	20	6	1/2"	50	5/8"	100	60	185	23	30	15	16×16	150	2	250	165	30	5	185	110	9	6	3	6	1	2	2
2¼	2¼ „ = 36,7 „	10,0																											
2½	2½ „ = 40,8 „	11,0																											
2¾	2¾ „ = 44,9 „	12,2	7	20	6	5/8"	55	3/4"	110	60	195	26,5	30	15	16×16	175	2	350	190	30	5	280	125	9	6	3	6	1	2	2
3	3 „ = 49,0 „	13,3																											
МАТЕРИАЛ:			Железо.			Железо.		Железо.				Железо.				Железо.							Железо.						Асбест.	Сукно
Количество на 1 комплект:			1 шт.			4 шт.		1 шт.				1 шт.				1 шт.							1 шт.						1 шт.	1 шт.

При установке форсунок я располагал их обыкновенно в топке (фиг. 152), причем предполагал, что если воздух будет всасываться по пути движения конуса нефтяной пыли, то смешение будет наилучшим. Это оказывается неверно. Наилучшее смешение оказалось при расположении форсунки по системе инж. Подгородника (Охр. св. № 71031). На фиг. 153 и 154 представлена в сущности одна и та же печь, для нагрева заготовок для 3″ шрапнелей Охтенского Адмиралтейского завода.



Фиг. 152.

Печь фиг. 153 работает на холодном воздухе паровой форсунки, и воздух подведен сзади форсунки. Другая печь работает на подогретом в рекуператоре воздухе, и воздух подведен спереди форсунки. Если повторить все, что мы говорили выше, то нам ясно, что реакция горения в первом случае пойдет быстрее и лучше, чем во втором, несмотря на то, что во втором случае воздух подогретый.

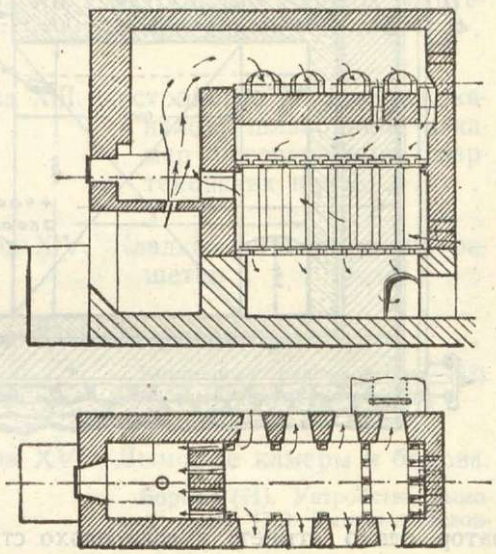


Фиг. 153.

Так оно и оказалось на деле. Расход нефти в печи фиг. 154 все же оказался несколько меньше, чем на холодном воздухе. В общем же эти печи дали колоссальную производительность, а именно: печь, с площадью пода 1250 × 2600 мм и расходе нефти 114 кг. в час, нагревала шрапнельной заготовки по 40000 кг. в сутки. Или расход нефти 6,8%. Производительность пода 12 тн/м².

Идея И. С. Подгородника поставить форсунку вертикально очень удобна в применении к новым печам Сименса с разделением потока на две части.

В самое последнее время форсунки стали устанавливать инвертно, т. е. направлять сверху вниз, по примеру фонарей для освещения ацетиленом и керосиновой лампы инж. Мышкина. Инвертно устанавливаются и все форсунки для пылевого топлива. Такое расположение теоретически правильно, ибо в этом случае раскаленные газы очага горения поднимаются на встречу нефтяной пыли и воздуху: очаг горения получает устойчивое положение в пространстве, что способствует повышению его температуры.

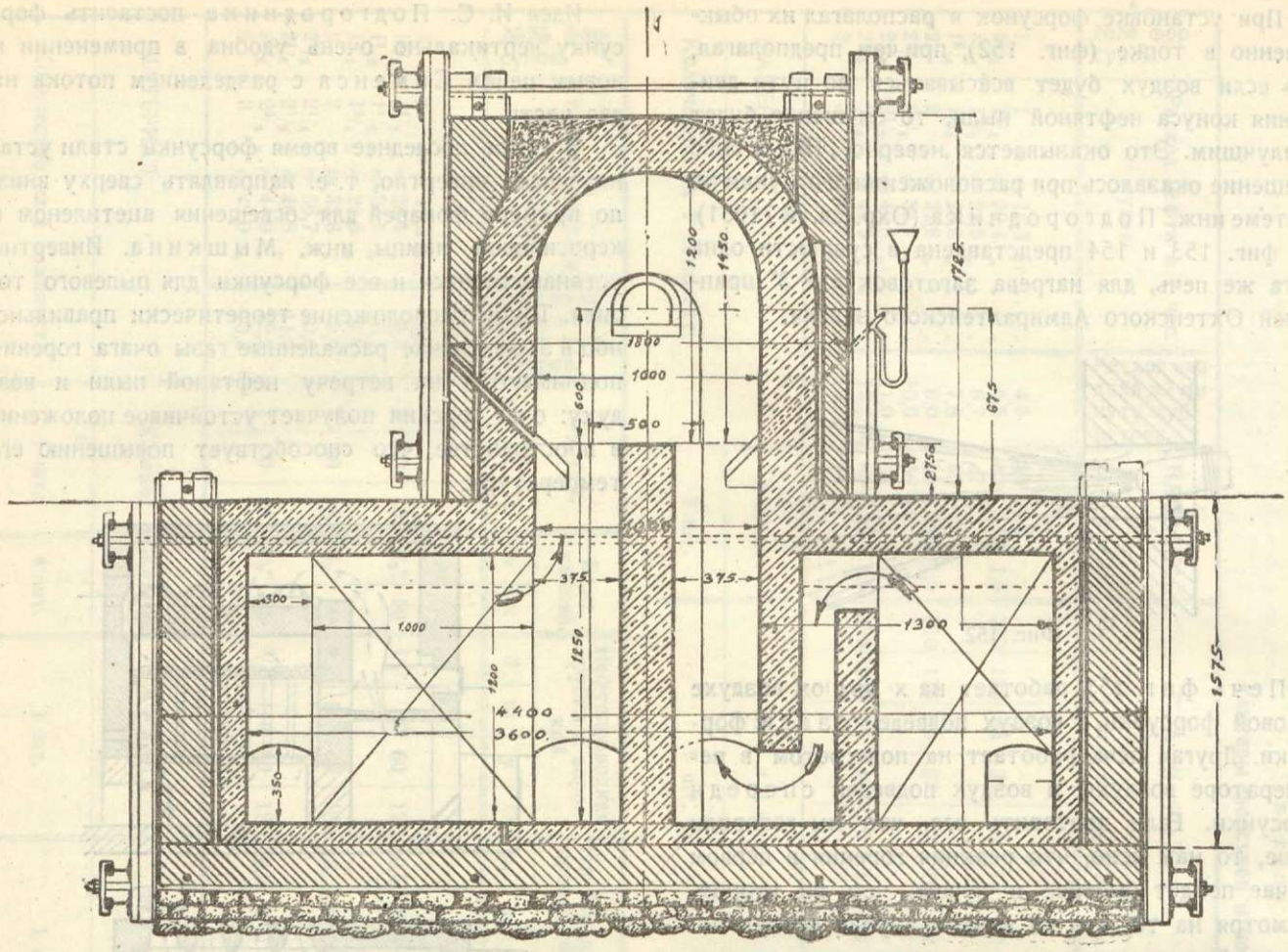


Фиг. 154.

Капельниковые нефтяные топки.

Капельниковые нефтяные топки удаются прекрасно в применении к печам Сименса. За подобными печами в настоящее время уже долговременная практика варки оптического стекла, при очень высоких температурах и сделано единственное нижеследующее изменение (фиг. 155)[1]). На левой стороне указано, как были поставлены капельники в первое время. Затем мы заметили, что температура в дымовых пролетах очень велика и начали искать причину этого. Додумались до конструкции правой стороны, и температура в дымовых пролетах сразу упала. Причина следующая: когда капелька нефти при конструкции левой стороны падает вниз, то она горит во все время своего падения и не только за счет сильно нагретого воздуха, идущего в печь под сводом регенератора, но также и за счет сравнительно холодного воздуха нижних рядов регенератора.—Благодаря этому,

[1]) См. также четвертую часть.



Фиг. 155.

регенератор плохо стынет, а если плохо стынет, то и плохо студит печные газы. При конструкции правой стороны горение нефти, за счет малонагретого воздуха, уже невозможно.

На этом основании я отказался от идеи капать нефть прямо в решетку регенераторов, ибо капелька тоже может упасть в глубь регенератора и сгореть за счет холодного воздуха.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть III Постройка печей

Стр.

Глава I. Огнеупорные материалы . 3—13

Динас и его производство (3). Что такое огнеупорность? (10). Новейшие достижения в области производства динаса (12).

Глава II. Фундаменты пламен. печей. 14—17

Глава III. Основные положения архитектуры печей . . . . . 17—18

Глава IV. Кладка печей . . . . . 19—23

Кладка стен печи (19). Растворы и методы употребления огнеупорных материалов (21).

Глава V. Устройство пода плавильных печей . . . . . 23—28

Устройство пода плавильных печей (23). Расчет ванны мартеновской печи (24). Прорыв металла через под (28).

Глава VI. Устройст. отверстия (летки). 29—32

Летка мартеновской печи (29). Заделка отверстия на струе (31).

Глава VII. Общая форма рабочего пространства нагревательных печей . . . . . 32—34

Глава VIII. Под нагревательных печей. 34—37

Под нагревательных печей (34). Канализация пода (35).

Глава IX. Перекрытия . . . . . 37—43

Перекрытия арками и сводами (37). Отверстия в сводах (39). Пересечение сводов (40). Перекрытия рабочих пространств мартеновских печей (40). Перекрытия садочных окон (42). Перекрытия регенераторов (42).

Стр.

Глава X. Облицовка пламен. печей . 43—50

Глава XI. Устройство окон . . . . . 50—56

Устройство окон (50). Устройство заслонок (52).

Глава XII. Устройство головок мартеновских печей . . . . . 57—62

Глава XIII. Устройство вертикальн. каналов, шлаковиков и камер регенераторов мартеновских печей 63 64

Глава XIV. Кладка регенеративной решетки . . . . . 64—68

Глава XV. Рекуператоры . . . . . 68—71

Кирпичные рекуператоры (68). Чугунные рекуператоры (70).

Глава XVI. Дымовые камеры и борова. 71—75

Борова (71). Устройство дымовых камер (72). Дымовые заслонки (74).

Глава XVII. Устройство топок . . . . 75—85

Колосниковые решетки (75). Пароструйные и водоструйные вентиляторы бр. Кертинг (82). Устройство шахтных топок (83). Подвод вторичного воздуха (84).

Глава XVIII. Нефтяные пламенные печи. 85—90

Форсунки в применении к печам (85). Способы наилучшего смешения распыленной нефти и воздуха (86). Капельниковые нефтяные топки (89).

ЧАСТЬ IV.

ПРИМЕРЫ ПРОЕКТОВ ПЕЧЕЙ

ЧАСТЬ IV.

ПРИМЕРЫ ПРОЕКТОВ

ЛЕТЕЙ

ГЛАВА I.

ГЕНЕРАТОРЫ.

Конструкция генераторов для дров.

Основным положением для расчета генератора служит время пребывания дров в генераторе. Аршинные мелкоколотые дрова дают хороший генераторный газ в тех случаях, когда находятся в генераторе всего 3—4 часа. Крупные 2-метровые дрова нужно выдерживать около 12 часов. В общем же 6-часовое пребывание достаточно. Высота шахты генератора не делается выше 6—7 метров. Ширина зависит от длины полена. Обыкновенно шуровочная коробка делается шире длины полена на 5—10 см, а шахта шире шуровочной коробки еще на 5—10 см, т.-е. шахта для 4-четвертовых дров выходит не уже 0,8 м, а 12-четвертовых—2,3 м.

Наилучший тип дровяного генератора есть прямая шахта шириной 1—1½ м без колосников (фиг. 1). Их заменяет чугунная охлаждаемая водой, при помощи залитой в нее трубки, доска в 3—5 см толщины, перекрывающая поддувало. Края противолежащих досок сближены до 700 мм. Полено короче шахты на 10—20 см, а потому во всю высоту генератора снизу доверху у поперечных стен имеется свободная пазуха. Пустить туда воздух вредно, и потому к поддувалу эту пазуху ликвидируют выступом или уклоном стенок на ½ кирпича с каждой стороны. Такой уклон не может скостить дров, ибо внизу уже дров нет, а древесный уголь настолько трещиноват, что легко ломается и уступает опусканию горючего вниз.

Объем генератора для аршинных дров около 5 м³, т.-е. в нем помещается около 2.000 кг древесины; для 12-четвертовых дров 15 м³ или около 6.000 кг древесины. Считая время пребывания дров 6 часов, получим производительность в сек.:

$$2000 : (60 \times 60 \times 6) = 0{,}093 \text{ кг/сек.}$$
$$6000 : (60 \times 60 \times 6) = 0{,}278 \quad „$$

а потому генераторы эти соответственно будут расходовать первичного воздуха (см. часть I),

$$0{,}907 \times 0{,}093 = 0{,}084 \text{ м}^3\text{/сек.}$$
$$0{,}907 \times 0{,}278 = 0{,}252 \quad „$$

и дадут газа:

$$2{,}45 \times 0{,}093 = 0{,}228 \text{ м}^3\text{/сек.}$$
$$2{,}45 \times 0{,}278 = 0{,}681 \quad „$$

Площадь колосниковой решетки будет соответственно:

$$0{,}7 = 0{,}5 = 0{,}35 \text{ м}^2$$
$$0{,}7 \times 2{,}0 = 1{,}40 \quad „$$

Напряженность:

$$\frac{2\,000}{0{,}35 \times 6} = 950 \text{ кг/м}^2 \text{ час}^1)$$
$$\frac{6\,000}{1{,}40 \times 6} = 715 \quad „ \quad „$$

На полную площадь сечения генератора мы получим напряженность:

$$\frac{2\,000}{1{,}5 \times 0{,}8 \times 6} = 278 \text{ кг/м}^2 \text{ час.}$$
$$\frac{6\,000}{1{,}5 \times 2{,}3 \times 6} = 290 \quad „ \quad „$$

Размер поддувал:

$$2 \times 0{,}225 \times 0{,}300 = 0{,}135 \text{ м}^2$$
$$8 \times 0{,}225 \times 0{,}300 = 0{,}540 \quad „.$$

Скорость воздуха в поддувалах:

$$0{,}084 : 0{,}135 = 0{,}62 \text{ м/сек.}$$
$$0{,}252 : 0{,}540 = 0{,}47 \quad „ .$$

Диаметр газопроводов при $v = 1$ м/сек.—0,80 м и 1,30 м.

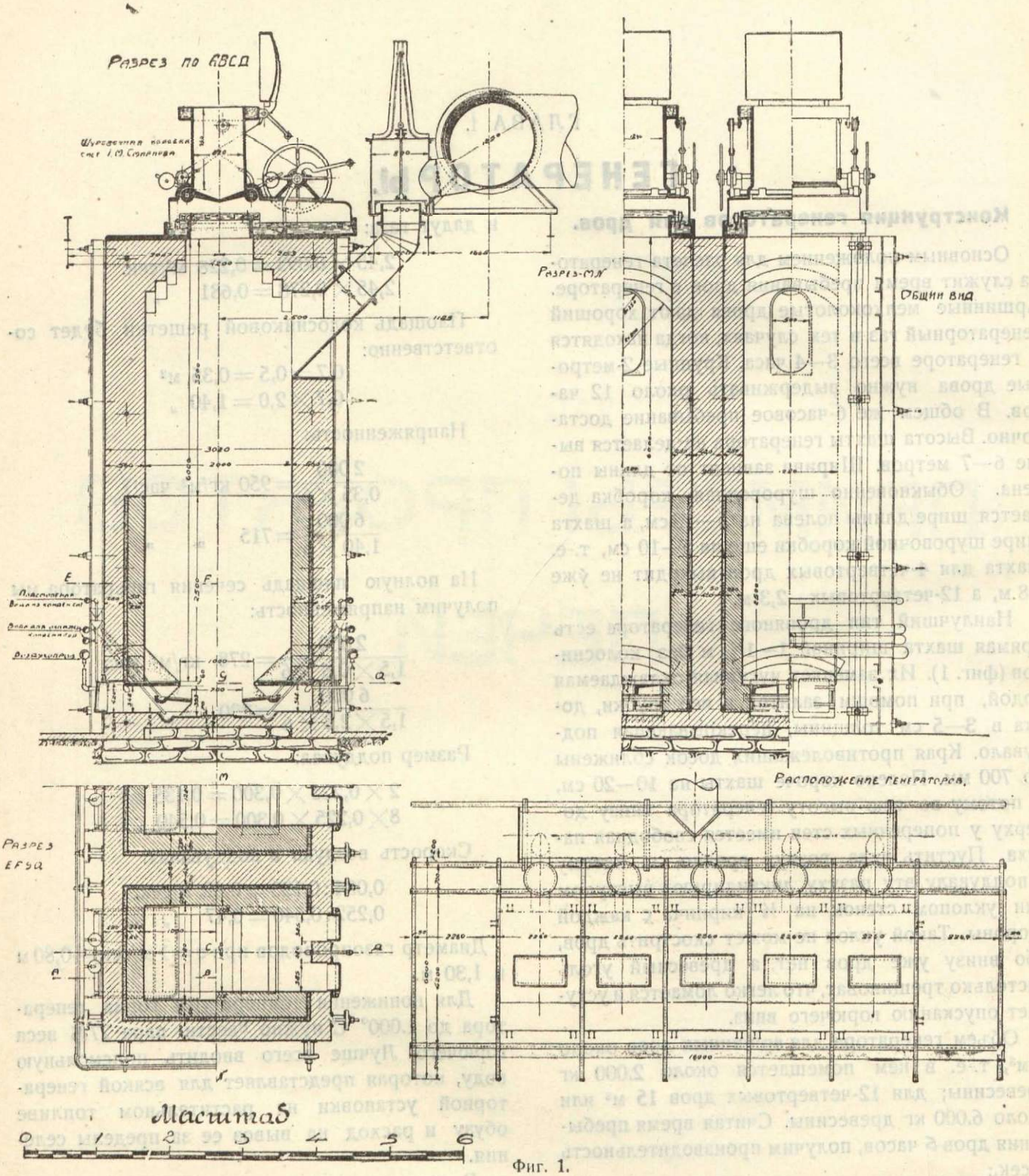
Для понижения температуры горна генератора до 1.000° С нужно ввести пара 27% веса горючего. Лучше всего вводить подсмольную воду, которая представляет для всякой генераторной установки на растительном топливе обузу и расход на вывоз ее за пределы селения.

В поддувале вода вводится при помощи капельников. Что касается смолы, то ее надо лить в шуровочную коробку на дрова. Смола стекает по горячим дровам и углю вниз в горн гене-

---

¹) Такое напряжение возможно, так как генераторы обычно работают с большим разрежением, создаваемым сифоном бр. Сименс (см. ч. II).

Генератор для дров.



Фиг. 1.

ратора и нацело разлагается, обогащая генераторный газ CO, H_2 и CH_4. Опыт показывает, что перегонка смолы не имеет места.

Количество воды, которая вливается в зольник, зависит от крупности и степени сырости дров. Крупные сырые поленья обугливаются только в нижней части генератора и уменьшают количество воды, вливаемой в зольник. Лучше всего наблюдать температуру газа, покидающего генератор, и по ней регулировать приток воды в зольник. Изредка надо определять температуру горна генератора.

Конструкция генератора для торфа.

Торф иногда бывает многозолен и зола легкоплавка. Эти два обстоятельства затрудняют очистку зольника от спекшихся комьев золы. Торфины низа торфяных кладей иногда поступают в генератор с таким значительным содержанием воды, что приходят на колосники даже не обуглившись и сильно студят горн и вводят в него большое количество паров воды, что должно быть учтено при вдувании в генератор пара или введении в зольник подсмольной воды.

Круглая колосниковая корзинчатая решетка с колосниками по производящей конуса с уклоном в 45° представляет чрезвычайно удобное устройство для удаления спекшихся комьев золы. При очистке генератора от них надо держаться такого порядка, что сперва подчищать всю золу, в которой начисто выгорел весь кокс. Затем спускать комья золы с торфяным коксом и оставлять их до следующей чистки.

К этому времени весь кокс выгорит, и золу можно удалить без потери в ней углерода. Вместимость генератора (фиг. 2) равна 30 м³. Время пребывания торфа—6 час. Суточная производительность—120 м³ торфа, или 12 куб. саж., или 1.500 пуд./24 час.; площадью колосниковой решетки надо считать горизонтальное сечение генератора на ее уровне, т.-е. площадь круга в $2^1/_2$ м диаметром, или 4,9 м². Отнеся производительность к 1 м² колосниковой решетки, получим: $1000 : 4{,}9 = \sim 200$ кг/м² час.

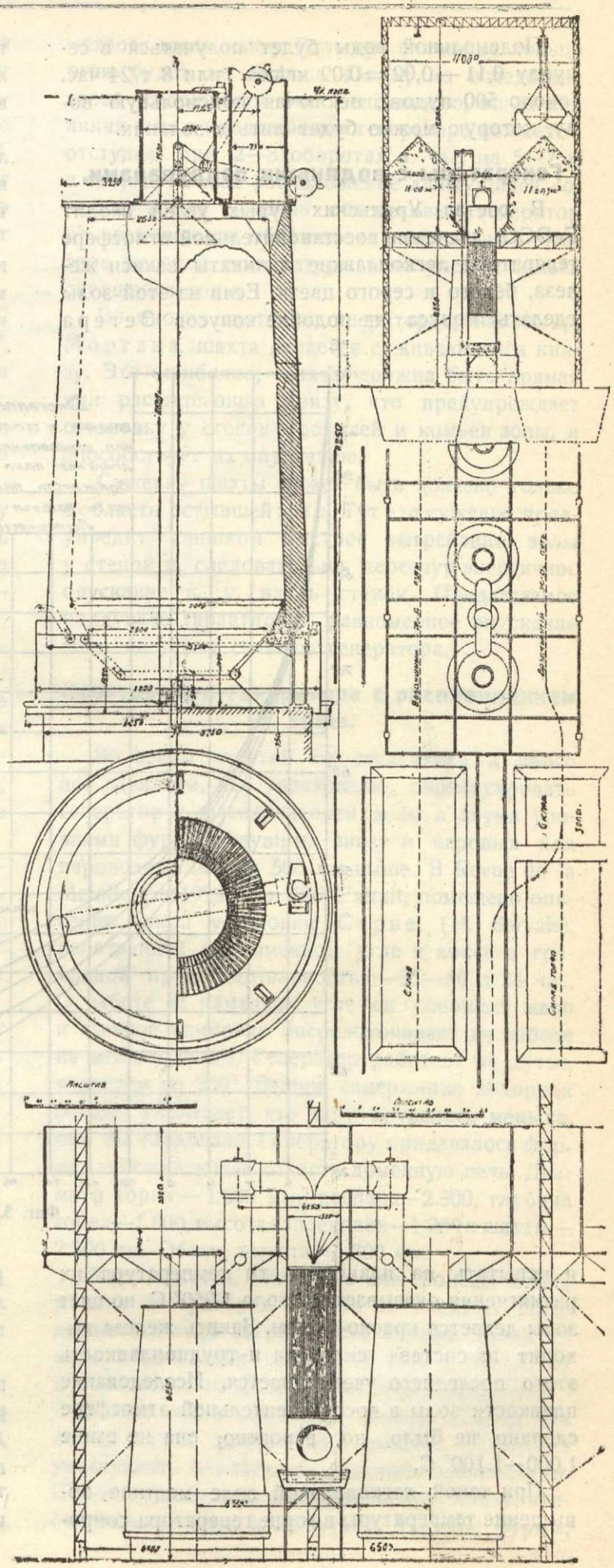
Проектные данные этого генератора:

будет получено сухого генераторного газа . . . . . 0,76 м³/сек.
будет получено сухого генераторного газа . . . . . 0,63 „
водяного пара в генераторном газе 0,11 кг/сек.
расход первичного воздуха при 0° 0,41 м³/сек.
„ воды под колосники . . . 0,02 кг/сек.
расчетная температура газа . . . . 250° С.

На фиг. 2 представлена установка двух таких генераторов с конденсатором посреди них; тут же—полная установка с подачей торфа при помощи крана с захватом. Конденсатор спроектирован по правилам, изложенным ниже (ч. V, глава V).

При емкости запасной коробки в 1 м³, число колош в час будет всего пять; при емкости захвата 2 м³ в сутки потребуется только 60 черпаний. Запас торфа на колошнике предусмотрен 210 м³ (22 куб. саж.), т.-е. на двое суток.

Зола из генераторов вывозится тачкой. При зольности торфа в 8% каждый генератор будет давать 120 пуд./24 час.



Фиг. 2.

Подсмольной воды будет получаться в секунду 0,11 — 0,02 = 0,09 кг/сек. или 8 т/24 час. (около 500 пудов), исключая подсмольную воду, которую можно будет лить в зольник.

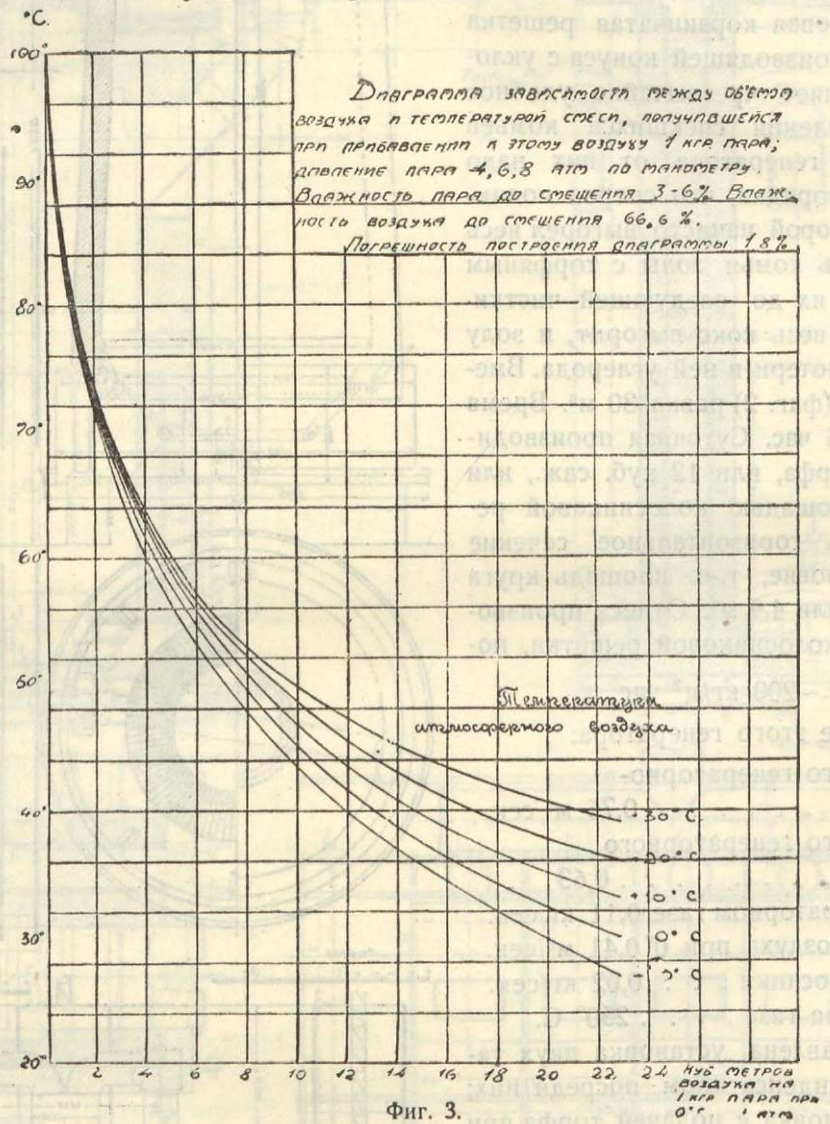
Генераторы с водяными поддувалами.

В состав Уральских бурых углей входит $FeOCO_2$, дающая в восстановительной атмосфере генератора легкоплавкие силикаты закиси железа, белого и серого цвета. Если из этой золы сделать конуса на подобие конусов Зегера и испытать на плавкость, то температура их размягчения оказывается около 1.250° С, но цвет золы делается красно-бурым. Закись железа выходит из состава силиката и трудноплавкость этого последнего увеличивается. Исследование плавкости золы в восстановительной атмосфере сделано не было, но, вероятно, она не выше 1.000—1.100° С.

При такой легкоплавкой золе местное повышение температуры в горне генератора сопровождается образованием комьев золы, загромождающих горны, удалить которые можно только путем обрушения сверху.

Генераторы с водяным поддувалом Керпели, Гильгера и др. работают на вентиляторном дутье, к которому примешивается некоторое количество водяного пара.

Какое количество? Никаких средств контроля изобретатели генераторов не дают. По расчету мы можем подсчитать с совершенно достаточной точностью, что на 1 кг каменного или бурого угля мы должны ввести m м³ воздуха и n кг пара, но способа установить такое соотношение между воздухом и паром мы не имеем.



Фиг. 3.

Итак, правильная работа генератора и строгое соблюдение температуры в горне генератора возможно при условии, что количество пара, даваемого в генератор, будет строго регулироваться. Это не трудно достигнуть, если измерять температуру смеси пара и воздуха, поступающих в горн генератора.

Прилагаемая диаграмма (фиг. 3) (вычисленная Н. В. Грум-Гржимайло) дает по оси ординат температуру смеси пара при 8 атм. с влажностью 3—6% и наружного воздуха с влажностью в 66,6% при температурах от —10° С до +30° С. Ось абсцисс дает объем воздуха в м³ на 1 кг пара. Например, мы имеем: на 1 кг к. у. нужно первичного воздуха 2,57 м³ при 0° С и 0,2853 кг пара. Или на один кг пара нужно воздуха:

$$2{,}57 : 0{,}2853 = 9{,}008 \text{ м}^3.$$

При температуре наружного воздуха 0° С температура смеси будет 47°; при +10° С — 48°.

Итак, измеряя температуру смеси воздуха и пара, мы можем регулировать ход генератора, т.-е. температуру в горне. Но надо оговориться, что данная таблица не может иметь решающего значения при установки генератора. Субъективные условия оценены быть не могут, и поэтому отсчеты температуры, конечно, должны быть исправлены на месте. При установке количества пара наобум мы не можем регулировать температуру горна.

Кроме этого недостатка, в генераторе Гильгера есть недостаток распределения пара четырьмя соплами. Четыре точки в горне генератора обильно снабжаются паром; в них температура должна быть ниже нормальных 1.000° С, в компенсацию чего, в промежутках между ними, температура будет выше 1.000° С, что обязательно вызовет спекание золы в этих местах.

При смешении пара и воздуха вне генератора все части горна генератора будут получать равномерную смесь пара и воздуха и дадут равномерную температуру в горне.

Распределение дутья по площади сечения в генераторах Гильгера и Кернели неравномерно. Воздух вдувается в виде одного или нескольких колец, соответственно чему в генераторе получаются кольцевые зоны повышенной температуры.

Устройство в центре водяного поддувала так называемой головки, или звездочки, затрудняет выгреб золы по всему сечению генератора. Выгребается зола преимущественно у стенок генератора, в центре же стоит.

Предлагаемая конструкция (фиг. 4) представляет чашу, дно которой есть конус естественного откоса песка в воде—24°.

Движение золы по поверхности этого конуса облегчается кривыми лопатками, вдоль верхнего, теневого края которых расположены сто штук круглых отверстий—сопел в 25 мм в диаметре, рассеянных по всей площади сечения генератора. Таким образом, линия огня в предлагаемом генераторе вытянута на длину десяти метров, тогда как у Гильгера сплошное кольцо огня будет не больше 4½ м; но вследствие своей сплошности оно неподвижно, тогда как линия огня в предлагаемом генераторе движется, отступая, при 2—3 оборотах в час, на 5—7 м в секунду. Такое расположение движущихся сопел по всему сечению обеспечивает генератор от возможности образования постоянных центров высокой температуры и получения комьев спекшейся золы.

Во многих системах генераторов, например, Моргана, шахта делается суживающейся книзу. Это ошибочно; шахта должна быть прямая или расширяющая книзу, что предупреждает остановку у стенок костылей и комьев золы, и способствует их опусканию.

Сужение шахты может быть полезно только в области остывшей золы. Тут это сужение предупредит слишком быстрое выгребание золы у стенок и, следовательно, черезчур энергичное опускание к. у. вдоль стенок. Предлагаемое поддувало гарантирует равномерное опускание золы по всему сечению генератора.

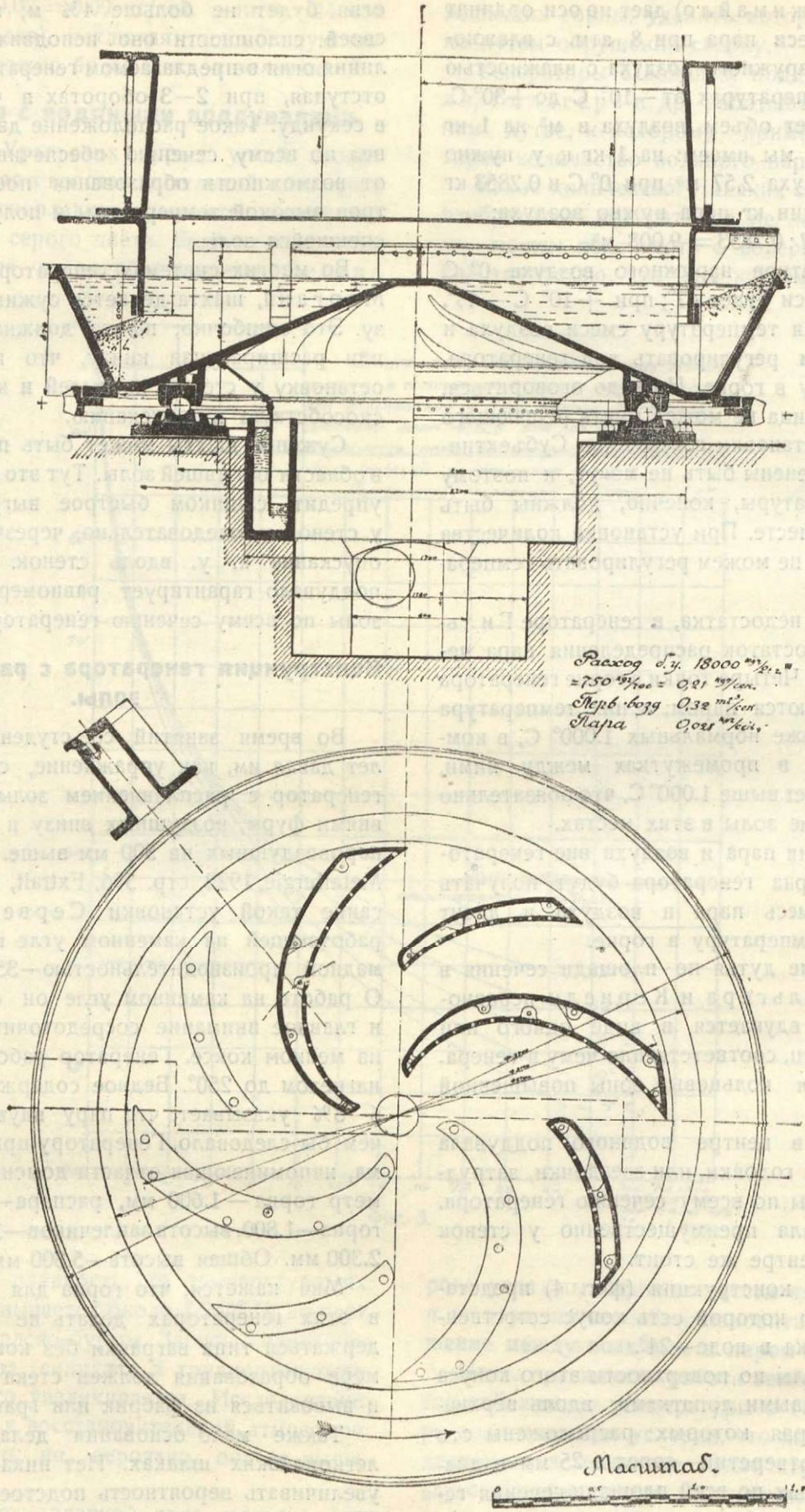
Конструкция генератора с расплавлением золы.

Во время занятий со студентами я много лет давал им, как упражнение, спроектировать генератор с расплавлением золы и двумя уровнями фурм, воздушных внизу и паровых или паровоздушных на 500 мм выше. В Revue de la Metallurgie, 1922, стр. 596, Extrait, помещено описание такой установки Серве (M. Servais), работающей на каменном угле и коксе с громадной производительностью—35—50 т/24 час. О работе на каменном угле он сообщает мало и главное внимание сосредоточивает на работе на мелком коксе. Генератор работает на дутье, нагретом до 250°. Бедное содержание водорода 6—8% указывает, что пару вдувалось меньше, чем бы следовало. Генератору придавалось форма, напоминающая отчасти доменную печь. Диаметр горна — 1.600 мм, распара—2.800, глубина горна—1.800, высота заплечиков—1.200 и шахты—2.300 мм. Общая высота—5.300 мм.

Мне кажется, что горна для копежа шлака в этих генераторах делать не следует. Надо держаться типа вагранки без копежа. Шлак по мере образования должен стекать в вагонетку и вывозиться из фабрик или гранулироваться.

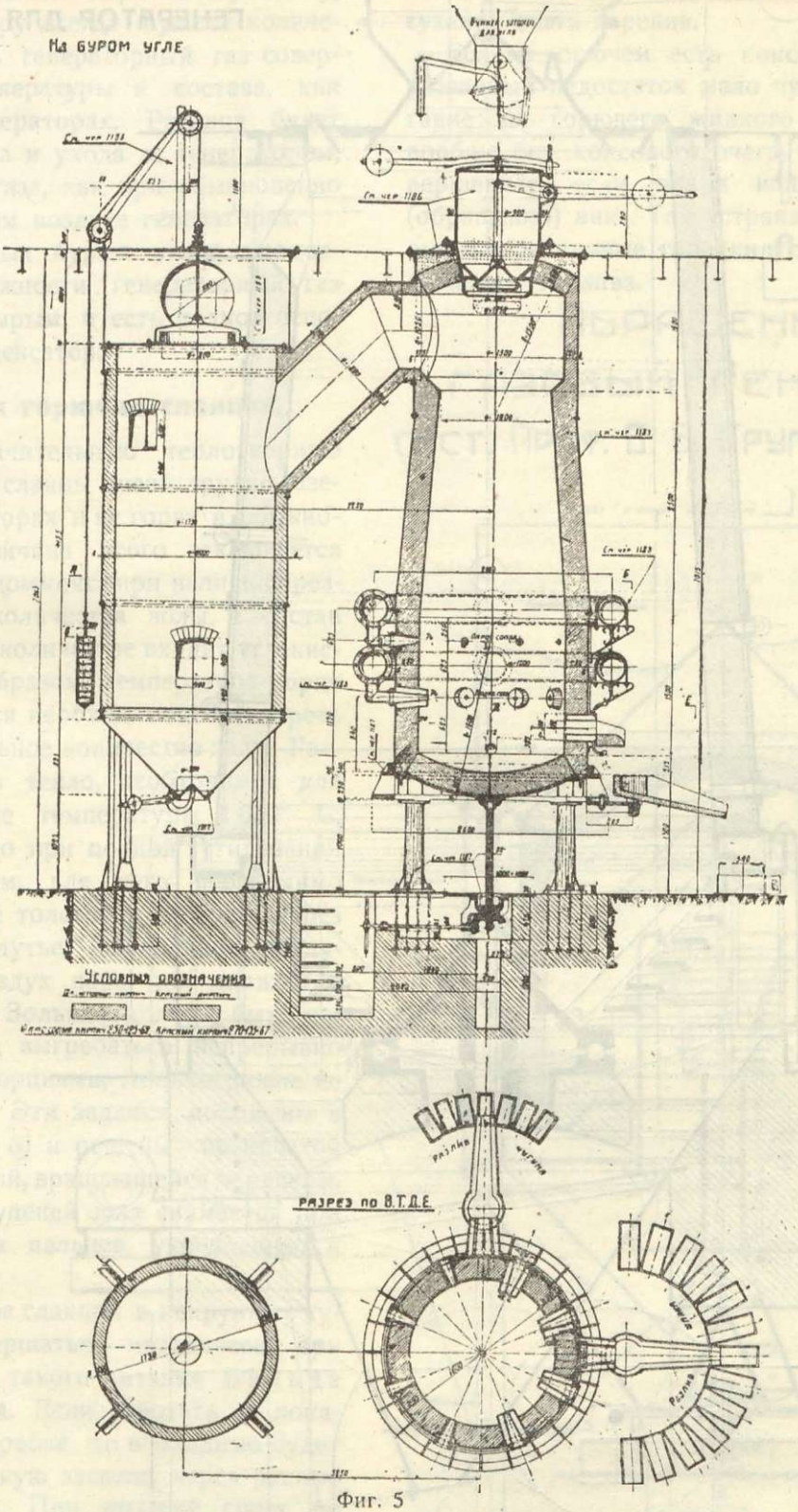
Также мало основания делать распар при легкоплавких шлаках. Нет никаких оснований увеличивать вероятность подстоев заплечиками. Шахту надо делать расширяющейся книзу, чтобы шлак не стыл и не густел. Нижние фурмы,

ВИДОИЗМЕНЕННОЕ ПОДДУВАЛО ГЕНЕРАТОРА ГИЛЬГЕРА.



Фиг. 4

ГЕНЕРАТОР С РАСПЛАВЛЕНИЕМ ЗОЛЫ.



Фиг. 5

расплавляющие золу в шлак на сухом дутье, надо располагать на небольшей высоте над лещадью; сделано 250 мм и 500 мм (у летки), (фиг. 5).

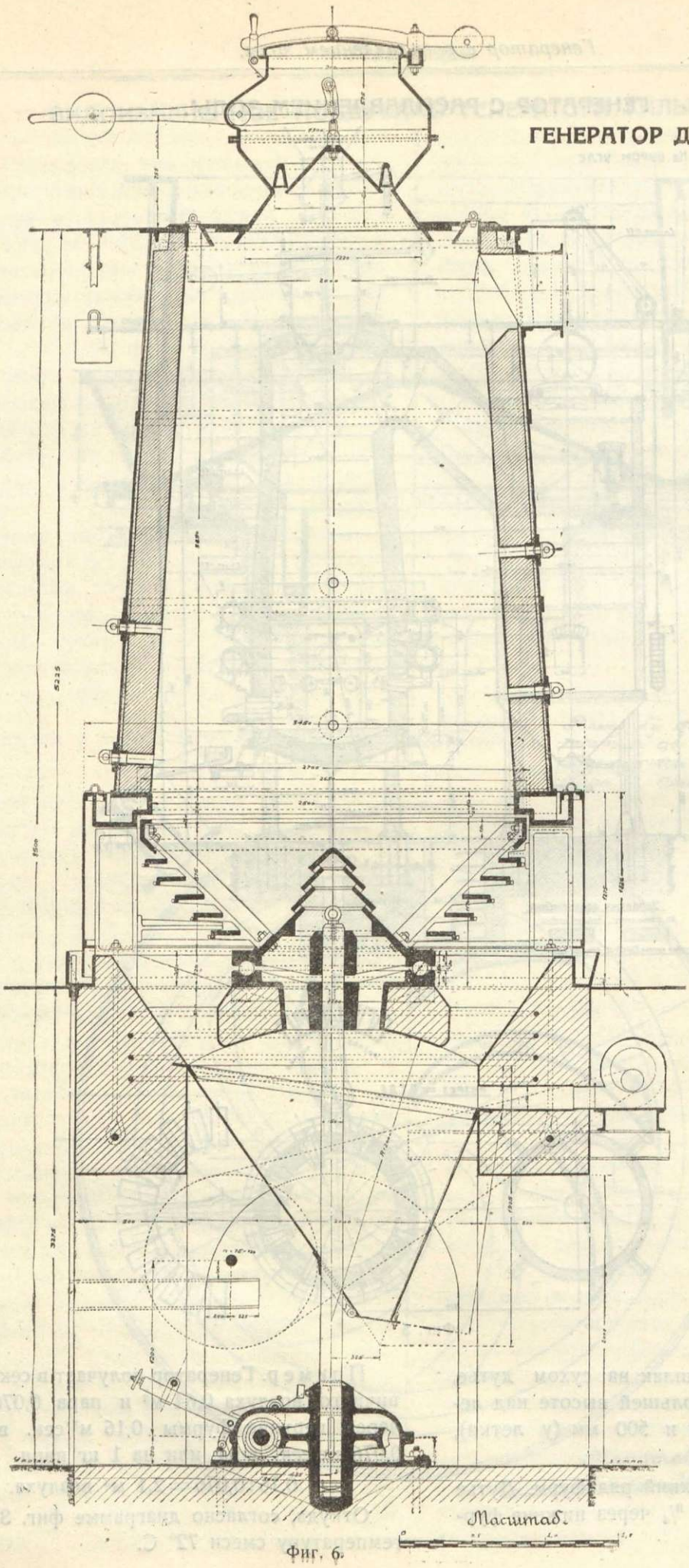
Весь пар дается в верхний ряд фурм. Дутье можно распределить так: $^3/_4$ через нижние фурмы и $^1/_4$ через верхние.

Пример. Генератор получает в секунду первичного воздуха 0,64 м³ и пара 0,076 кг; или через верхние фурмы 0,16 м³/сек. воздуха и 0,076 кг/сек. пара; или на 1 кг пара

$$0{,}16 : 0{,}076 = 2{,}1 \text{ м}^3 \text{ воздуха.}$$

Откуда, согласно диаграмме фиг. 3 получим температуру смеси 72° С.

ГЕНЕРАТОР ДЛЯ СЛАНЦЕВ.



Фиг. 6.

Помещая в воздушной коробке термометр, можно дать генератору всегда нужное количество пара и получить генераторный газ совершенно той же температуры и состава, как в обыкновенных генераторах. Разница будет в простоте устройства и ухода за генератором, а не в температуре газа, как при обыкновенно действующих на сухом воздухе генераторах.

При очень влажных бурых углях с содержанием до 33% влажности генераторный газ может быть очень сырым, и есть полное основание поставить конденсатор.

Генератор для горючих сланцев.

Несмотря на значительную теплотворную способность, горючие сланцы очень трудно газифицируются в генераторах и не горят в обыкновенных топках. Причина этого заключается в бедности их углеродом кокса при наличии чрезвычайно большого количества золы, в состав коей в значительном количестве входит углекислая известь. Таким образом, температура горна генератора понижается необходимостью нагреть и разложить значительное количество золы. Расчет показывает, что тепло, необходимое для поддержания в горне температуры 1.000° С, может быть получено при полной утилизации теплоты золы дутьем, для чего необходимо держать в генераторе толстый слой золы, через которую пропускать дутье. Об водяном поддуве, введении в воздух пара, мы должны в этом случае забыть. Зольник должен быть сухой, но зола должна выгребаться непрерывно очень маленькими порциями, только после ее полного охлаждения. Эти задания положены в основу проекта (фиг. 6) и решены корзинчатой колосниковой решеткой, вращающейся червяком. С горизонтальных ступеней зола снимается при помощи неподвижных пальцев, укрепленных к колоннам генератора.

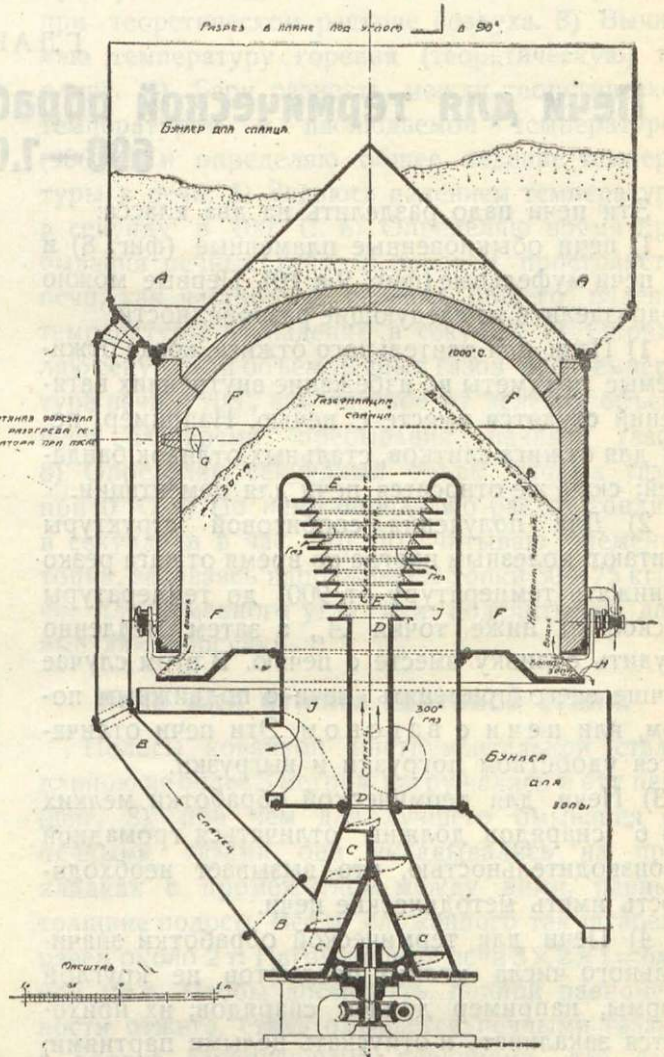
Питание генератора сланцем в некрупных кусках должно бы совершаться методически при помощи коробки для такого питания Бильда (Bild) или Моргана. Если работать на показанной на чертеже коробке, то небходимо будет установить методическую засыпку через равные промежутки времени. При засыпке сразу по несколько коробок в горн придет сырой сланец, и вся работа генератора будет испорчена, вследствие понижения температуры горна.

Обращенный генератор.

Горение обыкновенно производится с отводом пламени вверх. Это невыгодно: раскаленные продукты горения покидают очаг горения, что имеет своим следствием охлаждение и затухание очага горения.

Если в горючем есть коксовый остаток, то указанный недостаток мало чувствителен. Сжигание же горючего жидкого и газообразного, вообще без коксового очага, идет гораздо совершеннее, если пламя направить инвертно (обращенно) вниз. Так устраиваются ныне газовые и керосиновые горелки и ставятся форсунки пылевого топлива.

Обращенный газовый генератор сист. Проф. В. Е. Грум-Гржимайло.



Фиг. 7.

Сланцы представляют бескоксовое горючее: горение его, особенно в генераторе, было бы полезно направить обращенно. Описываемый генератор (фиг. 7) представляет попытку построить такой генератор.

Сланец из бункера *AA*, по рукаву *BB*, подается к Архимедову винту *CC*, подается снизу

по осевой трубе генератора *DD* и дальше через решетку *EE* в полость генератора *FF*.

Генератор представляет цилиндр, перекрытый куполом без каких-либо отверстий наверху. Для разогрева его при пуске имеются нефтяные форсунки *G*, которые, раз подкупольное пространство разогрето докрасна, убираются, и отверстия замазываются.

Сланец поднимается Архимедовым винтом и заполняет полость генератора в виде конуса. Зола выгребается вручную или автоматически с кольца *HH*.

Во время работы полость генератора заполнена золой и сланцем, как показано на чертеже. Воздух вступает в щель между стеной генератора и кольцом *HH*. Охлаждает золу, нагревается и выжигает углерод из золы. Под куполом *FF* он встречает сланец, сжигает его и раскаливает купол, который является раскаленным очагом горения этого генератора.

Раскаленные газы из-под купола просасываются эксгаустером вниз, через поступающий в генератор свежий сланец. Тут сланец сохнет, из него отгоняются масла и продукты сухой перегонки, и полученный генераторный газ поступает в цилиндр *JJ* и через эксгаустер гонится в печь.

ГЛАВА II.

Печи для термической обработки стали для температур 600—1.000° С.

Эти печи надо разделить на два класса:

I) печи обыкновенные пламенные (фиг. 8) и II) печи муфельные (фиг. 9 и 10). Первые можно подразделить на следующие разновидности:

1) Печи для длительного отжига, когда отжигаемые предметы во избежание внутренних натяжений студятся вместе с печью. Например, печи для отжига слитков, стальных отливок бандажей; сюда же относятся печи для цементации.

2) Для получения сорбитовой структуры считают полезным иногда во время отжига резко понижать температуру от 900° до температуры несколько ниже точки A_r, а затем медленно студить отливку вместе с печью. В этом случае лучше всего применять печи с подвижным подом, или печи с вагоном. Эти печи отличаются удобством погрузки и выгрузки.

3) Печи для термической обработки мелких до 6″ снарядов должны отличаться громадной производительностью, что вызывает необходимость иметь методические печи.

4) Печи для термической обработки значительного числа мелких предметов не круглой формы, например донцев снарядов; их приходится закаливать и отпускать целыми партиями; загружать в печи по нескольку десятков и даже сотен этих предметов.

5) Для термической обработки прутков сортовой стали, например для взрывателей, надо иметь печи, приспособленные для непрерывной работы, т.-е. одновременной посадки и выдачи, так называемые многоподовые печи.

6) Для термической обработки крупных снарядов и орудий применяются печи-колодцы, куда вешается нагреваемое орудие или крупный снаряд.

7) Наконец, к типу закалочных печей можно отнести печи со свинцовыми или другими ваннами.

Особый тип составляют печи специально для отпуска, для температур ниже 600° С.

Все печи для термической обработки должны обладать следующими качествами: нагрев должен быть ровный, т.-е. предмет должен иметь одинаковую температуру как в горизонтальном, так и в вертикальном направлении. Этому условию можно удовлетворить только в том случае, когда давление печных газов на поду печи будет выше атмосферного. Только в том случае, когда ореол печных газов спустится до низа заслонки, можно быть спокойным, что на поду не будет тонкого слоя холодного воздуха, студящего под и низ расположенных на нем предметов.

Вместе с тем остывшие печные газы не должны застаиваться на поду. Под всех печей для термической обработки должен быть хорошо канализирован, и на поду не должно быть мешка холодных газов.

Характер пламени не должен быть острым. Факельное пламя, как следствие избытка кислорода воздуха в печных газах, совершенно не пригодно для печей этого типа. Напротив того, „томильный пыл", мягкое, бескислородное пламя особенно для них пригодно. Но пламя не должно быть копотливым, что делает работу в фабрике тяжелой для рабочего персонала. Избегнуть копоти не трудно, увеличивая подсводовое

пространство в печи. Пребывание пламени под сводом печи, в мешке горячих газов, лишние две, три секунды весьма полезно. Реакции горения закончатся в этом случае вне соприкосновения с холодными предметами, и термически обрабатываемые предметы будут омываться бескислородным пламенем, состоящим из CO_2, H_2O и N_2.

Такое пламя не окисляет поверхности нагреваемых предметов, не покрывает их слоем окалины, что делает употребление муфельных печей излишним, равно как и свинцовых ванн.

Покойный Н. И. Беляев допускал применение муфеля только для закалки 12″ бронебойных снарядов и свинцовых ванн для закалки мелкого слесарного инструмента. Во всех остальных случаях он применял простые пламенные печи, которых я ему спроектировал великое множество.

Если во время нагревания снаряд покроется окалиной, то во время закалки куски окалины могут отскочить, и получится закалка пятнами.

Во время отжига слой окалины децементирует поверхность стального предмета, что недопустимо для режущих инструментов.

Все вместе делает обязательным проектирование печей для термической обработки с расчетом на горение с теоретическим расходом воздуха. Все проектированные мною печи для термической обработки имеют обширное подсводовое пространство, где происходит реакция горения, так что посаженные в печь предметы омываются печными газами с законченными уже реакциями. Благодаря такой конструкции печей мне удавалось вполне удовлетворить требованиям Н. И. Беляева, который испытывал печи так: он к одному гальванометру присоединял два пирометра, располагая один на поду, а другой на 500 мм выше. К его полному удовлетворению разность их показаний не превышала погрешности наблюдений.

Пишу это для неопытных читателей, которые могут найти высоту рабочего пространства в моих печах преувеличенной.

Увеличение высоты печей не сопровождается увеличением расхода топлива. У меня в памяти осталась переделка печей для закалки рессор Александровского завода Октябрьской железной дороги. Бельгийская печь имела высоту свода над подом около 200 мм. Я переделал ее, устроив хорошую канализацию пода, свод же поднял над подом на 750 мм. Мой заказчик был не мало удивлен, когда оказалось, что расход каменного угля не увеличился, а уменьшился после такой переделки, несмотря на увеличение производительности печи более, чем в два раза.

Это—общее примечание к моим печам. Они очень высоки, громадного объема. Но громадный их объем не вызывает увеличения расхода топлива. Причина этому ясна. Увеличивается мешок горячих газов под сводом, т.-е. увеличивается сожигательная камера, где заканчиваются реакции горения. Благодаря этому обстоятельству в моих печах происходит горение с небольшим избытком воздуха, и в соприкосновение с холодными предметами приходит пламя с законченными реакциями. Печи не коптят, и в трубу не выносятся несгоревшие элементы пламени.

Все печи термической обработки я рассчитываю так:

1) Вычерчиваю и вычисляю объем рабочего пространства. 2) Считаю топливо сгоревшим при теоретическом расходе воздуха. 3) Вычисляю температуру горения (теоретическую) топлива. 4) Беру разность между теоретической температурой и наблюдаемой температурой (900° С) и определяю общее падение температуры в печи. 5) Задаюсь падением температуры в секунду в 100° С. 6) Определяю время пребывания печных газов в рабочем пространстве печи, как частное от деления общего падения температуры на падение в секунду. 7) Определяю секундный объем печных газов при температуре печи в 900°, как частное от деления объема печи на время пребывания печных газов. 8) Определяю секундный объем печных газов при 0° С. 9) По нему определяю расход топлива в секунду и в час. 10) Подсчитываю элементы топки, задаваясь напряжением топки 50—75 кг/м² час для каменного угля, или подсчитываю данные для форсунки.

Печь для отжига сортовой стали.

Полосы кованной инструментальной стали, длиною не более 3 метров, нагружались в эту печь (фиг. 8), при чем для лучшего омывания их печными газами они укладывались на прокладках с промежутком между ними, равным толщине полосы. Вес м³ сложенного так штабеля равен около 2 т. Нагрузка всей печи 3×2×1=6м³, или 12 т. Чтобы достигнуть полной равномерности отжига, сталь омывается печными газами с вполне законченными реакциями, для чего выше штабеля стали остается свободное подсводовое пространство 1.250 мм высоты. Сталь укладывается на арки, перекрывающие три дымовые камеры в 1.000 мм высотой. Дымовые боровки взяты из дымовых камер снизу и входят в общий дымовой боров у его пода.

Такая конструкция дает все преимущества остывшей струйке печных газов достигнуть,

в самый короткий срок дымового борова; штабель сортовой стали будет прогреваться очень быстро и совершенно равномерно в горизонтальном сечении.

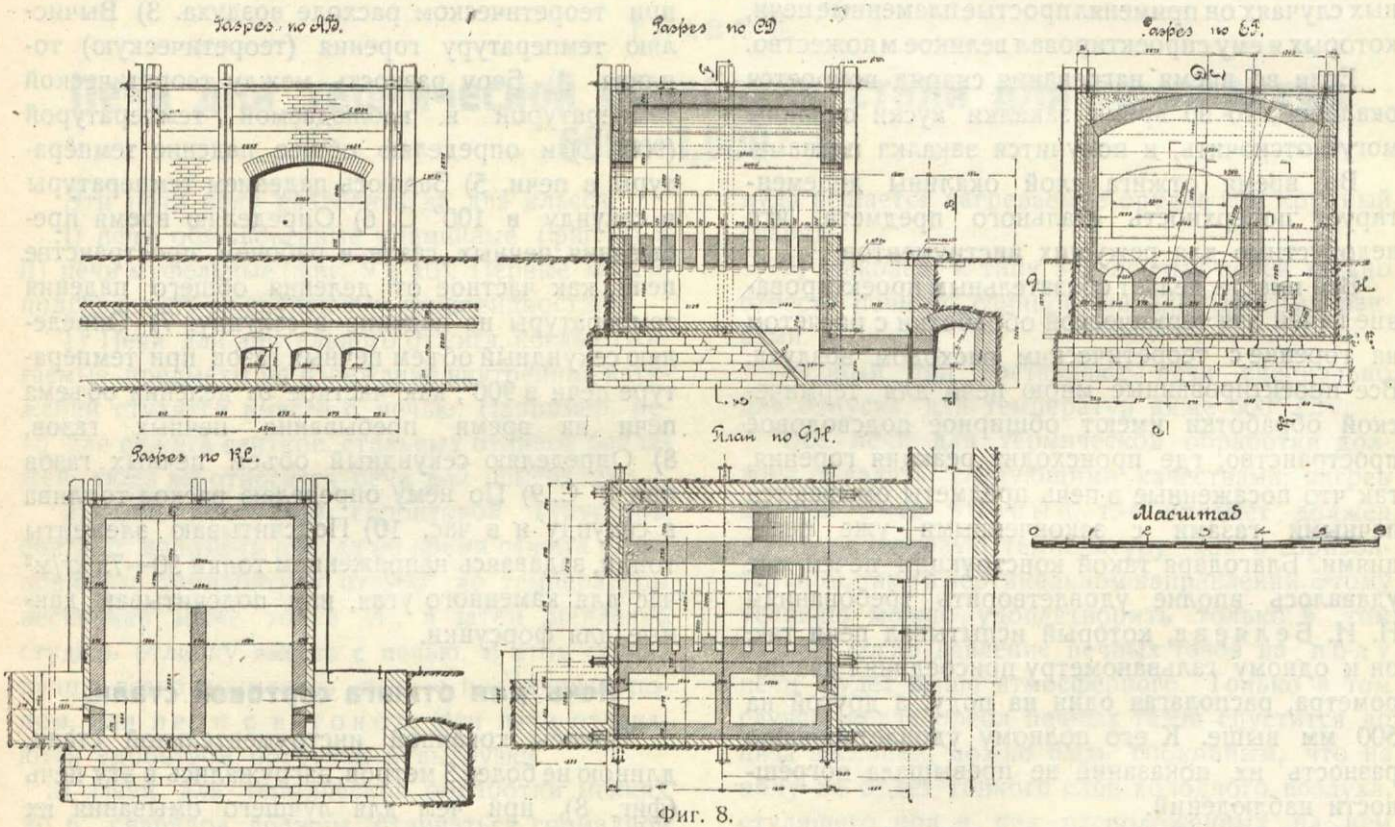
Что касается прогрева стали по вертикали, то, конечно, верхние ряды прогреваются скорее нижних. Пирометр для наблюдения температуры отжига должен быть поставлен выше верхнего ряда и должен контролировать подъем температуры не выше указанной нормы. Бруски стали ряд за рядом будут достигать этой температуры, и печь должна быть остановлена, когда нижний ряд стали достигнет назначенной температуры. Разница в термической обработке верхнего и

Печь с двойным выдвижным подом.

Для приготовления остроконечных бронебойных ружейных пуль каталась круглая сортовая сталь около 8 мм в диаметре. Ее надо было отжечь, выточить пули и затем их закалить.

Бруски в 2.000 мм длины присылались связанными в пучки. Пучки укладывали на выдвинутую часть пода (фиг. 9) в штабель, прокладывая их прокладками, гарантирующими точность общего абриса штабеля. Часть пода, нагруженная сталью, вдвигалась в раскаленную до температуры отжига печь. Штабель, ранее того отжигавшийся в печи, выходил наружу. Ему давали медленно остывать на воздухе. Затем разбирали и на его месте

ПЕЧЬ ДЛЯ ОТЖИГА СОРТОВОЙ СТАЛИ.



Фиг. 8.

нижнего слоев стали будет только в продолжительности отжига; наверху она будет больше, чем внизу.

Топливо в данном случае—нефть. Форсунка—воздушная. Она поставлена ниже уровня пода печи, чтобы создать на поду печи положительное давление. Паровые форсунки не могут работать при давлении в печи на их уровне выше атмосферного, ибо инжектирующая способность паровых форсунок равна нулю.

Печи такого типа работали в Путиловском и других заводах.

Они также хороши для отжига бандажей, стальных отливок и слитков.

собирали новый штабель, который в свою очередь вдвигали в печь.

Таким образом, работа шла без перерыва. Печь была построена на одном из Ленинградских заводов.

Чтобы обеспечить равномерность температуры отжига, печи была дана общая высота 1.875 мм, т.-е. над штабелем была оставлена сожигательная камера 1.250 мм. Под штабелем были сделаны канализационные каналы 125×125 мм числом шесть и один сдвоенной ширины в средине штабеля. Четыре дымовых пролета сделаны по углам печи. Хотя форсунки поставлены вертикально и в средине печи, но-

неравномерности в распределении температуры нечего было опасаться, ибо высота камеры горения гарантировала равномерное распределение пламени.

Печь с выдвижным на вагоне подом для отжига стальных отливок и слитков.

Эта печь (фиг. 10) построена на заводе Электросталь. Для лучшей канализации пода из-под слитков печные газы уводятся при помощи борозд в 225 мм высотой. Конструкция вагона показана на фиг. 75, части III. Его железная рама не должна представлять собой мешка горячих газов, и под должен свободно омываться воздухом. На том же чертеже можно видеть конструкцию песчаного затвора.

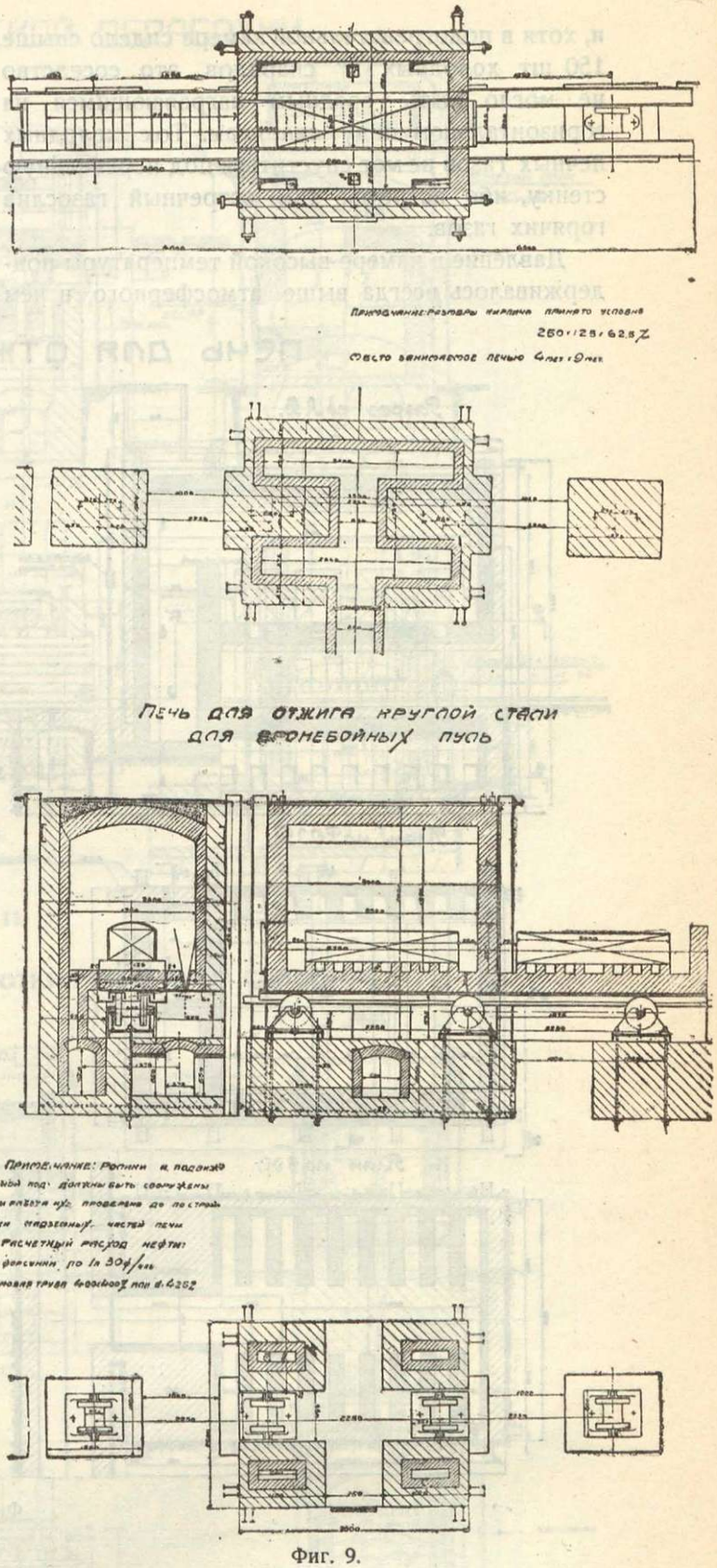
Методические печи для термической обработки снарядов.

Эти печи были выработаны на Путиловском заводе в сотрудничестве с Н. И. Беляевым и В. Н. Ивановым. Затем их было выстроено очень много, и большая часть мелких снарядов в последние годы войны была обработана в этих печах. Основное задание было: дать печи для массовой термической обработки снарядов при наименьшем количестве занятых рабочих. Несмотря на гидравлическую нерациональность наклонных восстающих подов, я должен был согласиться с В. И. Ивановым, что нужно построить печи так, чтобы снаряды сами бежали от садочного окна к выпускному окну, около которого находились закалочные баки. На модели был найден уклон, по которому снаряды сами катятся вниз в камеру высокой температуры. В наклонном поду укладывались рельсы, опирающиеся на арки. В зазоры между рельсами уходили в дымовой пролет остывшие струйки печных газов.

Наклонный под перед топкой в камере высокой температуры переходил в горизонтальный. Тут скатывающиеся снаряды останавливались, окончательно нагревались до температуры закалки или отпуска и через определенные промежутки времени вынимались клещами закальщика и замачивались в баке с водой, расположенном у самой заслонки.

Таким образом, у печи было всего два человека при загрузке и при закалке. 6″ снаряды спускались по поду в два ряда; 3″—в три ряда; закалка и отпуск шли идеально, и печи распространились по заводам с громадной быстротой.

Совершенно равномерная температура камеры высокой температуры обеспечивалась впервые в этих печах мною примененной перевальной



Печь для отжига круглой стали для бронебойных пуль

Фиг. 9.

стенкой или занавеской, как мы ее называли.

Перевальная стенка опускалась на под настолько, чтобы газослив касался пода. Таким образом, камера высокой температуры совершенно уединялась от подогревательной камеры

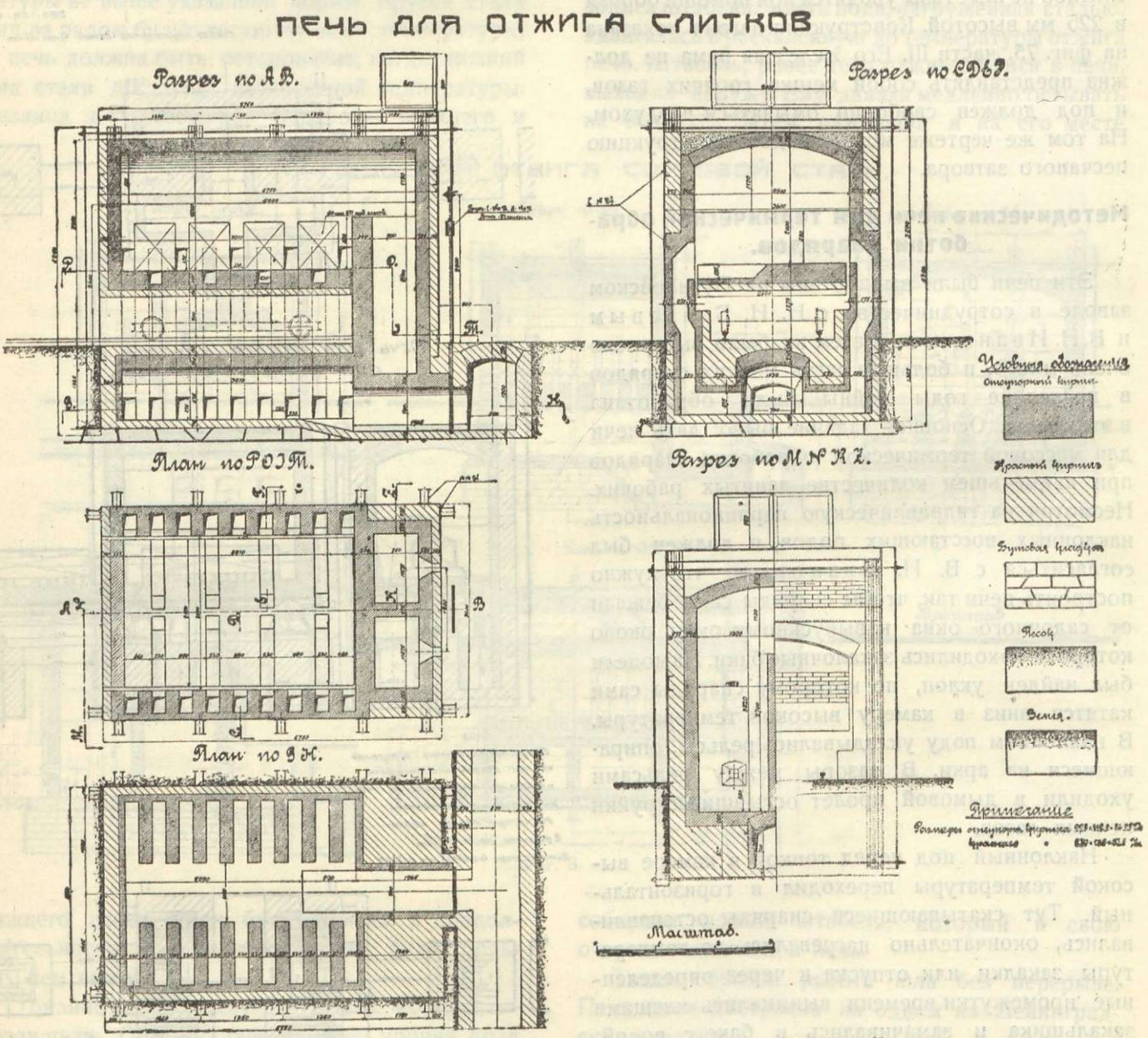
и, хотя в подогревательной камере сидело свыше 150 шт. холодных 3″ снарядов, это соседство не могло быть вредным нагревающимся на горизонтальном поду снарядам. Ток холодных печных газов не мог спуститься под перевальную стенку, ибо встречал там встречный газослив горячих газов.

Давление в камере высокой температуры поддерживалось всегда выше атмосферного, в чем

Таким образом, на поду достигалась идеально ровная температура.

Высота камеры делалась в 1.750 мм, т.-е. такой громадной высоты и емкости, что на под приходили только продукты полного горения печных газов и пирометром нельзя было уловить никакой разницы в температуре печи.

Эти печи строились на всяком горючем. Трудности были встречены мною только при пуске



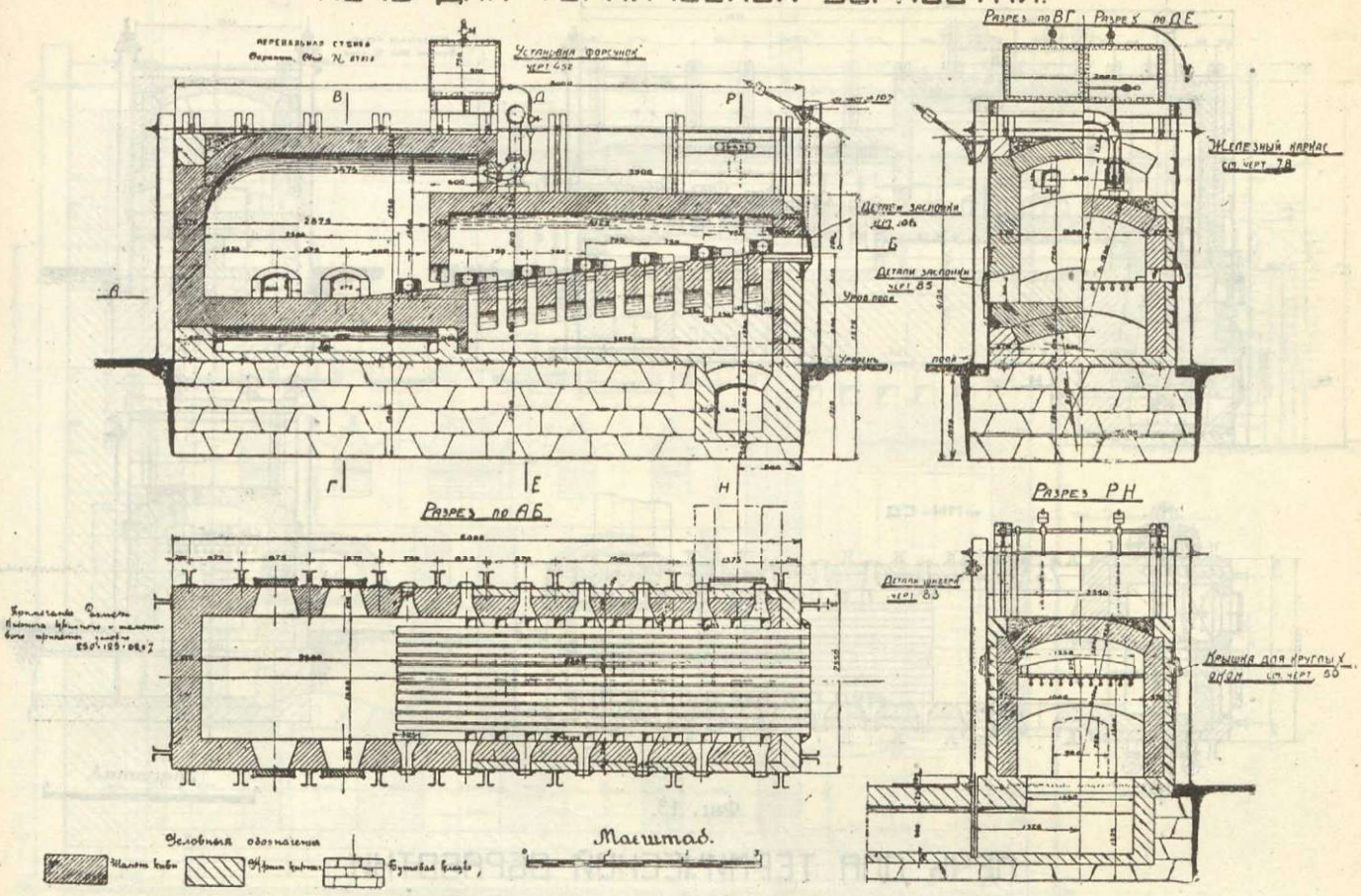
Фиг. 10.

закальщик удостоверялся выбивающимся из-под низа заслонки ореолом печных газов. Мало того, колосники печи опускались на 2.000 мм ниже пода камеры высокой температуры, что создавало такой напор печных газов, что при открытии даже всех четырех заслонок наружный воздух не мог проникнуть в печь.

печей на паровых форсунках (фиг. 11). Для меня было совершенно новостью, что эжектирующее действие паровой форсунки равно нулю. Пришлось форсунки паровые сменить на форсунки от дутья вентиляторов. Эти форсунки работают от воздуха дутья и не должны всасывать нужный для горения воздух.

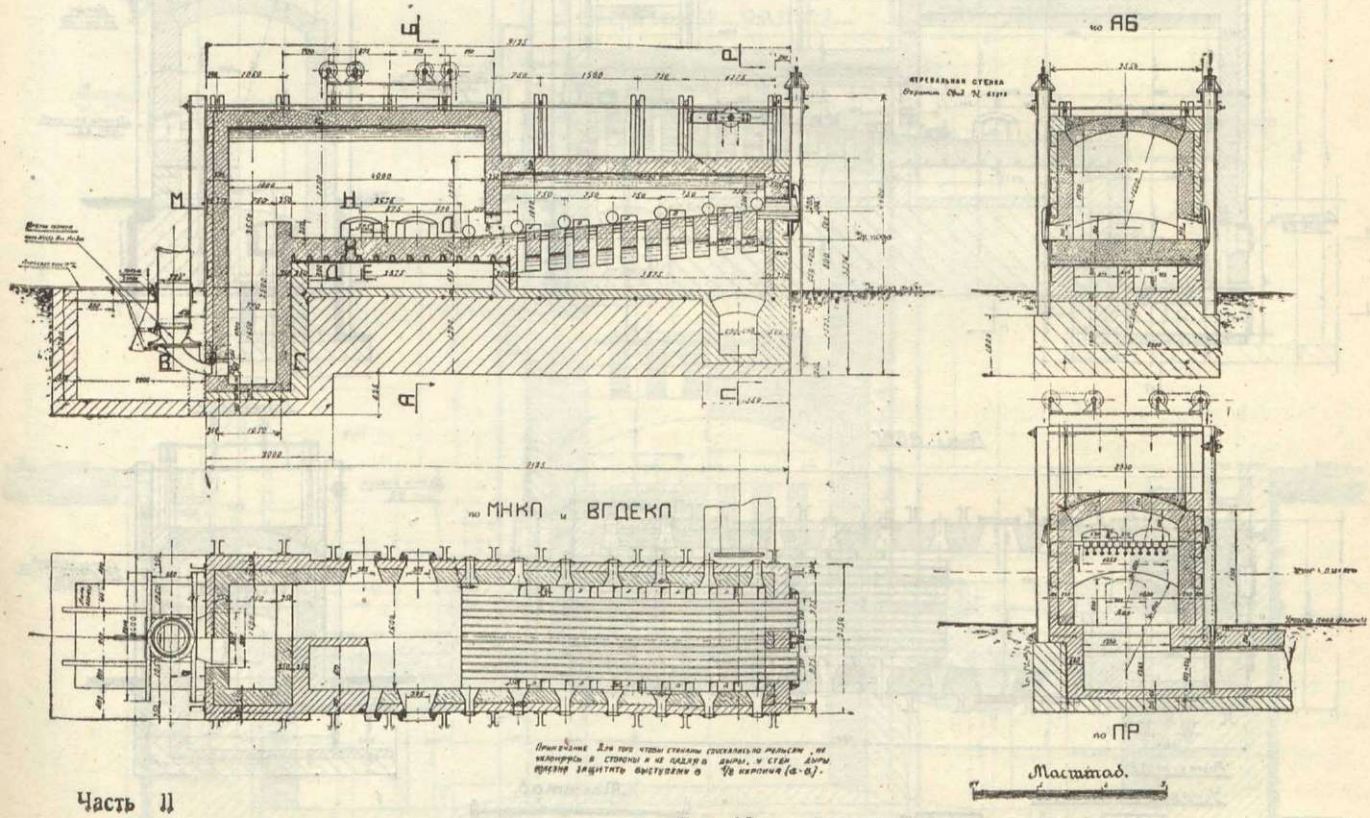
Для нефти

ПЕЧЬ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.



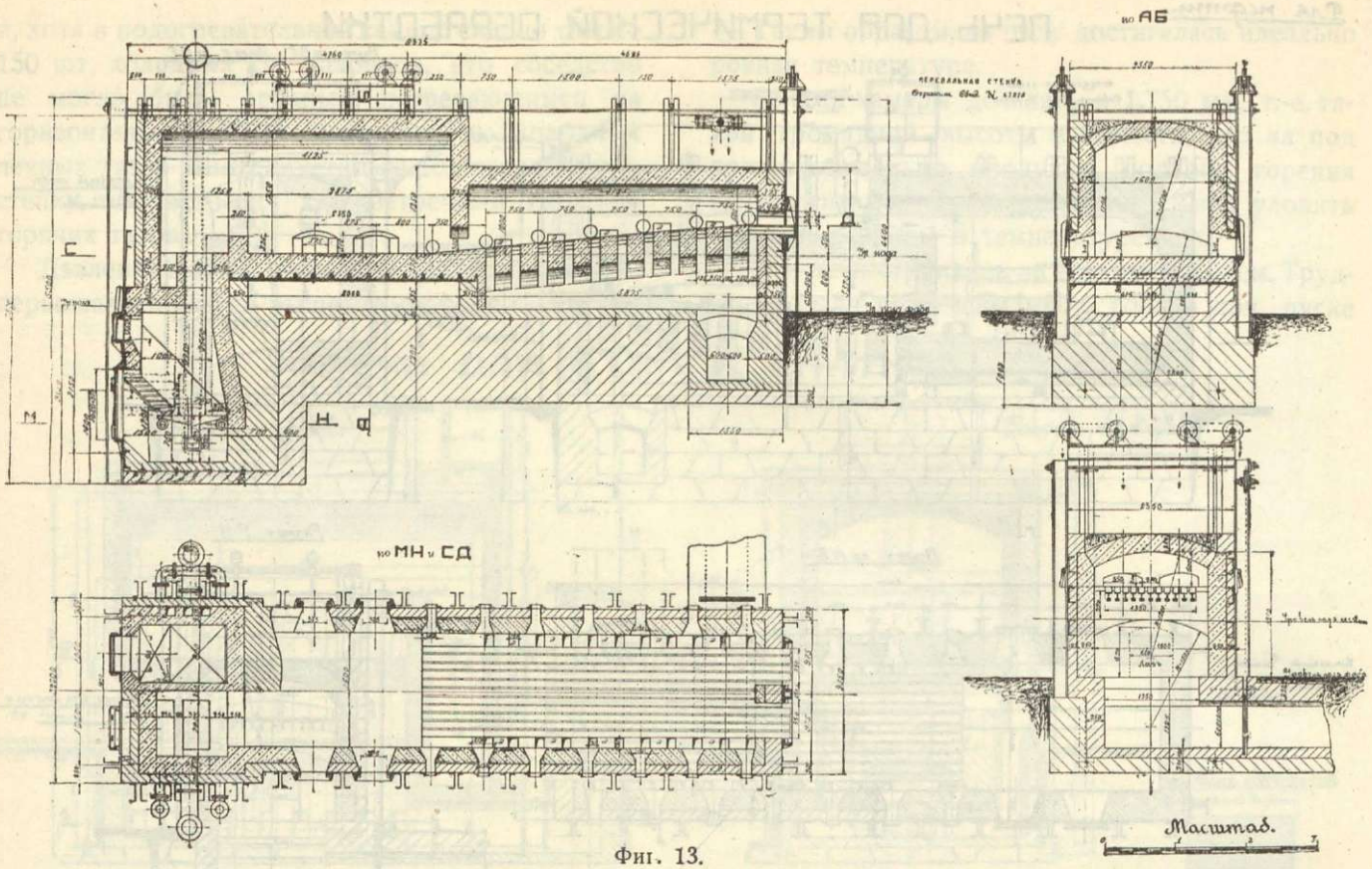
Фиг. 11.

ПЕЧЬ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАКАНОВ 6" СНАРЯДОВ.



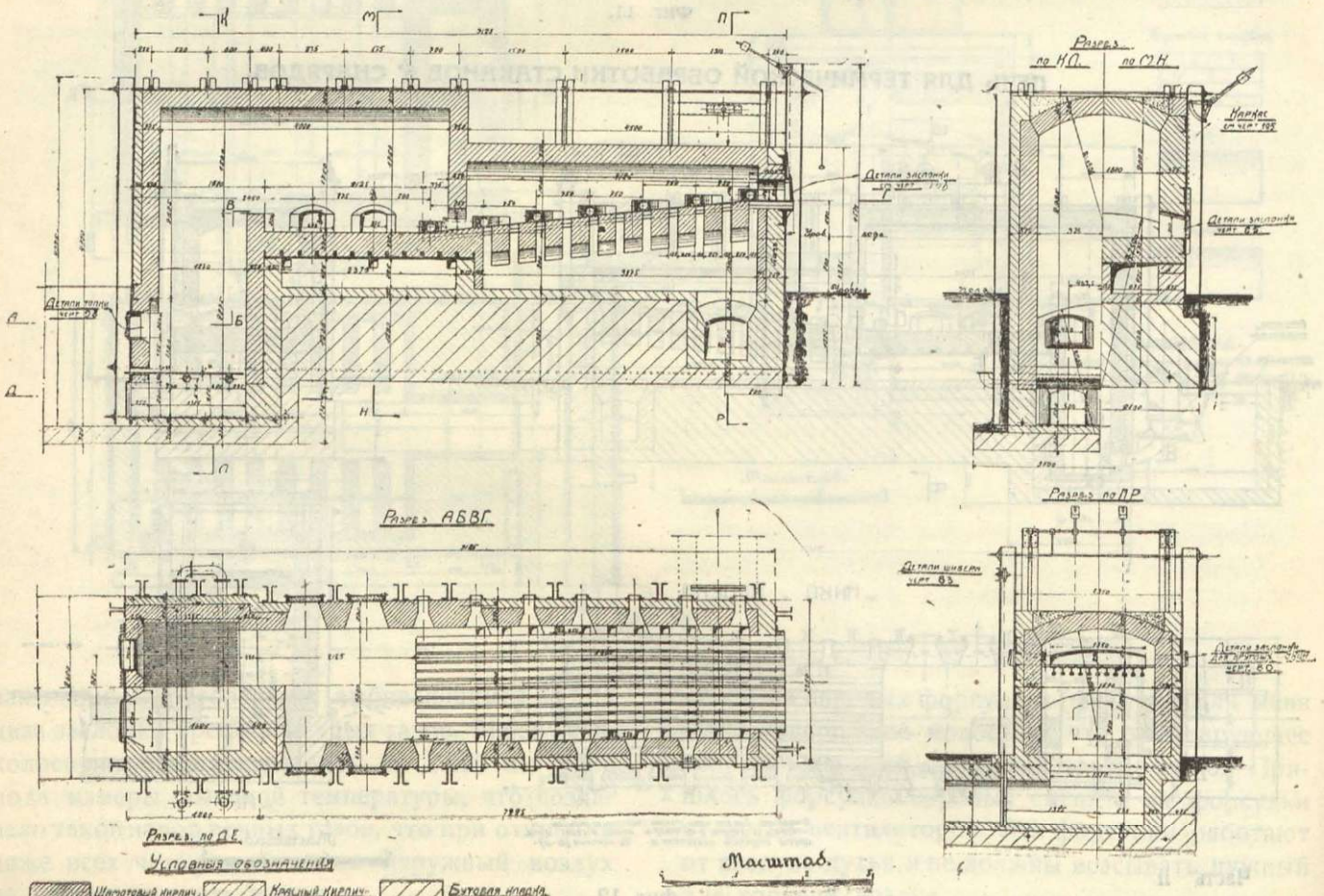
Фиг. 12

ПЕЧЬ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАКАНОВ 6" СНАРЯДОВ



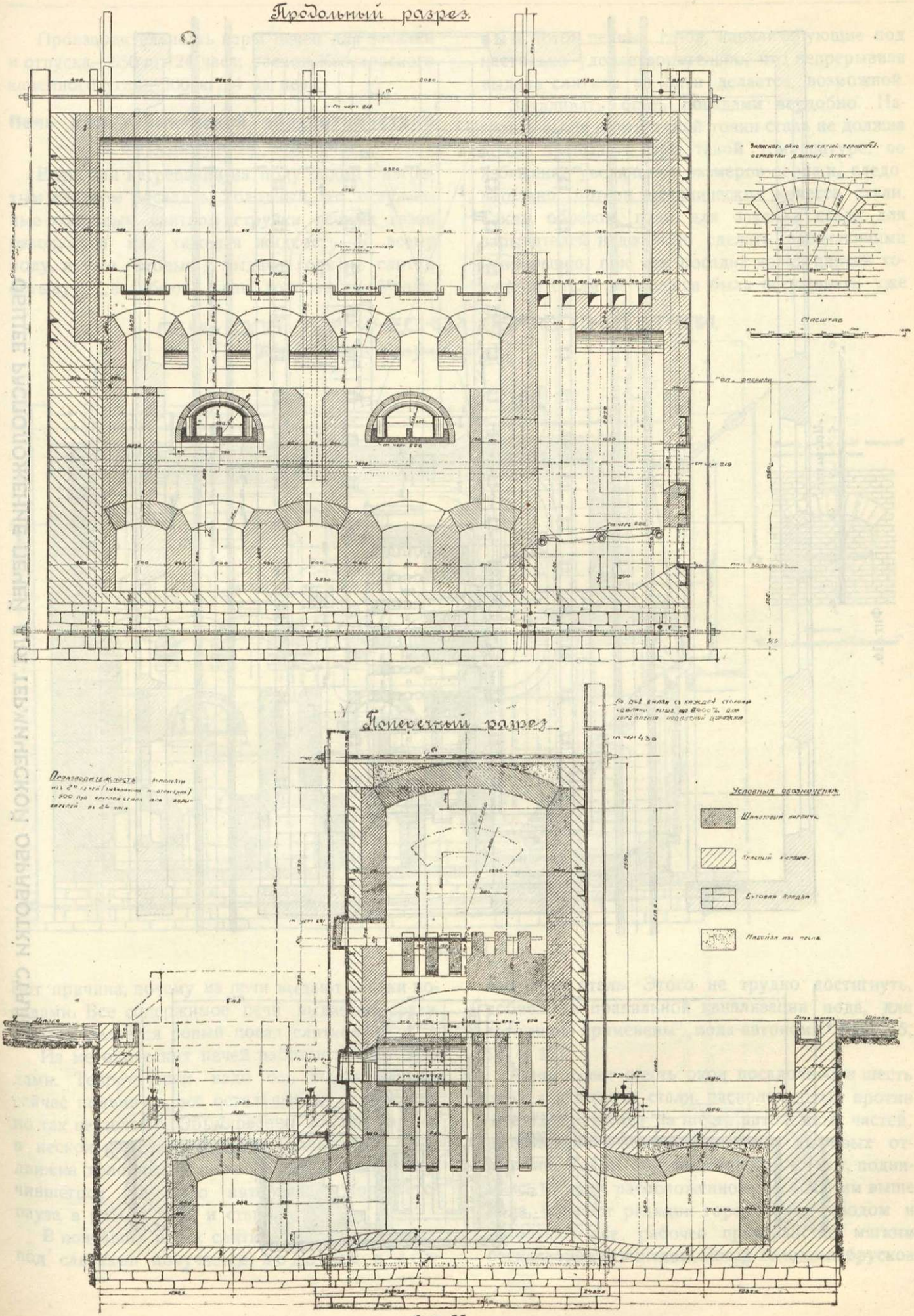
Фиг. 13.

ПЕЧЬ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ



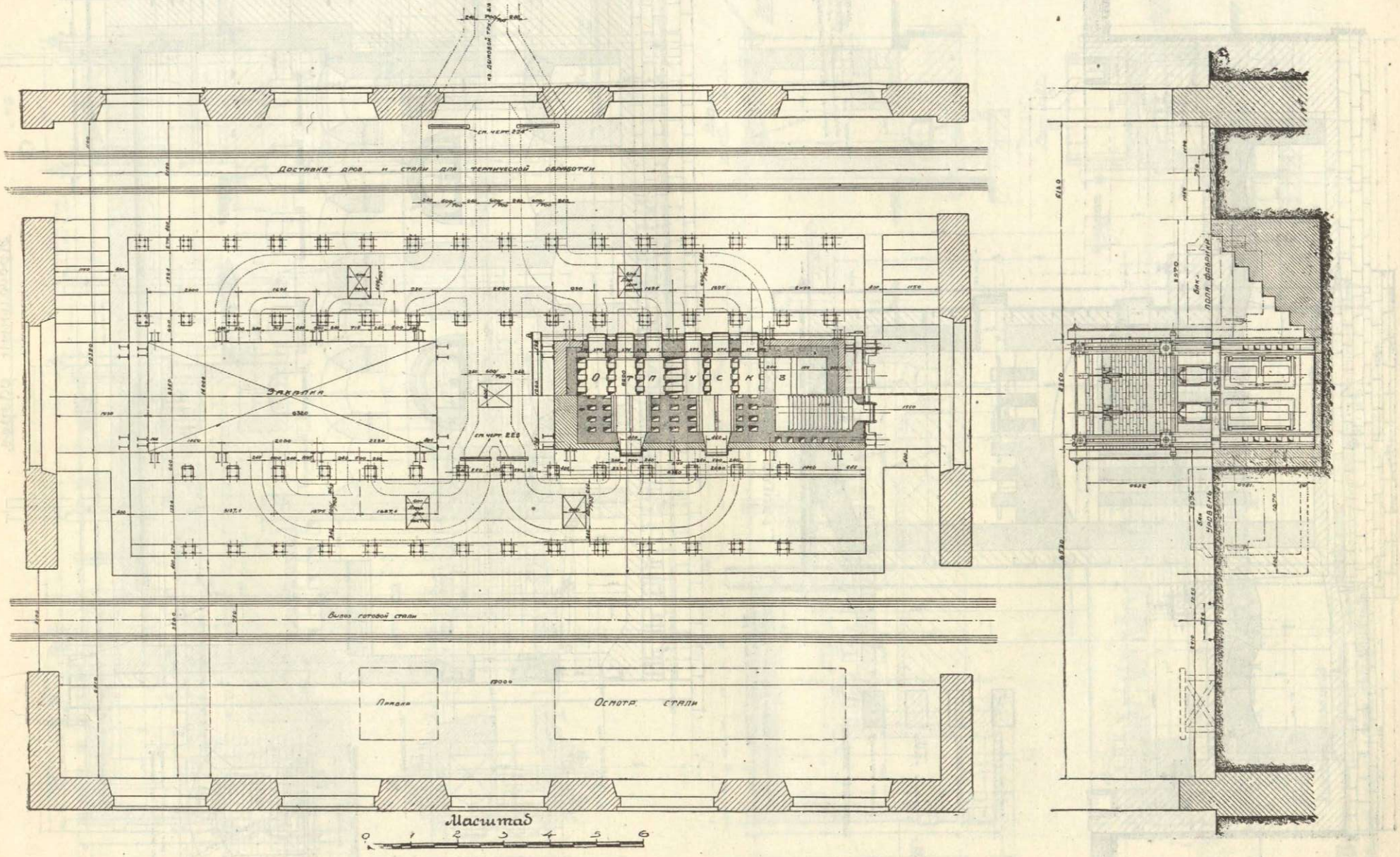
Фиг. 14.

ПЕЧЬ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ



Фиг. 15.

ОБЩЕЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ ПЕЧЕЙ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ.

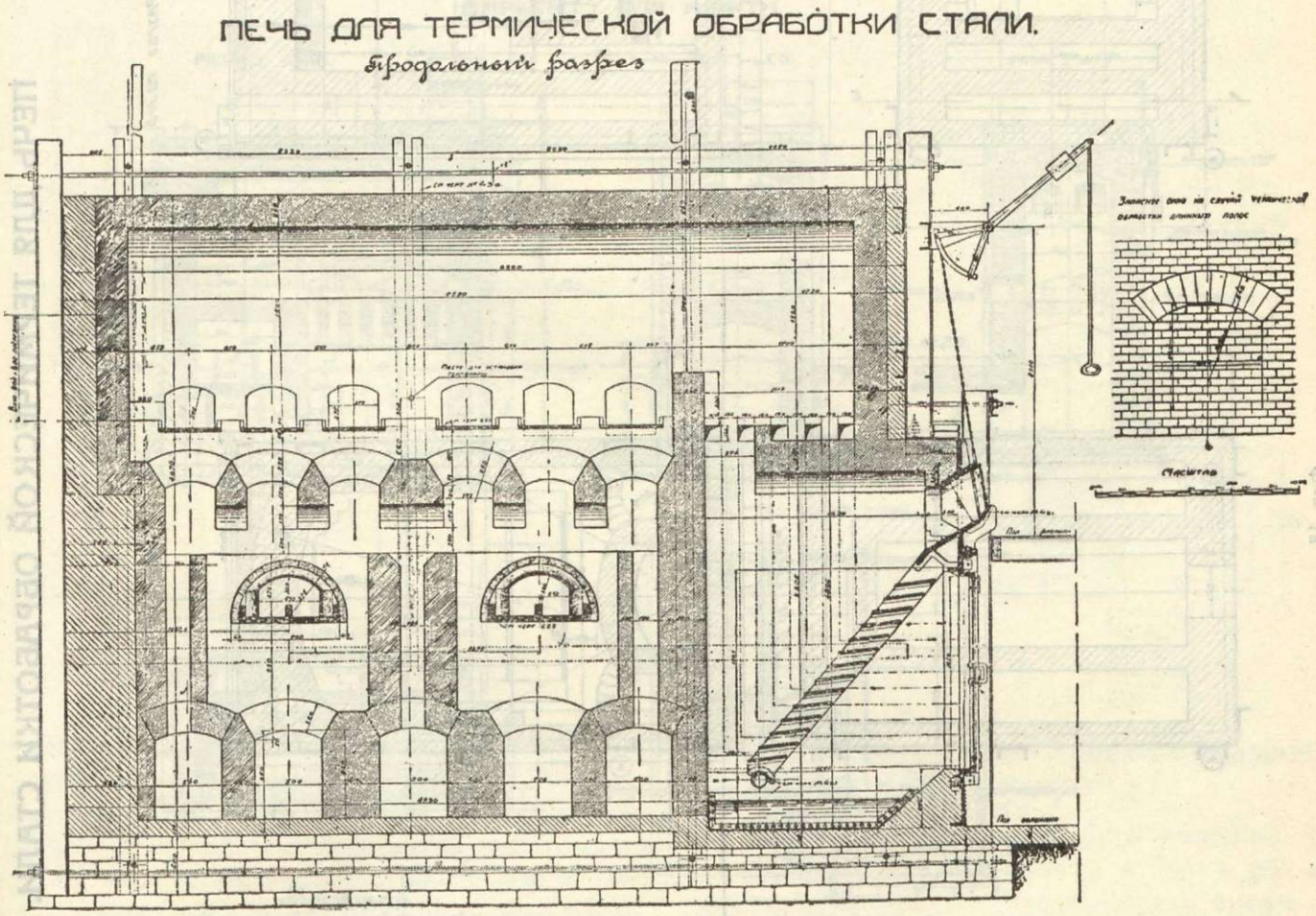


Фиг. 16.

Производительность пары печей для закалки и отпуска—650 шт/24 часа; расход Кизеловского каменного угля—300 кг/24 на печь.

Печь для термической обработки стали с автономными подами.

Если при нагревании на поду рядом с нагретым слитком посадить холодный, то остуженные холодным слитком струйки печных газов разольются как тяжелая жидкость по всему поду, и уже готовые к выдаче горячие слитки остынут, „задубеют", как говорят на Урале.



Фиг. 17.

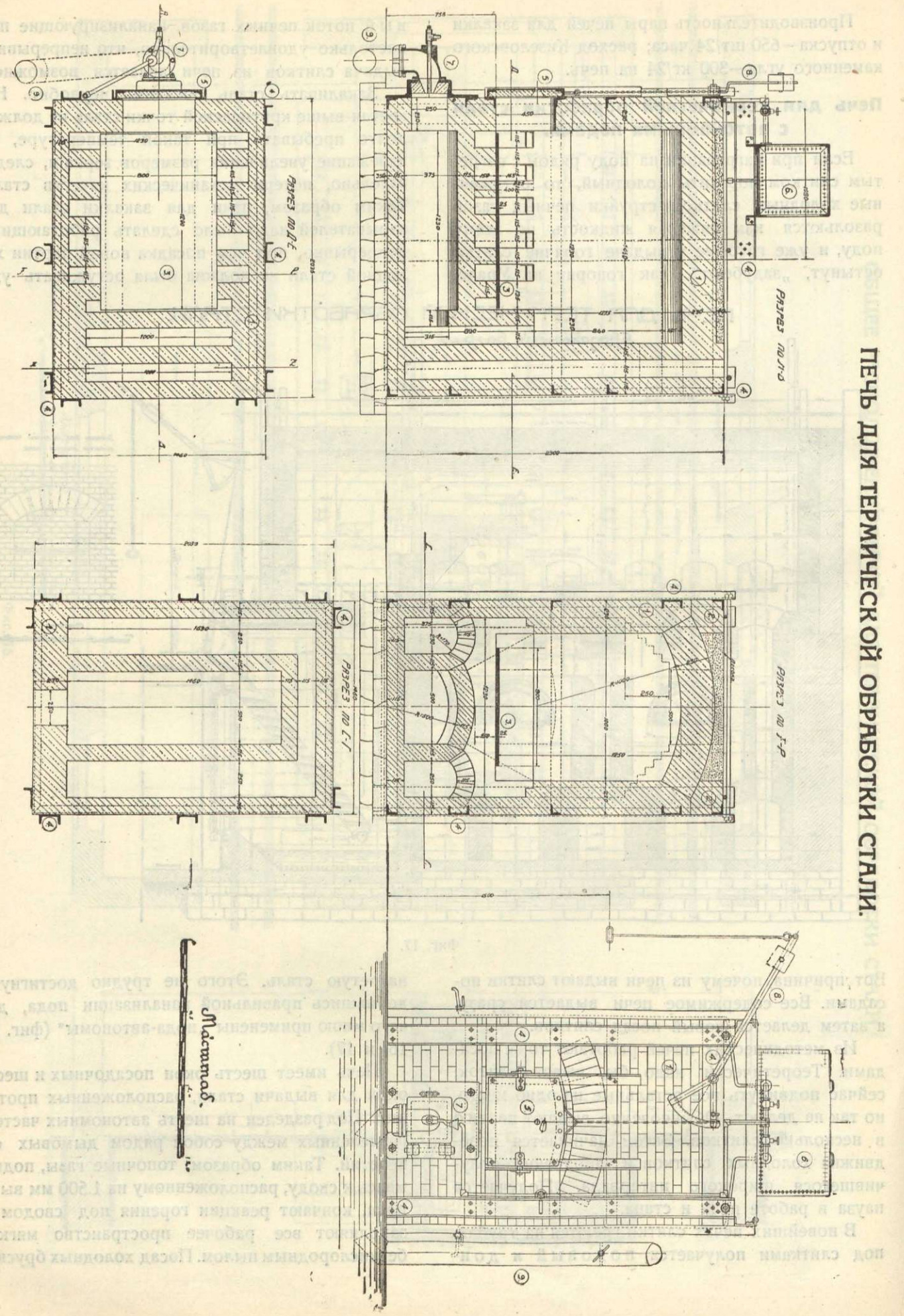
Вот причина, почему из печи выдают слитки посадами. Все содержимое печи выдается сразу, а затем делается новый посад слитков.

Из методических печей работают тоже посадами. Теоретически надо бы, выдав слиток, сейчас подвинуть все остальные на одно место, но так не делают. Обыкновенно выдают партию в несколько слитков. Затем начинается передвижка холодных слитков и заполнение получившегося широкого интервала. Получается пауза в работе печи и стана.

В новейших печах слитки греются на трубах; под слитками получается подовый и донный поток печных газов, канализирующие под настолько удовлетворительно, что непрерывная выдача слитков из печи делается возможной.

Закаливать сталь посадами неудобно. Нагретая выше критической точки сталь не должна долго пребывать при такой температуре, во избежание увеличения размеров зерна и, следовательно, потери механических качеств стали. Таким образом, печи для закалки стали для взрывателей надо было сделать работающими непрерывно, при чем посадка новой партии холодной стали не должна была остуживать уже нагретую сталь. Этого не трудно достигнуть, добившись правильной канализации пода, для чего мною применены „пода-автономы" (фиг. 15, 16, и 17).

Печь имеет шесть окон посадочных и шесть окон для выдачи стали, расположенных против них. Под разделен на шесть автономных частей, разделенных между собой рядом дымовых отверстий. Таким образом, топочные газы, поднимаясь к своду, расположенному на 1.500 мм выше пода, кончают реакции горения под сводом и заполняют все рабочее пространство мягким бескислородным пылом. Посад холодных брусков



Фиг. 18.

ПЕЧЬ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ.

стали для взрывателей, расположенный на узком и длинном поперечном поду против садочного окна, остуживает омывающие его печные газы, которые, как тяжелая жидкость, стелются вдоль пода. Но при своем горизонтальном движении эти холодные струйки встречают по обеим сторонам пода-автонома целый ряд дырочек, через которые могут течь вниз по направлению к дымовому пролету.

Таким образом, этим тяжелым струйкам ставится преграда для горизонтального распространения, и соседние пода-автономы не могут быть ими охлаждены. Посад холодной партии стали не может оказать никакого влияния на соседние уже согревшиеся партии стали для взрывателей. Так как подов шесть, то работа идет совершенно непрерывно. Партия в 15—20 пудов стали закаливается, и вместо нее сейчас же садится столько же холодной стали. Топка опущена ниже пода на 2.000 мм, что дает такую энергию всасывания воздуха в поддувало, что при открывании садочных или выдающих окон из них выделяется во все окно поток печных газов, и засасывание наружного воздуха делается совершенно невозможным.

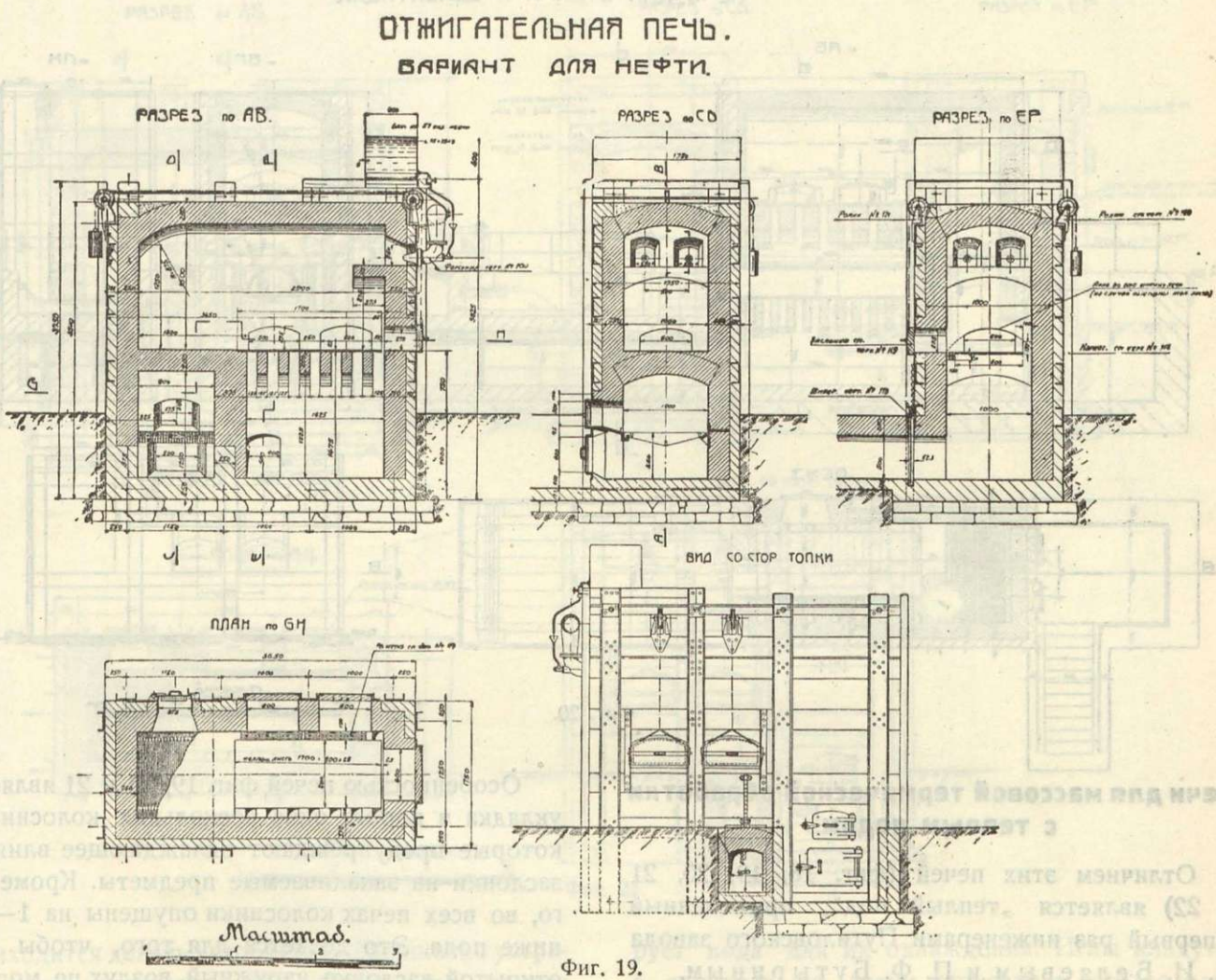
Работа этих печей была выше всякой похвалы. Для отпуска стали применялись муфеля, обогреваемые теряющимся жаром.

Число муфелей было два. Каждый обогревался печным газом трех автономных подов.

Муфеля делались из кирпича при диаметре внутри 750 мм, со стенками толщиной в ¼ кирпича. При желании эти муфеля можно было делать и большего диаметра. Муфель в ¼ кирпича, в 1.000 мм диаметром работал в Ленинградском Арсенале без ремонта около трех лет, пока печь не пришлось перенести в новое помещение.

Такая прочность конструкции муфеля придается ему поперечными стенками в ½ кирпича, уничтожающими распор арки муфеля (фиг. 15).

Так как температура муфеля должна быть строго определенная, то ее можно регулировать, направляя струю печных газов или целиком вокруг муфеля, или часть их направляя прямо в дымовые пролеты, минуя муфель.



Фиг. 19.

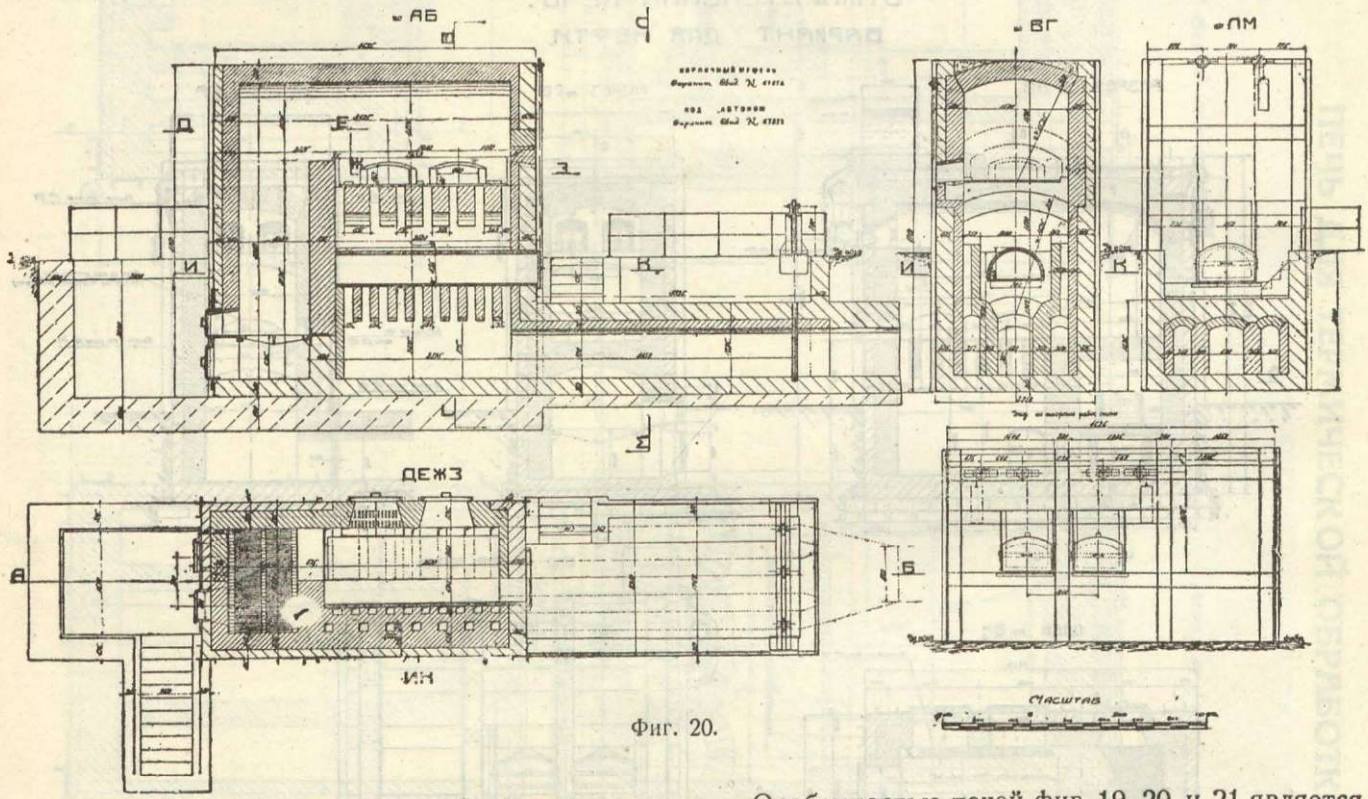
Температура в муфеле устанавливается регулировкой заслонками количества дымовых газов, которые будут омывать муфель или прямо пойдут в дымовую трубу. Для того чтобы такое деление совершилось совершенно точно, отверстия приемных каналов муфеля устанавливаются несколько выше свода муфеля.

Печи этого типа устроены в трех заводах взрывателей, возникших во время войны, и везде были одобрены. Горючее—самое разнообразное.

Котельный лист работает без смены около ½—1 года. Он облегчает посадку, передвигание, выдачу и нагрев термически обрабатываемых предметов.

Чертежи (фиг. 18 и 19) представляют печи на нефти; форсунки на дутье от вентилятора поставлены под подом и под сводом. Обе эти конструкции работают хорошо, но вторая проще и допускает применение всех родов горючего одновременно, как показано на фиг. 19.

ПЕЧЬ ДЛЯ ОТЖИГА И ЦЕМЕНТАЦИИ



Фиг. 20.

Печи для массовой термической обработки с теплым подом.

Отличием этих печей (фиг. 18, 19, 20, 21 и 22) является „теплый под", примененный в первый раз инженерами Путиловского завода Н. И. Беляевым и П. Ф. Бутыриным.

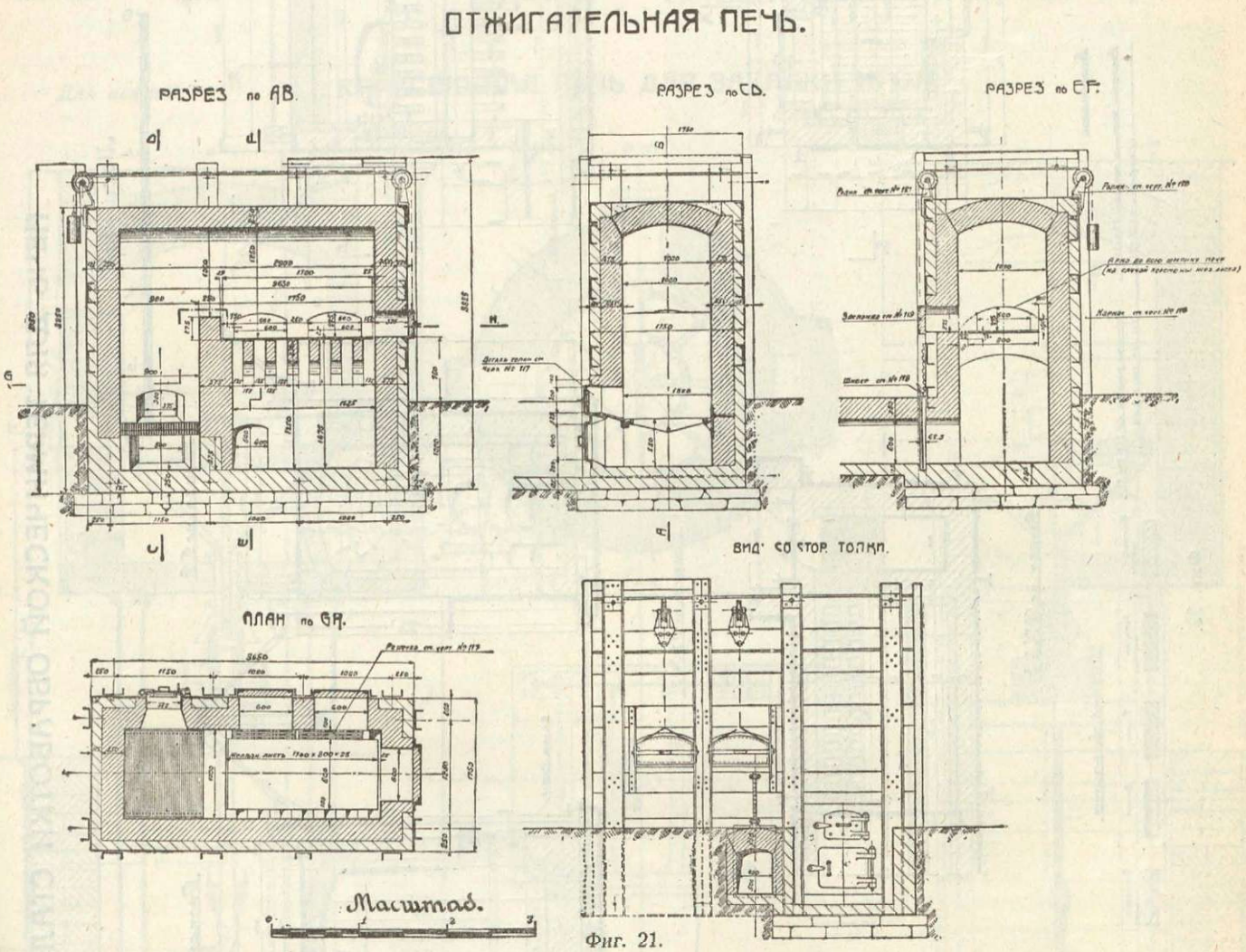
При термической обработки мелких поковок, отливок, снарядных донышек и тому подобных предметов, их приходится загружать сразу многими десятками в печь, а затем штука за штукой закаливать или студить в песчаной бане. С другой стороны, передвигать эту мелочь по кирпичному поду очень неудобно. Для удобства загрузки и выгрузки на под этих печей был положен котельный лист 20 — 25 мм толщины, обогреваемый снизу каналами отработавших печных газов. Таким образом, получился так называемый теплый под, снискавший к себе большие симпатии в заводах.

Особенностью печей фиг. 19, 20 и 21 является укладка в пороге окна нескольких колосников, которые предупреждают охлаждающее влияние заслонки на закаливаемые предметы. Кроме того, во всех печах колосники опущены на 1—2 м ниже пода. Это делается для того, чтобы при открытой заслонке наружный воздух не мог бы войти в печь и, стелясь по поду, не мог бы остудить нагревающихся на нем предметов. Поддерживая на поду давление выше атмосферного, мы препятствуем входу в печь наружного воздуха.

Чертеж фиг. 22 представляет некоторое улучшение в конструкции теплого пода. Для того чтобы мелочь не заваливалась в дымовые пролеты, котельный лист окружается уголком, приклепанным к листу на расстоянии одного дюйма. Через зазор между листом и углом могут проходить стелющиеся по железному листу остывшие струйки.

Карусельные печи для термической обработки однородных изделий.

В последнее время, в связи с распространением термической обработки, различные мелкие металлообрабатывающие заводы обращаются с запросами о печах для термической обработки своего продукта. Очевидно, что таким заводам



Фиг. 21.

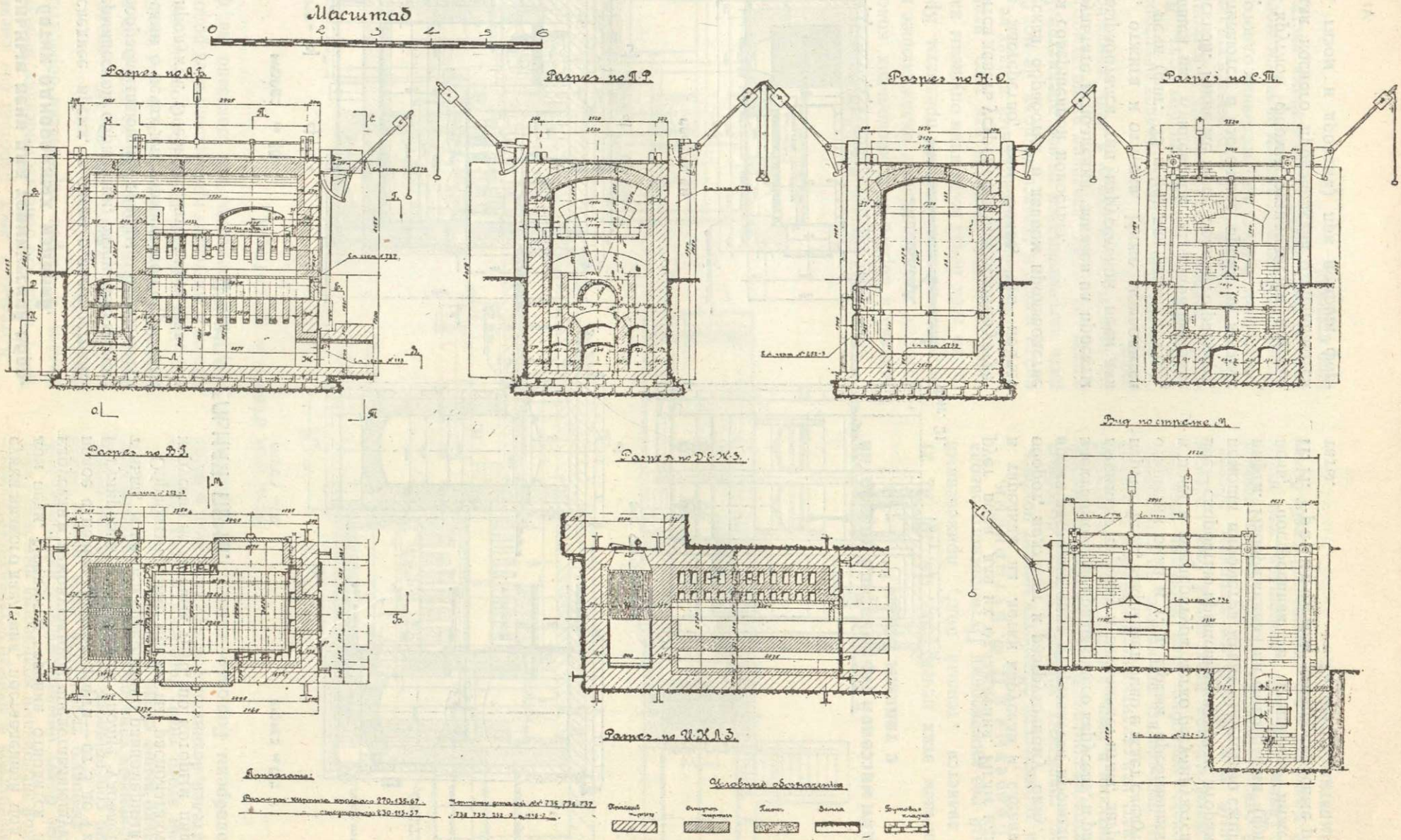
приходится давать устройства, совершенно устраняющие мастерство, тем более, что подчас термическая обработка в данном производстве является совершенной новостью.

В результате исполнения заказов на проекты печей выработался тип карусельной печи для закалки, отжига и отпуска. Ниже приводится чертеж печи (фиг. 23 и 24) для закалки игол, работающей на Кунцевской игольной фабрике под Москвой. Такие же печи, большего размера, устанавливаются в настоящее время на косных заводах.

Печь круглой формы отапливается нефтью (печи для косного производства отапливаются нефтью, газом и дровами) при помощи форсунки низкого давления, поставленной под куполом печи. Продукты горения отводятся из-под карусели в дымовую трубу, представляющую одно целое с печью. Расход нефти — от 3 до 4 кг/час. Регулировка температуры вполне удовлетворительна, и нагрев совершенно равномерный.

Обрабатываемые предметы располагаются на карусели из газовых труб, по которым циркулирует вода для их охлаждения. Иглы кладутся в тарелках на лотки карусели и, сделав один оборот, подходят к разгрузочному окну. В это время заслонка окна открывается проводом от электромотора, вращающего карусель, и рабочий вынимает тарелку и закаливает иглы, загружает партию игол, закрывает окно и ждет следующего открытия окна и т. д. Время пребывания игол в печи и температура легко регулируются, первое — скоростью вращения карусели, вторая — при помощи пирометра, меняя количество сжигаемой нефти. Изображенная на фотографии (фиг. 24), печь, построенная и пущенная инженером П. И. Травиновым, дала прекрасные результаты.

ПЕЧЬ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ.



Фиг. 22.

Печь для закалки орудий.

Печь (фиг. 25) представляет мешок горячих газов, в своду которого сделано круглое отверстие, прикрываемое крышкой, в которое опускается висящее на кране орудие.

Пламя из топки поднимается вдоль стенок кверху и заполняет всю печь неподвижным пылом.

Холодное орудие возбуждает около себя ток остывших газов; эти тяжелые струйки холодных печных газов падают вниз, собираются в кирпичную чашу и из нее отводятся боровом в сторону, в дымовую трубу.

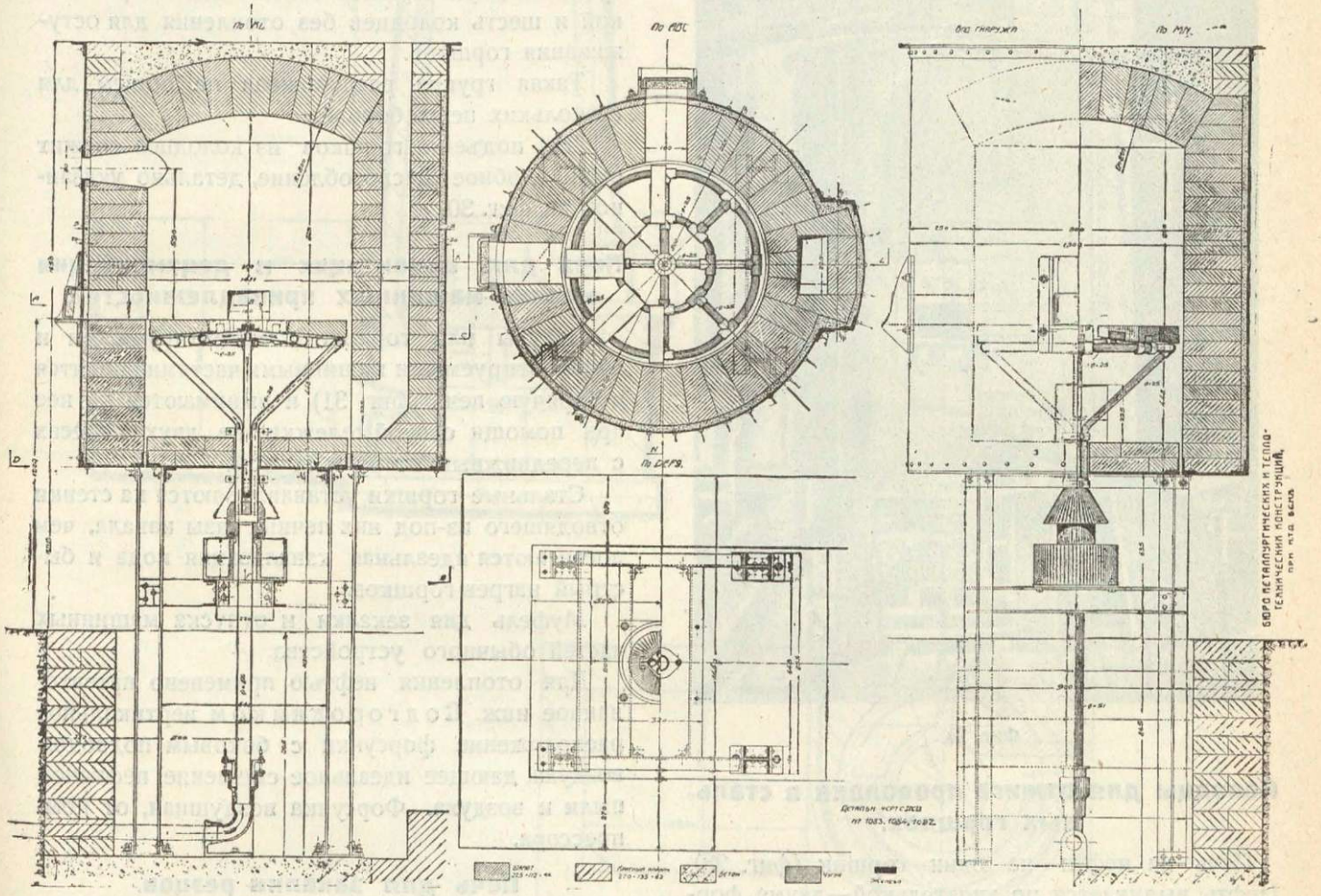
Печи с обращенной тягой для закалки орудий предлагались мною русским пущечным заводам, и, кажется, одним из них были испробованы с хорошим результатом, но дальнейших сведений о них мне дано не было.

Муфельная печь для закалки мелких предметов с двумя муфелями.

Эта печь была построена на заводе Айваз в Ленинграде. Здесь я в первый раз сделал муфель в $^1/_4$ кирпича. Пламя форсунки пущено по винтовой линии вниз. В верхнем муфеле легко была достигнута температура в 1.200°. Трудность была только в подыскании соответствующего шамотного кирпича. Боровичский кирпич размягчался и терял строительную прочность. Пришлось сделать печь из динаса. Метод кладки муфеля, обычно мною применяемый, и описан на стр. 23.

Для нефти

КАРУСЕЛЬНАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ ЗАКАЛКИ ИГОЛ.

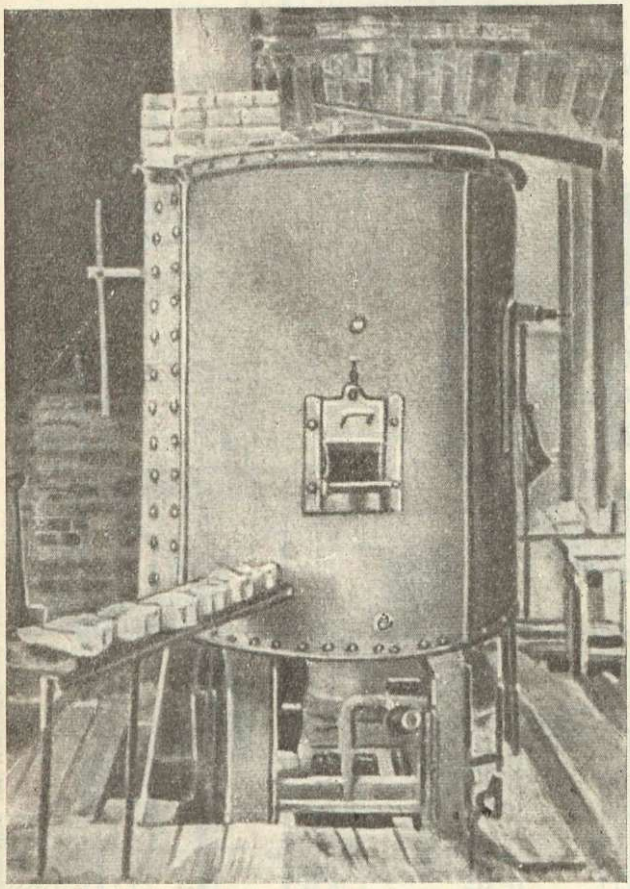


Фиг. 23.

Муфель для отжига труб во время протяжки.

Муфель должен был иметь 4.000 мм длины и работать на каменном угле. Он построен (фиг. 27) по типу муфеля Ленинградского Арсе-

нала, работавшего без ремонта несколько лет. Четыре топки расположены снизу. Если бы пришлось муфель удлинить на 5—6 метров, нужно было бы прибавить еще 1—2 топки. Но, во всяком случае, длина муфеля не играет никакой роли ни в равномерности его нагрева ни в его прочности. Под муфеля сделан из железного листа или из чугунных досок для быстроты передачи тепла снизу.



Фиг. 24.

Колодцы для отжига проволоки в стальных горшках.

Печь на нефти—на один горшок (фиг. 28). Нефть выдувается по касательной—двумя форсунками. Отработавшие газы уводятся в дымовую трубу из-под горшка. Горшок садится в раскаленную от предыдущей операции печь. Когда содержимое его прогреется до температуры в 900°, горячий горшок вынимается и садится в один из двух рядом расположенных колодцев без отопления.

При укладке бунтов проволоки в горшке необходимо оставлять зазор около стенок для свободной циркуляции находящегося в горшке воздуха, у стенок вверх, по оси положенных друг на друга бунтов вниз. Нижний бунт не должен плотно ложиться на дно горшка. Таким образом, должна получиться аккуратная колонка сложенных друг на друга бунтов, со всех сторон омываемая равномерно циркулирующим азотом воздуха. Этого можно достигнуть, укладывая бунты на чугунный звездчатый станок, вставляемый вместе со сложенными на него бунтами проволоки в горшок.

По условиям времени этот проект не был осуществлен.

Фиг. 29 представляет ту же, но сдвоенную, печь для отжига проволоки на каменном угле. Одной топке соответствуют два гнезда для нагревания двух горшков с отжигаемой проволокой и шесть колодцев без отопления для остуживания горшков.

Такая группа расположена на общем для нескольких печей борове.

Для подъема горшков из колодцев служит очень удобное приспособление, детально указанное на фиг. 30.

Печь для цементации и децементации мелких машинных принадлежностей.

Сосуды или горшки с цементируемыми и децементируемыми машинными частями вводятся в горячую печь (фиг. 31) и вынимаются из нее при помощи особой тележки на двух колесах с передвижным от руки грузом.

Стальные горшки устанавливаются на стенки отводящего из-под них печные газы канала, чем достигаются идеальная канализация пода и быстрый нагрев горшков.

Муфель для закалки и отпуска машинных частей обычного устройства.

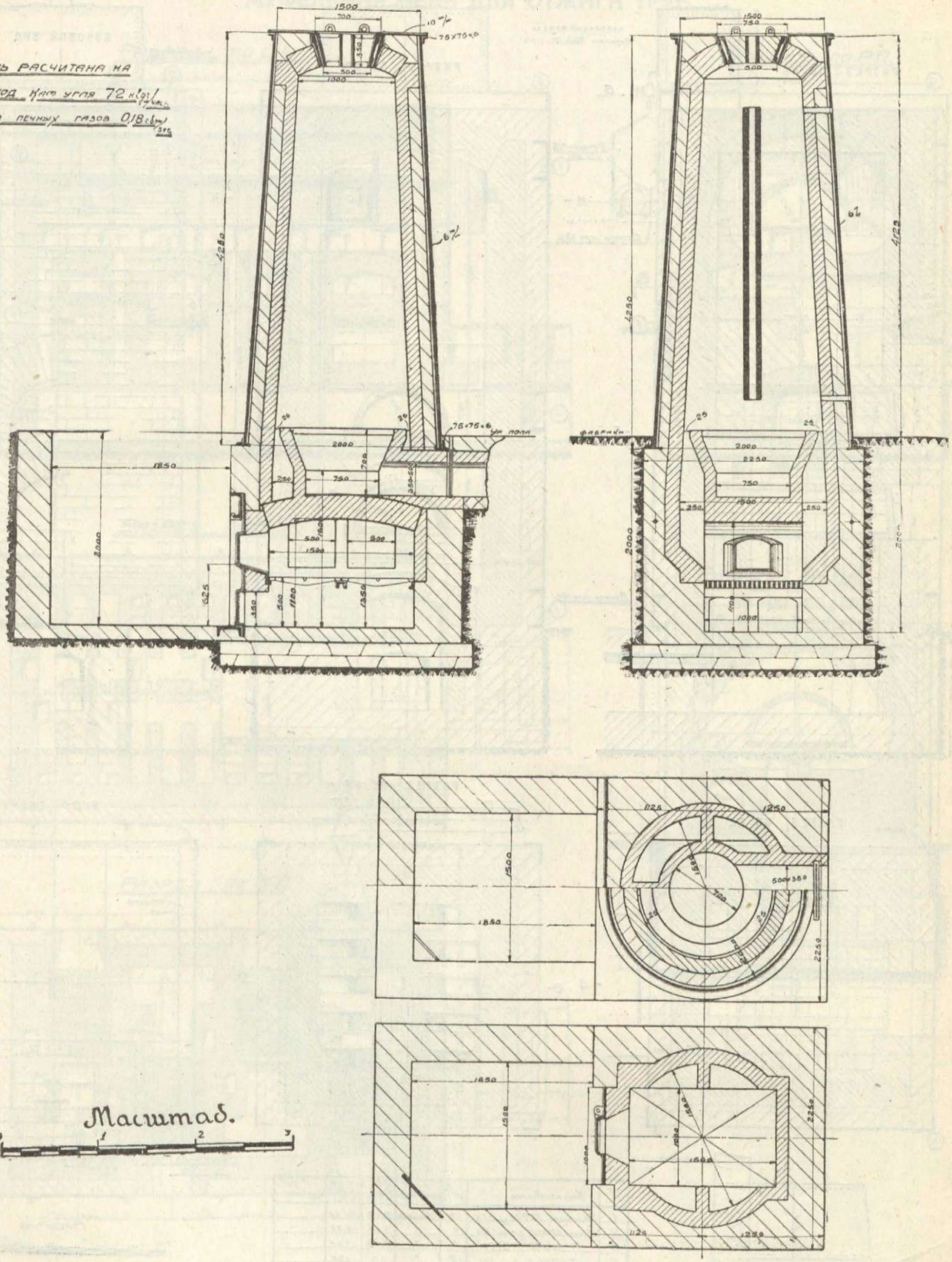
Для отопления нефтью применено патентованное инж. Подгородником вертикальное расположение форсунки с боковым подводом воздуха, дающее идеальное смешение нефтяной пыли и воздуха. Форсунка воздушная, от компрессора.

Печь для закалки резцов.

Мой ученик И. С. Подгородник предложил чрезвычайно интересную, с гидравлической точки зрения, печь (фиг. 32) для нагревания только кончика резца, что вполне заменяет кузнечный горн. Этот тип печи я применил для оттягивания ручек сабельных клинков в Златоустовском заводе с тем же успехом, с каким печь Подгородника работала в Адмиралтейском Охтенском заводе на резцах.

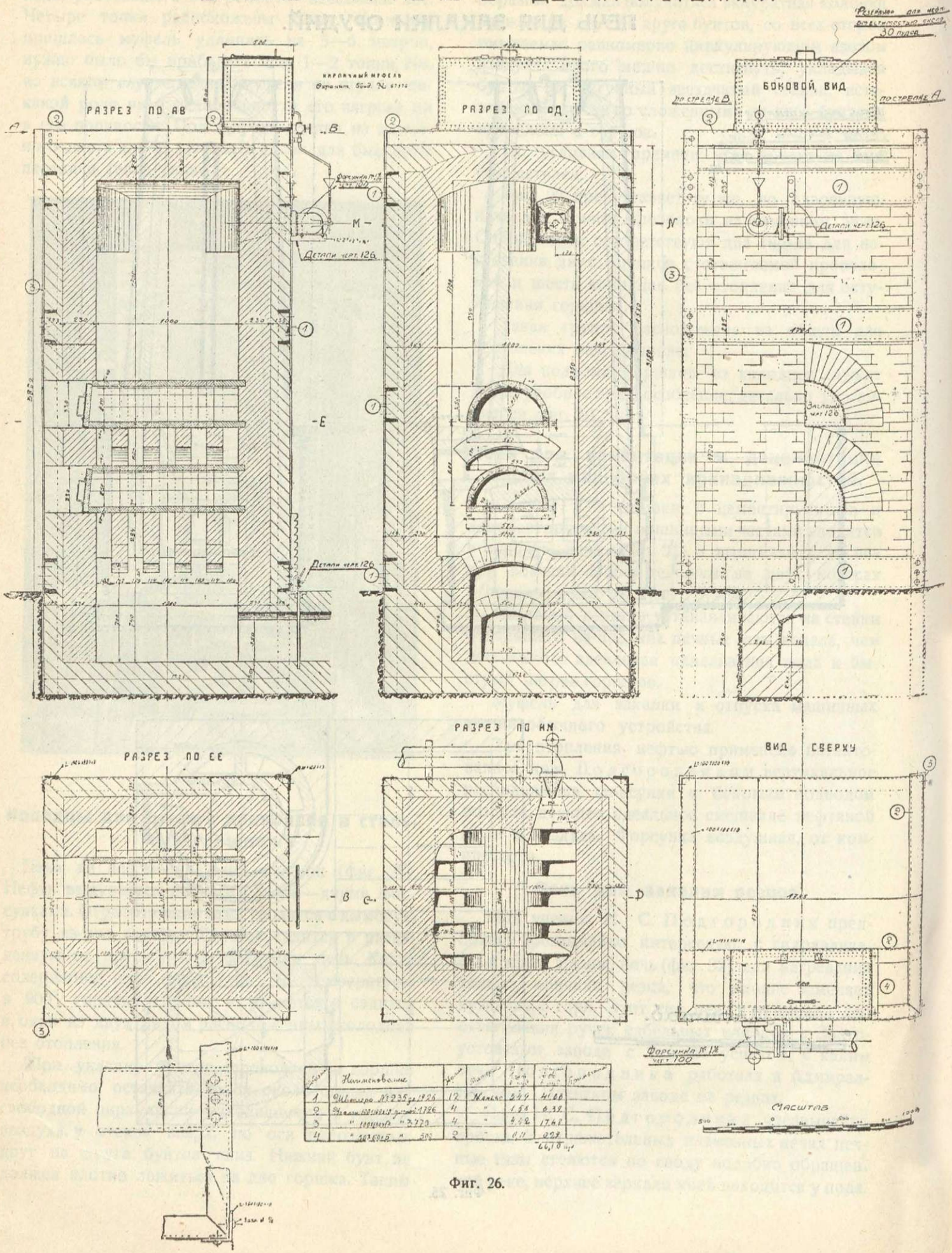
Идея И. С. Подгородника чрезвычайно проста. В отражательных пламенных печах печные газы стелются по своду подобно обращенной реке, верхнее зеркало коей находится у пода.

ПЕЧЬ ДЛЯ ЗАКАЛКИ ОРУДИЙ.



Фиг. 25.

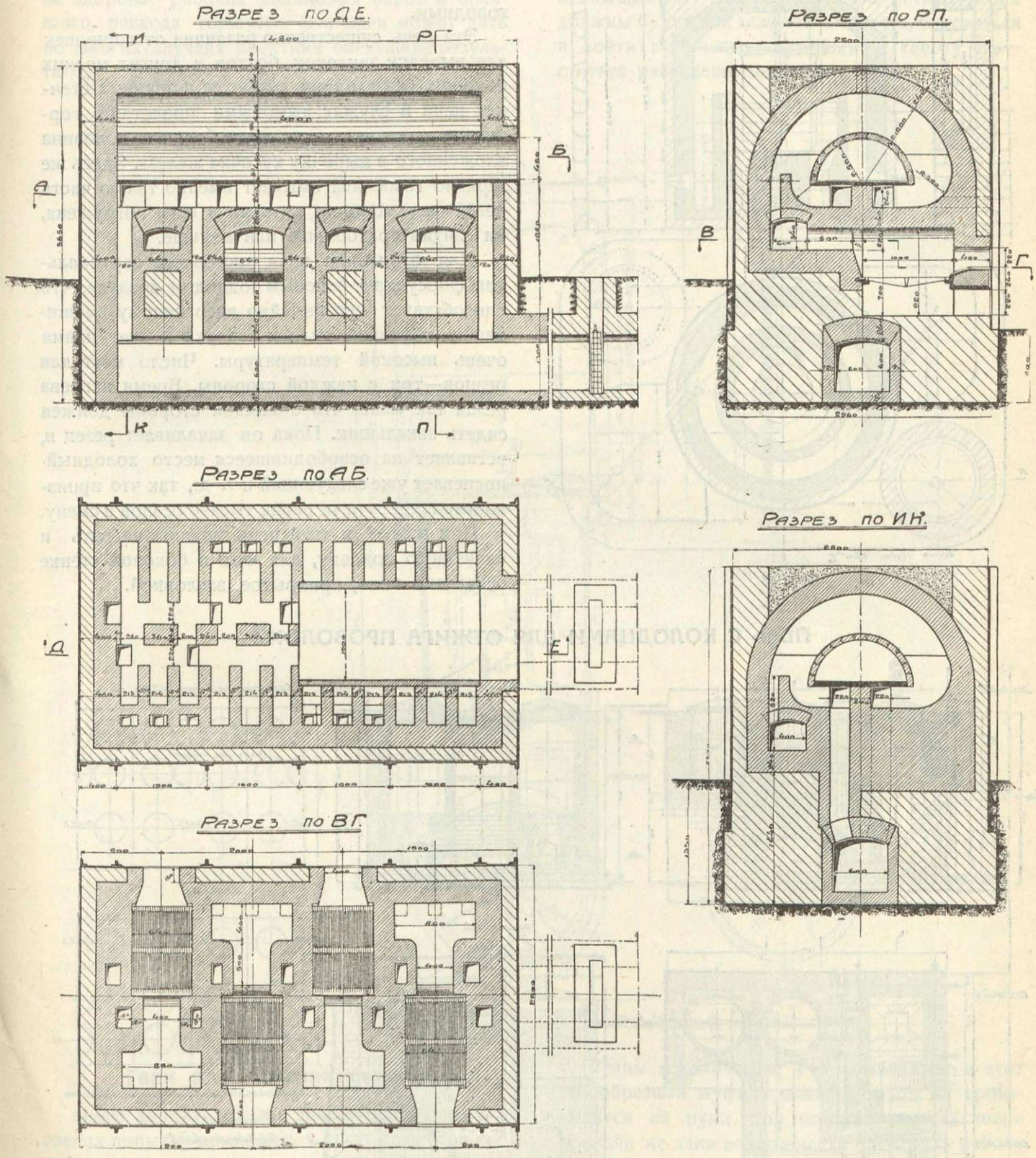
ЗАКАЛОЧНАЯ ПЕЧЬ С ДВУМЯ МУФЕЛЯМИ



Обозн.	Наименование	Номер	Материал	[illegible]	[illegible]	Примечание
1	Швеллера № 235 до 1926	12	Железо	3.49	41.88	
2	Уголки 100×100×10 [illegible] 1726	4	"	1.58	6.32	
3	" 100×100×10 " 3770	4	"	4.42	17.68	
4	" 50×50×5 " 500	2	"	0.11	0.22	
					66,10 пуд	

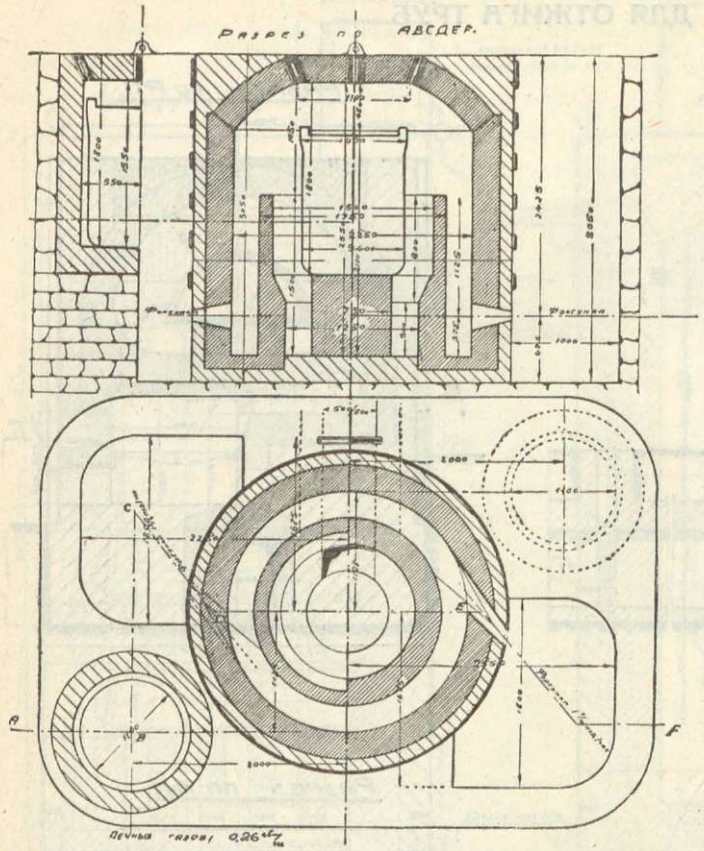
Фиг. 26.

МУФЕЛЬНАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ ОТЖИГА ТРУБ.



Фиг. 27.

ПЕЧЬ ДЛЯ ОТЖИГА ПРОВОЛОКИ В ГОРШКЕ



Фиг. 28.

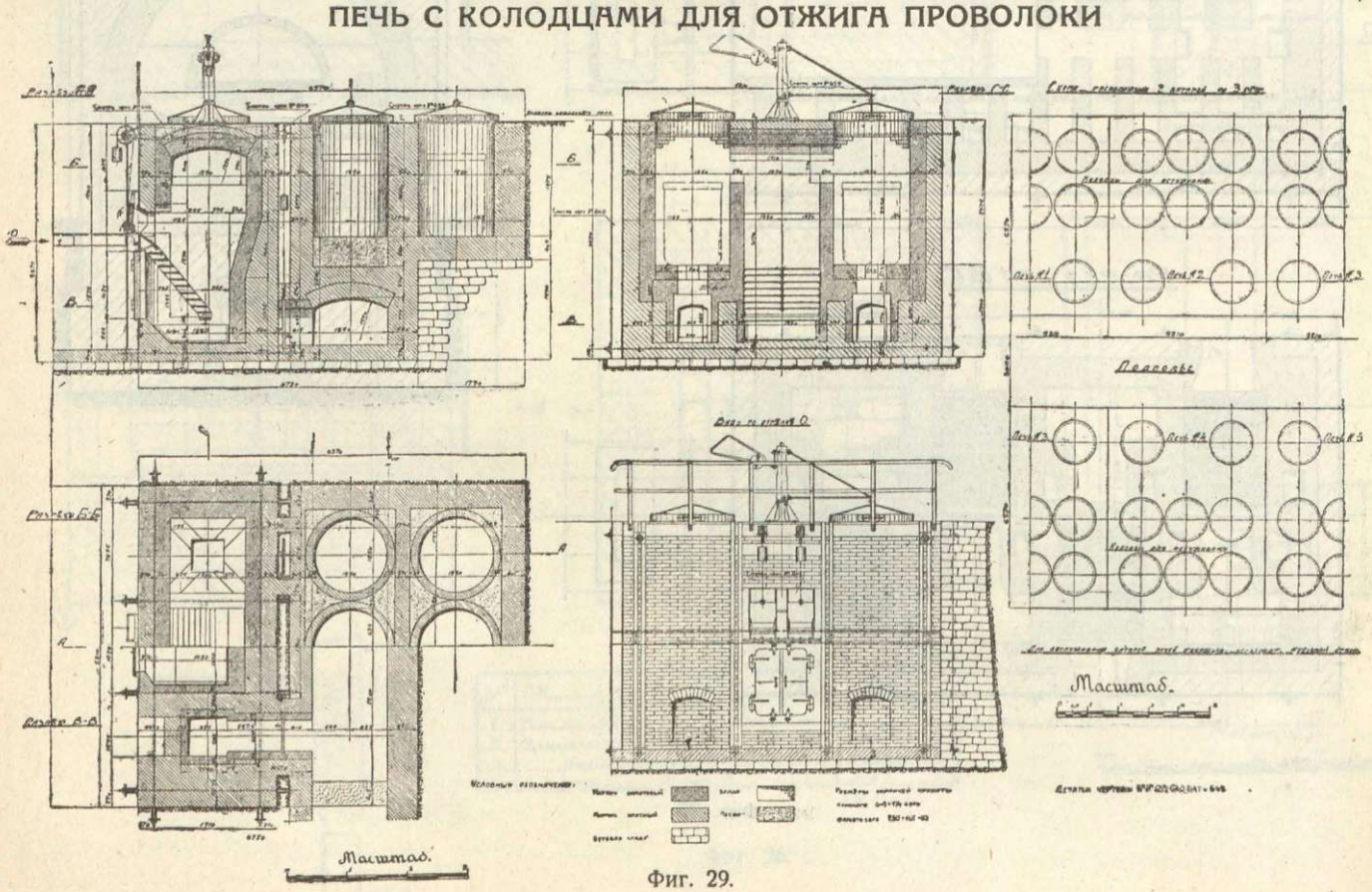
Следовательно, если в поду сделать отверстие и через это отверстие просунуть кончик резца или сабельного клинка, то нагревается только этот кончик, весь же резец или клинок останется холодным.

Эта печь существенно различна от горнушек для выделки заклепок, болтов и других мелких поковок. Там дырочки делаются в боковых стенках печи и служат дымовыми пролетами горнушки, поэтому прогревается большая половина вложенного в дырочку кусочка железа. Здесь же зеркало газослива омывает именно такую часть резца или клинка, которая в него погружена, ни сантиметра больше или меньше.

Для отопления печи поставлена вертикальная форсунка с боковым подводом воздуха, что способствует чрезвычайно энергичному смешиванию нефтяной пыли и воздуха и дает пламя очень высокой температуры. Число мест для резцов—три с каждой стороны. Время нагрева резца так мало, что с каждой стороны должен сидеть закальщик. Пока он закаливает резец и, вставляет на освободившееся место холодный поспевает уже следующий и т. д., так что производительность печи равна тысяче резцов в смену.

При нужде в этой печи можно нагреть и случайную поковку, для чего в боковой стенке оставлено окно, прикрытое заслонкой.

ПЕЧЬ С КОЛОДЦАМИ ДЛЯ ОТЖИГА ПРОВОЛОКИ

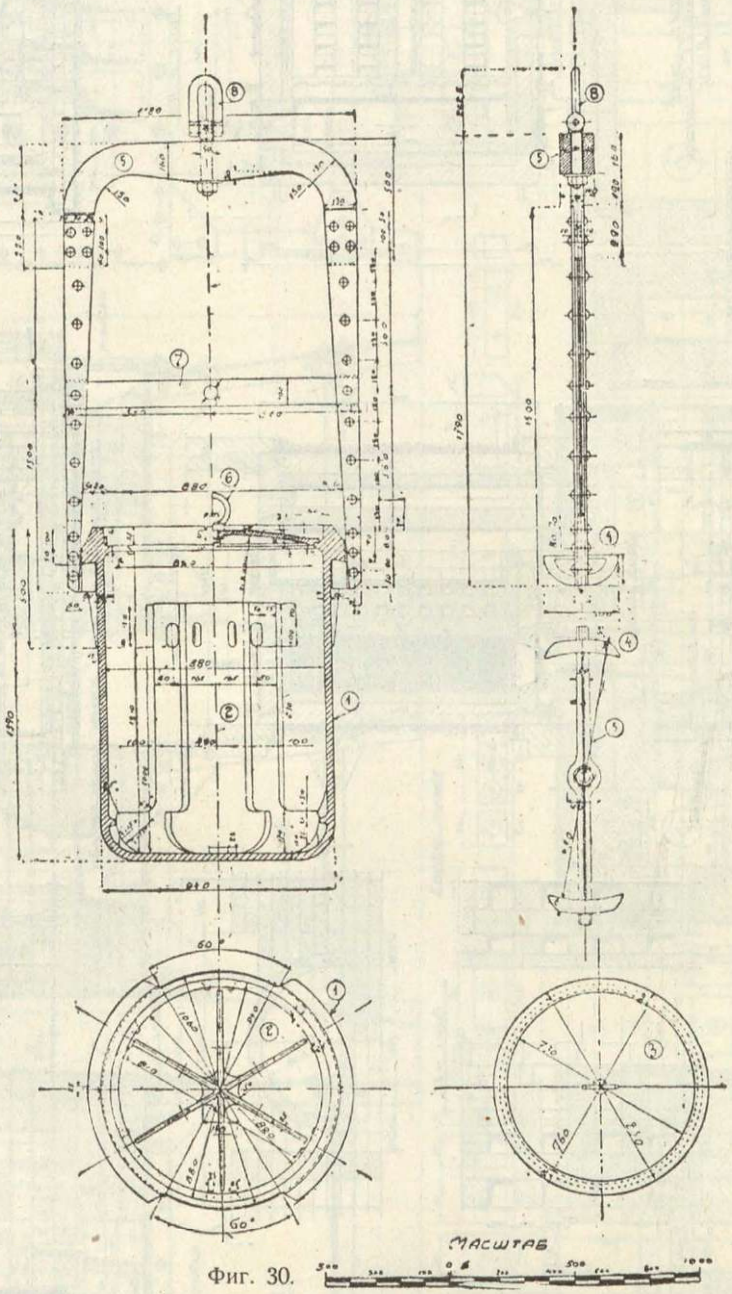


Фиг. 29.

Идея вводить нагревательные предметы в отражательную печь снизу есть идея обращенной свинцовой ванны без неудобств этой последней, т.-е. вредного влияния на здоровье рабочих свинцовых паров и большого расхода горючего. Эта идея может дать во многих случаях практики блестящие результаты.

кирпичом, оставляется свободное пространство, которое должно заполняться раскаленными газами горна.

Эта пространство должно питаться все время меняющимися газами. Раз газы остынут, они должны будут, как тяжелая жидкость, опуститься и войти в полость горнушки и сверху заместиться раскаленными газами.



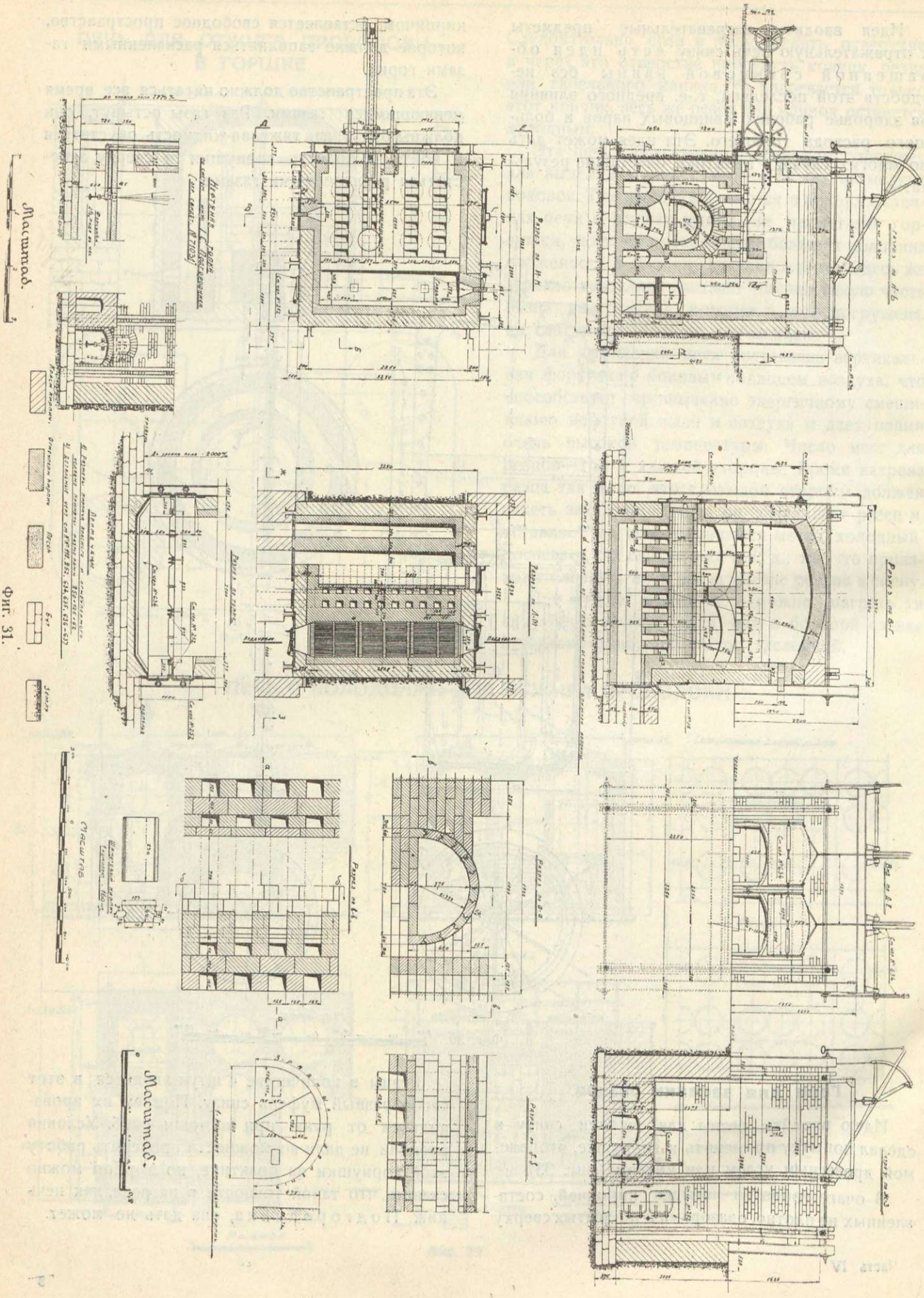
Фиг. 30.

Горн для закалки резцов.

Идею вводить резцы для закалки снизу я сделал попытку применить к горнушке, отопляемой древесным углем или коксом (фиг. 33).

В очаге горна из четырех кирпичей, составленных не плотно, с зазорами и покрытых сверху

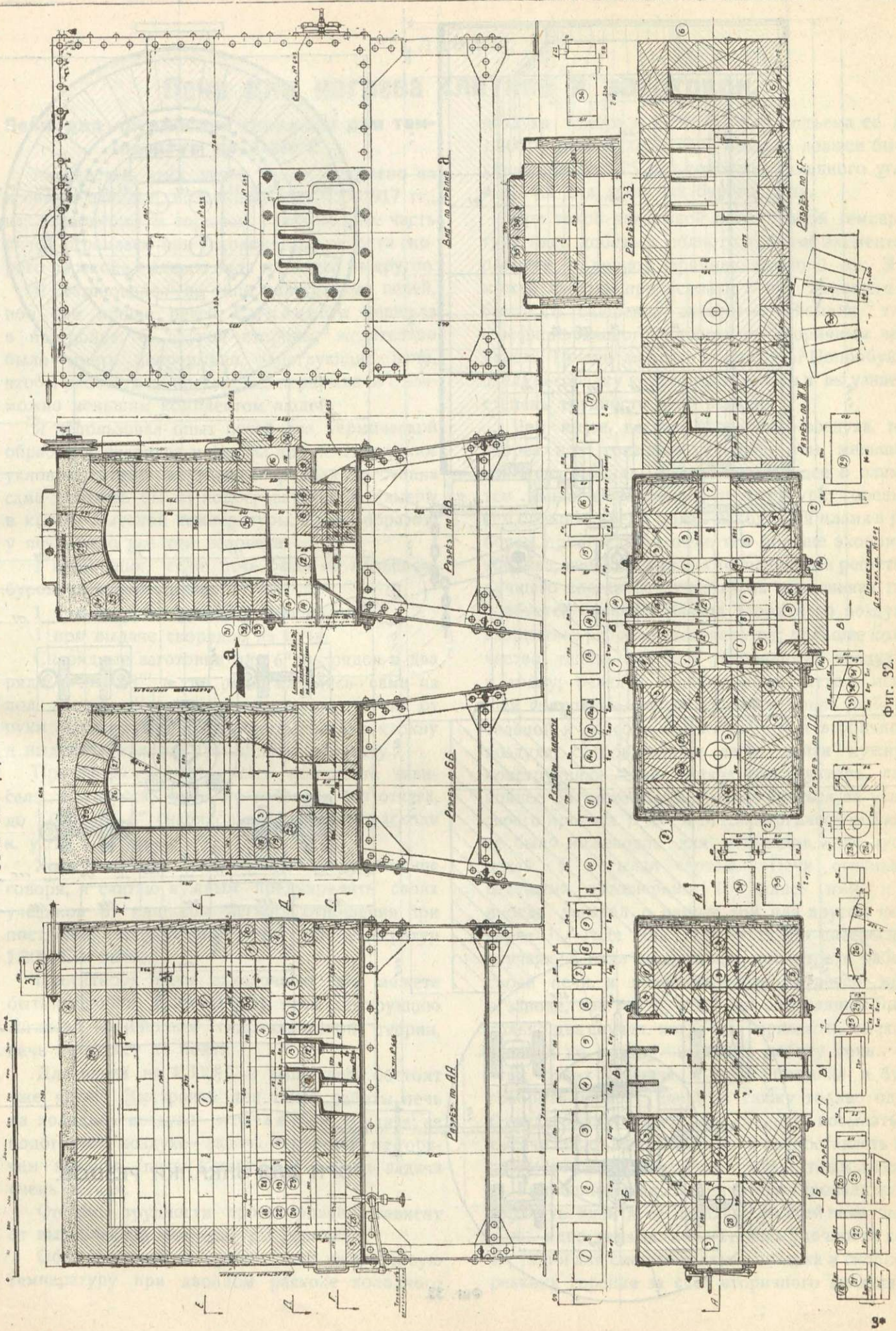
Резцы в количестве 4 штук вводятся в этот своеобразный муфель снизу. Подъем их производится от руки при помощи скоб. Условия времени не дали возможности проверить работу этой горнушки на практике, но à priori можно сказать, что такой точности в нагреве, как печь инж. Подгородника, она дать не может.



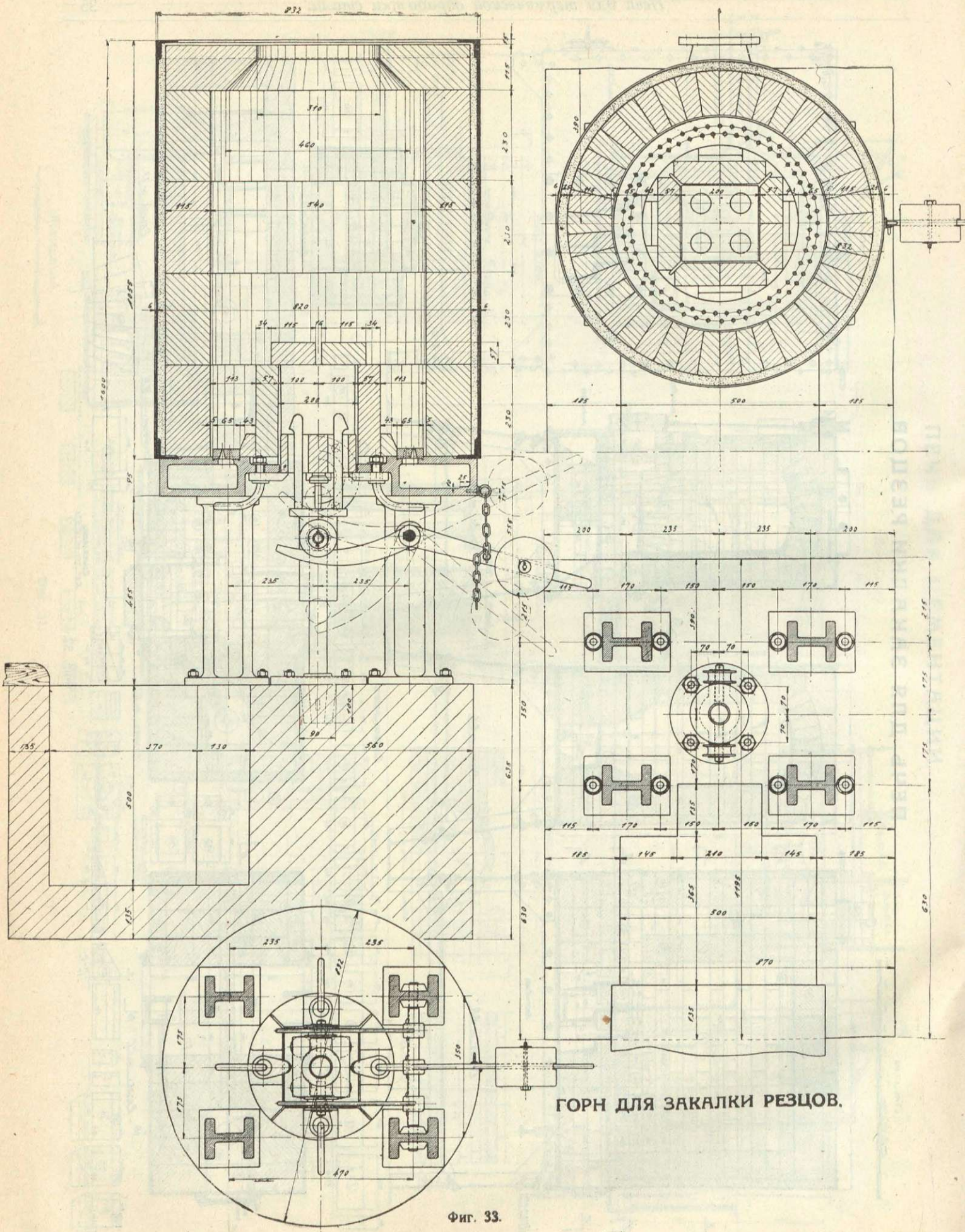
Фиг. 31.

ПЕЧЬ ДЛЯ ЦЕМЕНТАЦИИ.

ПЕЧЬ ДЛЯ ЗАКАЛКИ РЕЗЦОВ.



Фиг. 32.



Фиг. 33.

ГЛАВА III.

Печи для нагрева слитков и заготовок.

Печи для штамповки снарядов для температур до 1.300° С.

Множество этих печей было построено на военных заводах, возникших в 1915—1917 гг., на всевозможном горючем. Большая же часть печей строилась при условии возможности скорого перехода с одного вида горючего на другое.

Я остановился на типе полугазовых печей, ибо они проще печей Сименса и дешевле в постройке. С другой стороны, желательно было иметь непрерывно действующие печи, чтобы работать на прессах без перерыва и с возможно меньшим комплектом людей.

Я использовал опыт печей для термической обработки снарядов и сделал под печей с таким уклоном, чтобы круглая снарядная заготовка сама катилась бы из подогревательной камеры в камеру высокой температуры. Таким образом, у печи было все три человека:

1 шуровщик, если печь была на каменном, буром угле или дровах,

1 при нагрузке снарядов в печь,

1 при выдаче снорядов из печи.

Снарядные заготовки для 6″ снарядов в два ряда, а для 48‴ в три ряда катились сами на под камеры высокой температуры; тут их от руки ломиком или клюкой подкатывали к окну и выдавали каждые 1½ минуты к прессу.

Производительность всего комплекта зависела от пресса, печи же работали без отказа, до 1.000 шт. 6″ снарядов в 24 часа при расходе к. у. 10 т/24 часа.

Хотя успех этих печей был полный, но, вообще говоря, я считаю нужным предупредить своих учеников от слишком легкого отношения при постройке полугазовых печей для температур 1.300° С и выше.

Проектируя печи закалочные, вы можете быть спокойны. Если вы дали печи конструкцию согласно принципам гидравлической теории, печь не может не пойти.

Для печей на 1.300° С и выше дело обстоит уже иначе. Выстроить для такой работы печь на холодном воздухе—задача весьма трудная; на подогретом воздухе—задача серьезная; на горячем воздухе (печь Сименса) — опять задача очень легкая.

Степень трудности проектирования зависит от вычисленной температуры горения.

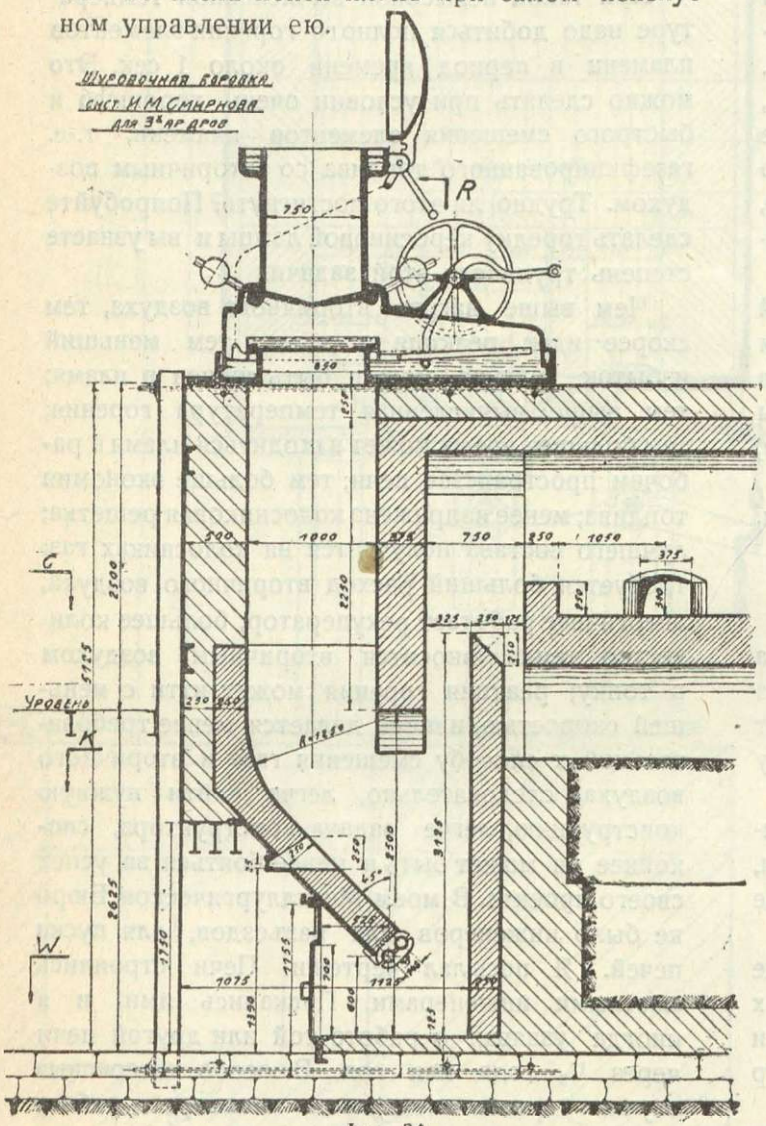
Обыкновенный к. уголь дает вычисленную температуру при двойном расходе холодного воздуха только в 1.250° С. Для подъема ее до 1.400° С расход холодного воздуха должен быть уменьшен до 1,75 для хорошего каменного угля и до 1,4 для дров или бурого угля.

При такой невысокой вычисленной температуре надо добиться полного горения элементов пламени в период времени около 1 сек. Это можно сделать при условии очень хорошего и быстрого смешения элементов пламени, т.-е. газефицированного топлива со вторичным воздухом. Трудно ли этого достигнуть? Попробуйте сделать горелку керосиновой лампы и вы узнаете степень трудности этой задачи.

Чем выше нагрев вторичного воздуха, тем скорее идет реакция горения; тем меньший избыток воздуха может быть пущен в пламя; тем выше вычисленная температура горения; тем большее время может находиться пламя в рабочем пространстве печи; тем больше экономия топлива; менее напряжена колосниковая решетка; лучшего состава получается на колосниках газ; требуется больший расход вторичного воздуха; энергичнее работает рекуператор; большее количество тепла вносится вторичным воздухом в топку; реакция горения может итти с меньшей скоростью, и печь делается менее требовательной к способу смешения газа и вторичного воздуха, следовательно, легче найти нужную конструкцию, легче задача конструктора, спокойнее он может быть и менее бояться за успех своего проекта. В моем Металлургическом Бюро не было инженеров для разъездов, для пуска печей. Я посылал чертежи. Печи строились местными инженерами. Пускались ими, и я иногда узнавал о работе той или другой печи через ½ года или год. В особо интересных случаях я ехал специально посмотреть работу своей печи, и хозяин-инженер встречал меня в заводе, как гостя, а не как сотрудника. Было только два случая, когда мне пришлось выехать в завод по вызову—наладить работу печи. Об этих обоих случаях я уже упоминал и буду говорить ниже. Теперь я скажу только одно. Откуда бралась у меня эта смелость посылать за тысячи верст свои чертежи и предоставлять пускать свои печи совершенно неизвестным людям?

Гидравлическая теория гарантировала лишь верность идеи и ее деталей. Во всей печи было лишь одно неизвестное—степень удачности конструкции для смешения газа и воздуха и скорость реакции горения за счет вторичного воздуха.

Когда меня заставляли проектировать печи на холодном вторичном воздухе— это была всегдашняя тема моих размышлений и моих сомнений. Когда мне удавалось гарантировать хороший нагрев вторичного воздуха, я делался гораздо покойнее и делался беспечен, когда мне удавалось нагреть воздух в регенераторах до 600—700° С. Такая печь не могла не пойти. Она не смела пойти плохо при самом неискусном управлении ею.



Фиг. 34.

Итак, вот мой завет моим ученикам: проектируя печи для температур 1.350—1.400°, помните, что чем выше будет нагрев вторичного воздуха, тем легче будет ваша задача. Я положительно не советую вам браться за проектирование этих печей на холодном воздухе. Если к этому вас принудят обстоятельства, готовьтесь к возможности десять раз переделать печь, прежде чем добиться хорошей работы.

Итак, надо было остановиться на системе рекуператора. Я встретил полное недоверие, когда стал применять в своих конструкциях чугунный рекуператор Моргана. Но практика скоро указала на ошибочность этого недоверия. Рекуператоры свободно выдерживают год работы. Однако, при постройке их должно соблюдать одну предосторожность: пролеты горячего воздуха должны снимать теплый воздух с поверхности верхних чугунных, перекрывающих трубы, плит. Если горячий воздух будет отведен на четверть или полкирпича ниже, то под перекрывающими плитами получится мешок горячих газов. Плиты раскалятся до светлокрасного каления. То же сделается и с верхними частями труб, и рекуператор может быть сожжен в недельный срок. В части III (стр. 70) я уже останавливался на подобном случае, происшедшем в Охтенском заводе. Это был один из двух случаев, когда меня по телефону вызвали в завод. Я обнаружил отступление строителя от чертежа, велел исправить недосмотр, и рекуператор работал с тех пор благополучно.

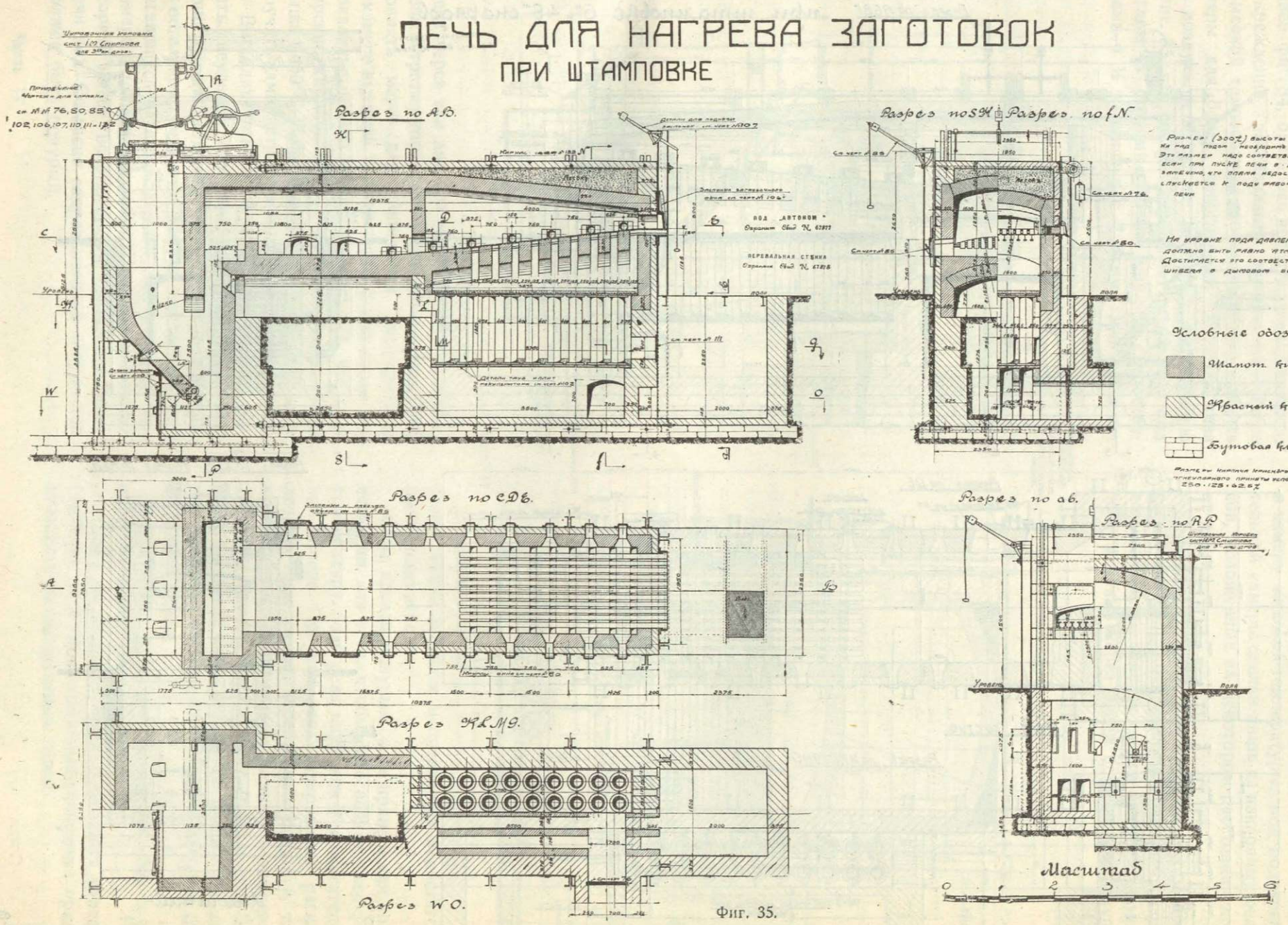
Когда заказы на чугунное литье начали встречать трудности, я, по желанию инженеров заводов, пробовал применить кирпичные рекуператоры Ифе (Германсена) и Питцка (см. часть III, стр. 69), но без особого успеха. Чугунные рекуператоры были прочнее кирпичных, которые часто трескались в огне.

Теперь я перейду к описанию случая неудачи, постигшей меня с печью на дровах в Н.-Тагильском заводе. Топке печи была придана первоначальная конструкция фиг. 34. Мне не хотелось проводить вторичный воздух сзади газа, как показано на топках печей (фиг. 36, 37 и 38), что давало довольно неуклюжую конструкцию, и я рискнул провести вторичный воздух впереди газа, как показано на фиг. 34. Риск был сделан совершенно сознательно, и, когда я получил известие, что печь не греет заготовок, я совершенно точно знал причину плохой работы печи. Я выехал в Н.-Тагил, попросив к моему приезду иметь печь на полном огне.

Картина, представившаяся моим глазам, была мною предвидена: в камере высокой температуры (фиг. 35) температура была около 1.000° С; в пролете под перевальной стенкой—белокалильный жар и в подогревательной камере была температура около 1.200—1.100° С. Очевидно, фокус горения был смещен. Его надо было приблизить к топке.

Почему запаздывало горение? Совершенно очевидно, что метод смешения газа и вторичного воздуха был непригоден. Воздух, нагретый, до 200—300° С, гораздо тяжелее газа и потому он стелется по поду камеры, и высокая температура горения осуществлялась только под перевальной стенкой.

ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК
ПРИ ШТАМПОВКЕ

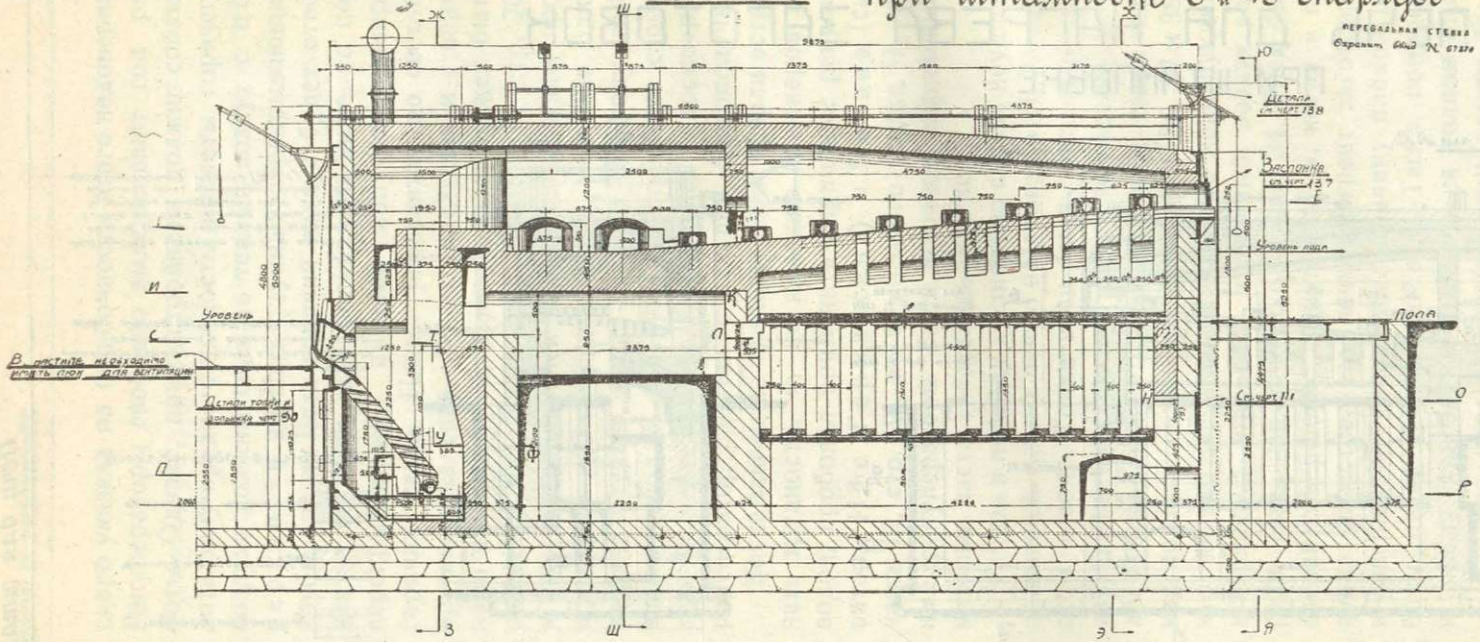


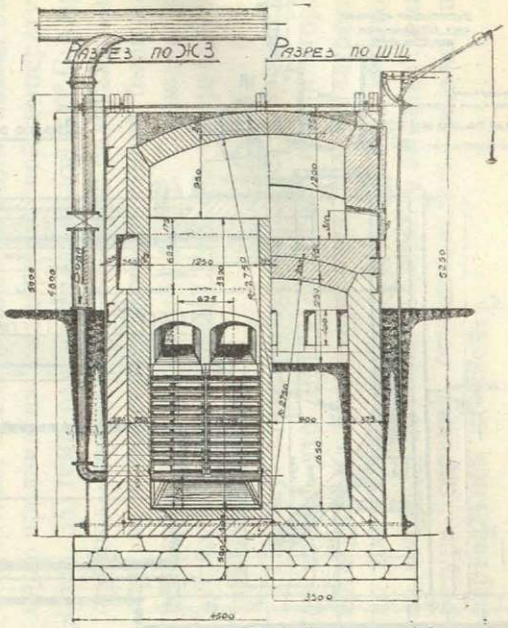
Фиг. 35.

Для камен. угля.

ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК

Разрез по АБВГ при штамповке 6" и 48" снарядов





Масштаб

0 1 2 3 4 5 6

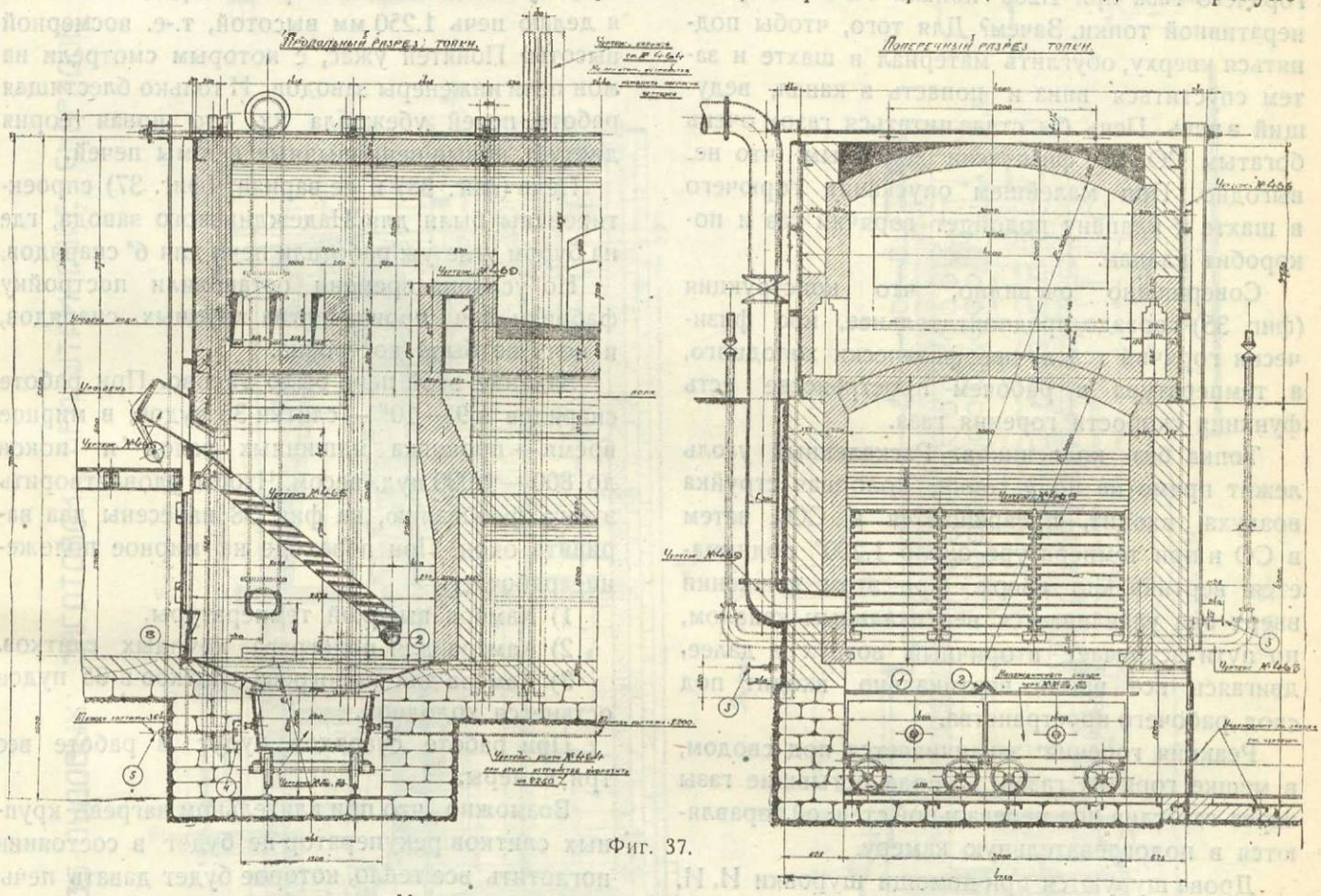
Фиг. 36.

Предварительного смешения газа и воздуха до вступления в камеру с высокой температурой, которое я старался осуществить конструкцией фиг. 34, оказалось недостаточно. Для предупреждения расслаивания пламени в камере высокой температуры необходимо было принять меры для более энергичного смешения газа и воздуха, и я тут же вычертил конструкцию фиг. 35, где воздух пересекает струю газа под углом 45° струями в 36 мм ширины, с простенками в ½ кирпича, т.-е. 125 мм. Печь была пущена через три дня без меня. Когда я приехал, меня встретил управляющий заводом с просьбой принять меры для понижения температуры в камере высокой температуры; в ней стоял белокалильный жар настолько сильный, что кунгурский кирпич потек, т.-е. температура была выше 1.450° С. Пришлось сбавить воздуха и газа и поучить администрацию управлять температурой.

Вот единственная неудача, если можно назвать неудачей неоправдавшуюся рискованную конструкцию, которая тотчас была исправлена. В остальном печи эти вполне оправдали возлагавшиеся на них надежды. Подогревательная камера в полном противоречии с гидравлической теорией имеет восстающий к холодному концу печи под. Согласно гидравлической теории под должен быть понурый.

Чтобы не тащить кверху тяжелые остывшие струйки печных газов и вместе с тем облегчить скатывание круглых снарядных заготовок вниз в камеру высокой температуры, под подогревательной камеры сделан лишь из наклонных рельсов, положенных на некотором расстоянии друг от друга.

Благодаря такой конструкции, остывшие, вследствие соприкосновения с холодным снарядом, струйки не тянутся кверху к заднему концу печи, а прямо через щели попадают в рекуператор. Таким образом исправляется недостаток восстающего пода.



Фиг. 37.

Свод сделан понурым, а не прямым или восстающим для того, чтобы обеспечить высокую температуру подогрева заготовок в сожигательной камере. Понурый свод задерживает раскаленные газы около перевальной стенки и, таким образом, устанавливает разницу в температуре подогревательной камеры. Восстающий же свод, напротив того, студил бы подогревательную камеру у перевальной стенки и нагревал бы ее задний конец.

Продолжаю описание печи (фиг. 35) в ее окончательном виде.

Топка на дровах. В главе о шахтных топках (часть III, гл. XVII) я уже описал основные принципы устройства шахтных топок.

В обычных шатных топках и в их последнем видоизменении, топке проф. Макарьева, не соблюден основной принцип движения горячих струй вверх; они дымят, и чугунные коробки для дров и торфа нагреваются настолько сильно, что нижний клапан их коробит и топка перестает быть герметичной.

Если бы вертикальный газовый канал не был бы расположен отвесно над зольником топки, а сбоку, как делает Макарьев, то струйки горячего газа при 1.200° попали бы в шахту генеративной топки. Зачем? Для того, чтобы подняться кверху, обуглить материал в шахте и затем спуститься вниз и попасть в канал, ведущий в печь. Печь бы стала питаться газом очень богатым CO, но физически холодным, что невыгодно. При малейшем опускании горючего в шахте к клапану подойдет горячий газ и покоробит клапан.

Совершенно очевидно, что конструкция (фиг. 35) гораздо предпочтительнее, ибо физически горячий газ лучше физически холодного, а температура в рабочем пространстве есть функция скорости горения газа.

Топка без колосников. Раскаленный уголь лежит прямо на поду топки; холодная струйка воздуха входит, превращается в CO_2, затем в CO и при температуре около 1.200° поднимается вертикально вверх. При этом движении вверх она улавливается вертикальным каналом, по пути встречает вторичный воздух и далее, двигаясь все время вертикально, входит под свод рабочего пространства.

Реакция горения заканчивается под сводом, в мешке горячих газов. С пода остывшие газы через газослив под перевальной стенкой наравляются в подогревательную камеру.

Дрова шуруются при помощи шуровки И. И. Смирнова (патент) стройным водяным затвором. Стенка генератора опирается на газовые трубы, по коим циркулирует вода. Для спуска дров в случае подстоя в наклонной стенке сделан глазок для лома, коим дрова встряхиваются и спускаются в зольник.

Пламя в печи направлено прямо вверх. Это уменьшает количество окалины на подогретых заготовках и способствует получению очень чистых снарядов. Когда я начал проектировать печи по заказам заводов, то в некоторых случаях оказалось, что мои печи не влезали в здания уже начатых построек.

Пришлось делать печи с боковой шуровкой и выдачей снарядов вперед (фиг. 39 и 40). Это очень понравилось заводчикам, ибо сокращало путь подноса снарядов к прессу и делало все расположение фабрики очень компактным. С теоретической точки зрения это—очень интересная конструкция. Так гнуть газовую реку можно только в том случае, когда пламя направлено вверх и там, под сводом, останавливается, а затем остывшие на поду печные газы вновь дают газослив под перевальной стенкой, что в свою очередь возможно при высоте свода над подом 1.250 мм.

Что скажут специалисты по постройке печей, когда увидят, что для нагрева снаряда в 150 мм я делаю печь 1.250 мм высотой, т.-е. восмерной высоты! Понятен ужас, с которым смотрели на мои печи инженеры заводов. И только блестящая работа печей убеждала их, что новая теория диктует новые непривычные формы печей.

Печь (фиг. 38) и ее вариант (фиг. 37) спроектированы были для Надеждинского завода, где на буром угле уж работали печи для 6″ снарядов.

Но условия времени остановили постройку фабрики для производства крупных снарядов, и печь не была достроена.

Задание этой печи было таково. При работе снарядов в 9 — 10″ — слитки 35 пудов, в мирное время — проковка машинных валов и поков до 800 — 1.000 пуд. весом. Чтобы удовлетворить этому требованию, на фиг. 38 нанесены два варианта окон. При переходе на мирное положение работает:

1) Камера высокой температуры.

2) Камера для подогрева крупных слитков.

3) Камера для подогрева слитков в 35 пудов останется холодной.

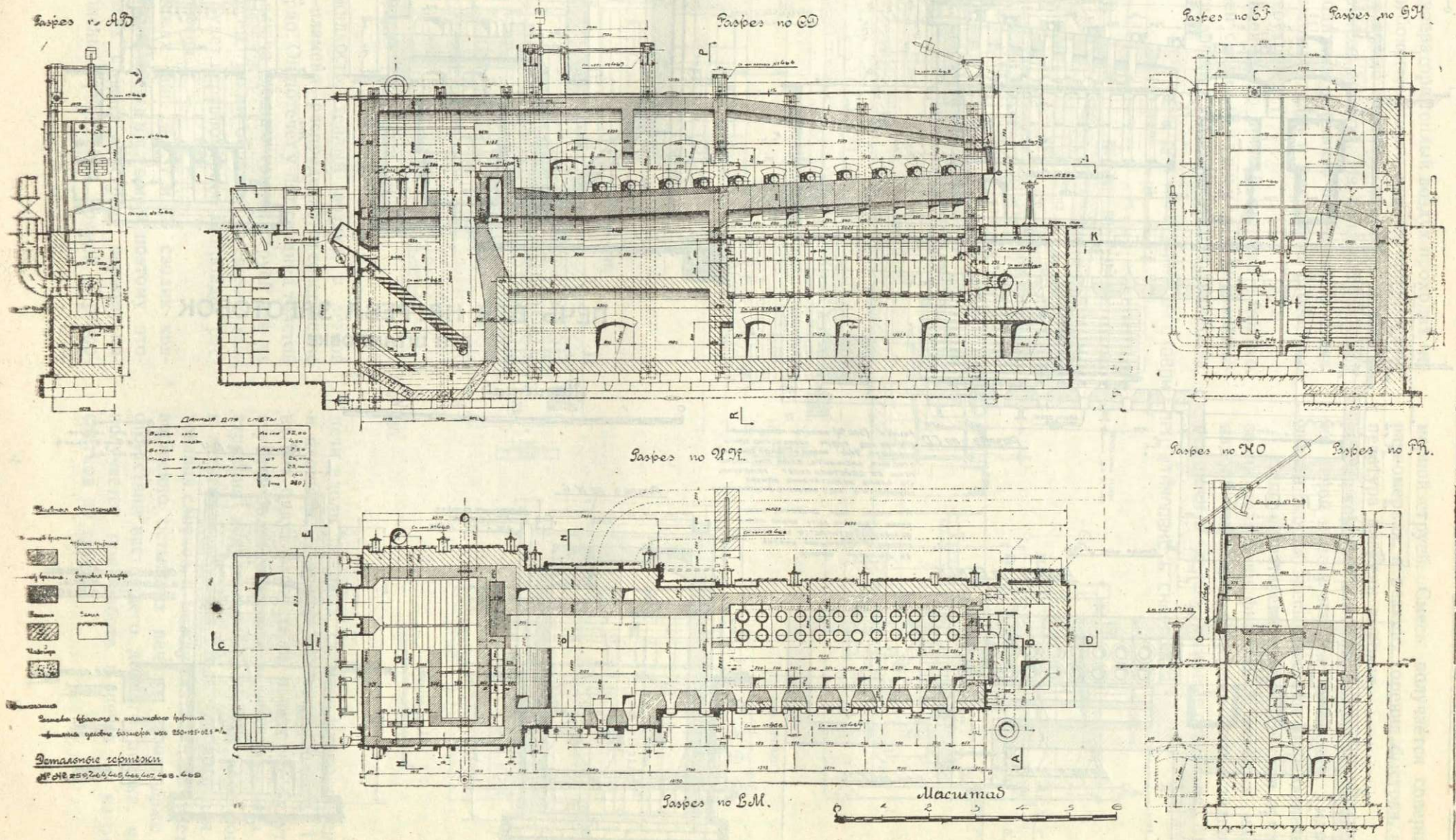
При работе снарядов будут в работе все три камеры.

Возможно, что при длительном нагреве крупных слитков рекуператор не будет в состоянии поглотить все тепло, которое будет давать печь. тогда часть печных газов предположено прямо направить в дымовую трубу через отверстия в поду. Этими же отверстиями можно будет понизить температуру и в подогревательной камере, куда садятся крупные слитки, чтобы они не треснули. Чтобы их не задело газосливом, окно подогревательной камеры отодвинуто от первой перевальной стенки.

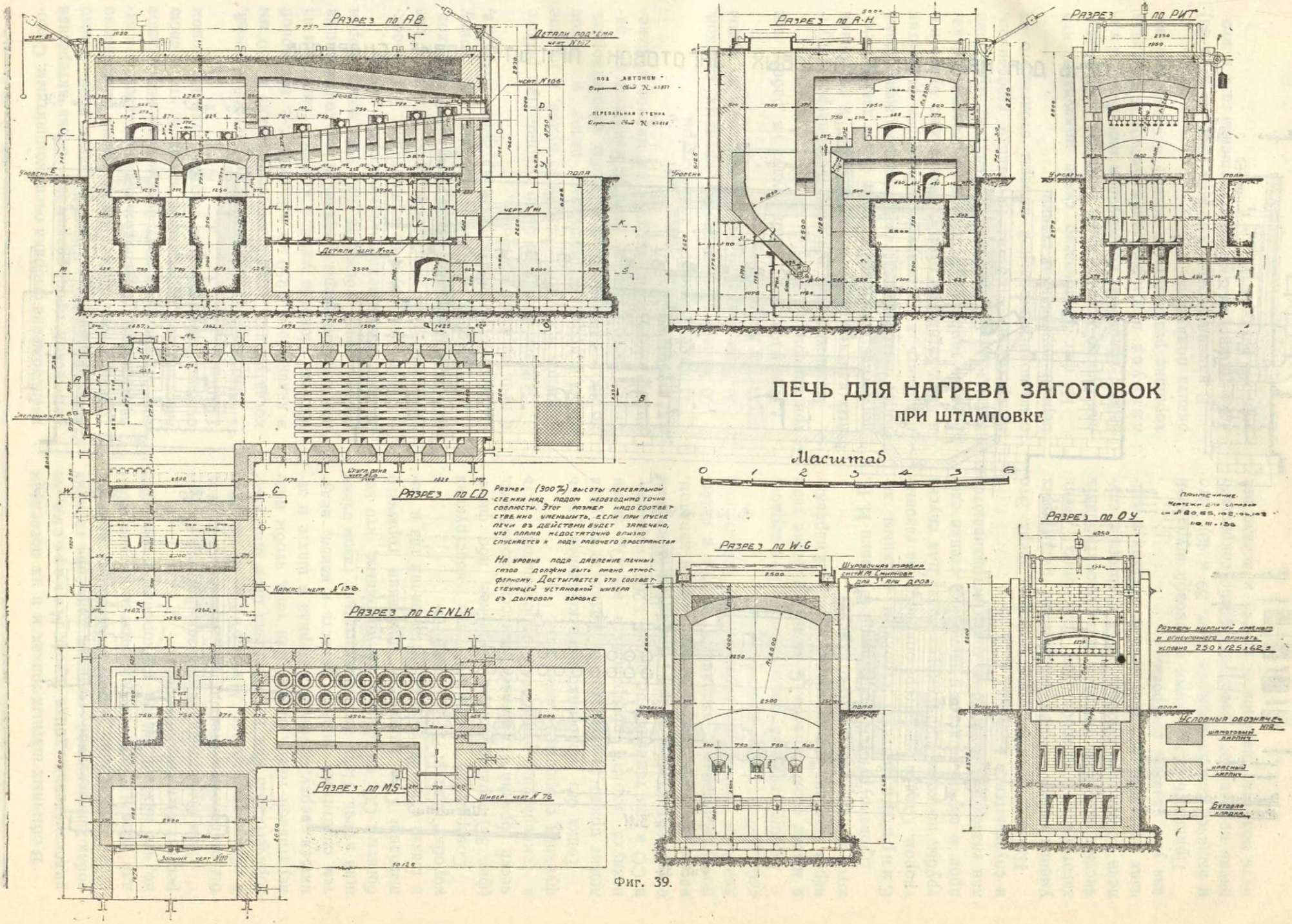
На фиг. 37 показано сухое поддувало, что для бурого угля гораздо разумнее, чем поддувало с водой. Эта конструкция инж. А. П. Циллиакуса в том же Надеждинском заводе дала хорошие результаты, и потому я сделал оба варианта поддувала.

В каменноугольных топках (фиг. 36, 37 и 38) надо упомянуть о способе смешения газа и вторичного воздуха.

ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА 35-ПУДОВЫХ ЗАГОТОВОК ПРИ ШТАМПОВКЕ СНАРЯДОВ



Фиг. 38.

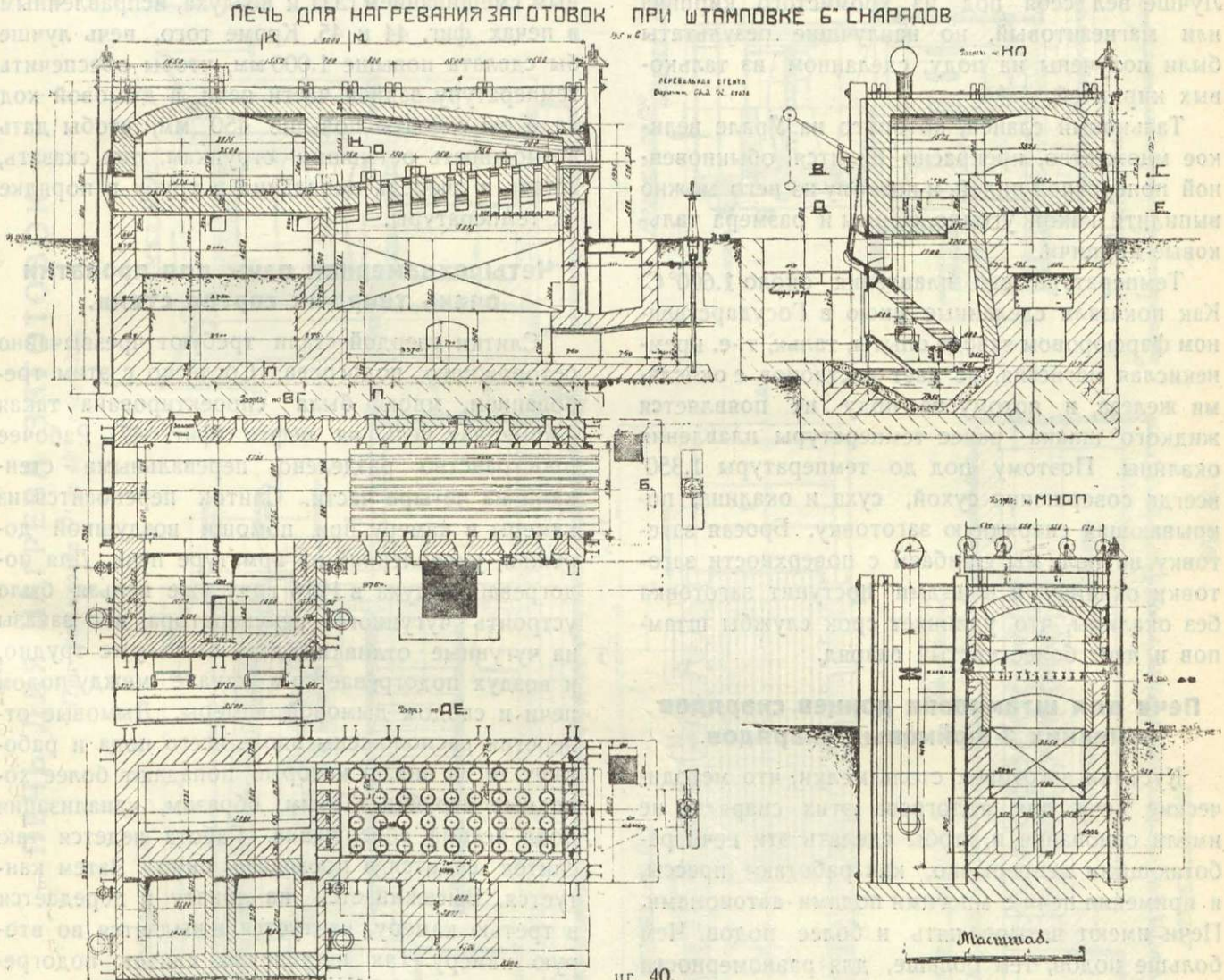


ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК
ПРИ ШТАМПОВКЕ

Фиг. 39.

Из рекуператора теплый воздух проходит через порог и боковые каналы, при чем при проектировании их нужно следить, чтобы не получить мешка горячего воздуха. Из боковых каналов воздух входит на верхнюю поверхность свода, перекрывающего топку и имеющего своеобразную конструкцию.

Обыкновенно это прямой сводник и только. Так устроен сводик Боэциуса. С гидравлической точки зрения эта конструкция ошибочна.



Фиг. 40.

Тяжелая жидкость, теплый воздух, в легкой жидкости—пламени—распределяется совершенно неравномерно. Он потечет у пят сводика толстой струей, а у ключа сводика тонкой струей или не потечет совсем. Таким образом, смешение газа и воздуха будет неравномерное и пройдет расслоение пламени.

На чертежах фиг. 36, 37 и 38 сводик кончается прямым перевалом, и поэтому вторичный воздух стекает навстречу первому потоку совершенно правильной прямой и равномерной струей. Смесь получается совершенно равномерная, а реакция горения быстрая, и температура пламени высокая.

Эта конструкция была продумана до постройки печей и осталась без изменения. Гидравлическая теория здесь блестяще оправдалась.

Надо сказать еще несколько слов о канализации пода печи фиг. 38. Я не вижу никакой надобности тащить остывшие газы в задний конец печи и делаю дымовые отверстия в поду печи вдоль боковых стенок. Число отверстий и площади их нужно делать побольше. Тогда из них будут работать те, в которые будут поступать более холодные печные газы. Эта конструкция исправляет недостатки восстающего к заднему концу пода, столь удобного для кантования слитков, и между слитками не будет совершенно остывших печных газов, даже при отсутствии настоящего донного потока, какой получается при работе в печах с нагревом слитков на трубах.

Фиг. 41 и 42 представляют собой те же печи для нагрева заготовок, но переделанные на нефть и генераторный газ.

При работе на печах для штамповки снарядов мы встретились с большими трудностями для содержания в исправности пода высокой температуры. Мы не желали иметь на поду сварочный шлак, чтобы не терять время для очистки его перед штамповкой, а потому под шамотный или динасовый был не желателен. Лучше вел себя под из хромистого кирпича или магнезитовый, но наилучшие результаты были получены на поду, сделанном из тальковых кирпичей.

Тальковый сланец, которого на Урале великое множество, прекрасно пилится обыкновенной поперечной пилой, и поэтому из него можно выпилить какой угодно формы и размера тальковые кирпичи.

Температура его плавления около 1.600° С. Как показали сделанные мною в Государственном фарфоровом заводе опыты, тальк, т.-е. кремнекислая магнезия, не дает растворов с окислами железа, и потому на поду не появляется жидкого шлака ранее температуры плавления окалины. Поэтому под до температуры 1.350° всегда совершенно сухой, суха и окалина, покрывающая снарядную заготовку. Бросая заготовку на пол, мы сшибаем с поверхности заготовки окалину, и в штамп поступит заготовка без окалины, что удлиняет срок службы штампов и дает более чистый снаряд.

Печи для штамповки донцев снарядов и мелких 3-дюймовых снарядов.

Кусочки заготовок столь мелки, что методические печи для подогрева этих снарядов не имели основания, и, чтобы сделать эти печи работающими непрерывно, как работают прессы, я применил печи с многими подами-автономами. Печи имеют четыре, пять и более подов. Чем больше подов, тем больше, для равномерности температуры спереди и сзади печи, должна быть высота печи (сделано 1.000 мм). На фиг. 43 представлена нефтяная сдвоенная печь; на фиг. 44 и 45—ординарная на дровах.

Поды отделяются друг от друга рядами дымовых отверстий. Чтобы заготовки не могли провалиться в эти отверстия, они защищаются стоймя поставленными кирпичами.

Печь (фиг. 43) имеет рекуператор Питцка; большой высотой дымовой камеры достигается очень хорошая утилизация нагревательной поверхности этого рекуператора. Совершенно очевидно, что при нисходящем направлении стынущих струек дымовых газов наиболее энергично будет работать наиболее холодная часть рекуператора, т.-е. приемная сторона рекуператора, и менее энергично горячая часть рекуператора. Высокая дымовая камера дает возможность струйкам распределяться по рекуператору только под влиянием их температуры и веса, а не под влиянием сопротивления проходу дымовой камеры.

Печь (фиг. 46) сделана с неудовлетворительным смешиванием газа и воздуха, исправленным в печах фиг. 44 и 45. Кроме того, печь лучше бы сделать повыше 1.000 мм, чтобы обеспечить температуру задней части печи, а дымовой ход надо бы сделать повыше 450 мм, чтобы дать возможность остывшим струйкам, так сказать, встать в очередь попадания в трубу в порядке их температуры.

Четырехкамерная печь для прокатки очень твердых сортов стали.

Слитки твердой стали требуют чрезвычайно осторожного подогрева. Согласно с этим требованием, мною была спроектирована такая 4-камерная печь на нефти (фиг. 47). Рабочее пространство разделено перевальными стенками на четыре части. Слиток переносится из камеры в камеру при помощи воздушной дорожки, укрепленной на арматуре печи. Для подогрева воздуха в 1916 году уже нельзя было устроить чугунного рекуператора, ибо заказы на чугунные отливки сдать было уже трудно, и воздух подогревается в канале между подом печи и сводом дымовой камеры. Дымовые отверстия расположены вдоль всего пода и работают те из них, в которые попадают более холодные струйки. Таким образом, канализация пода весьма совершенна. Работа ведется так: слиток садится в последнее окно. Затем кантуется. Высаживается на лопату и передается в третью камеру, кантуется и выдается во вторую камеру. Так постепенно слиток подогревается до 1.250° С.

Печь работает вполне исправно.

Вариант этой печи для дров изображен на фиг. 48.

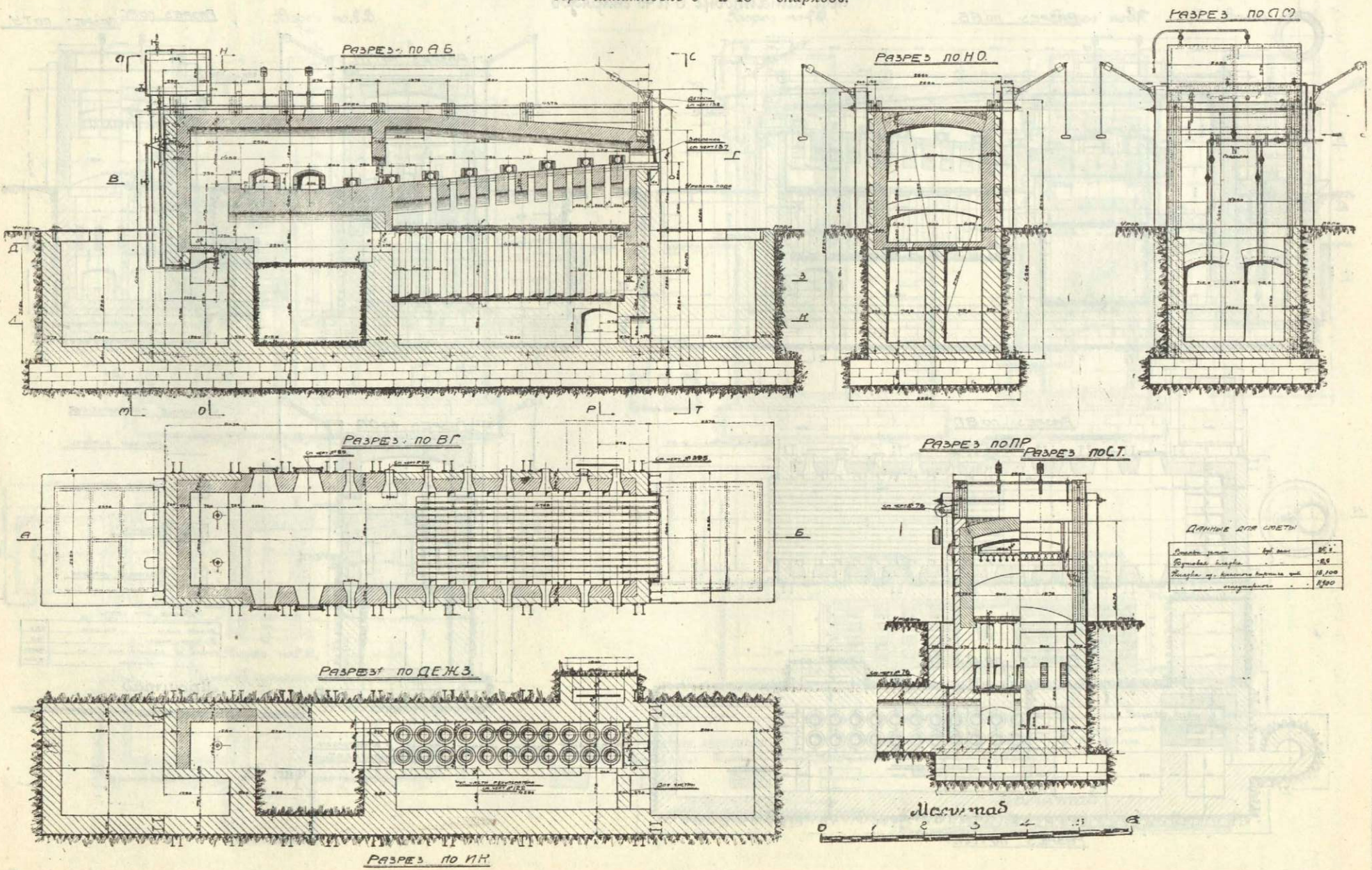
Рекуператор из простого кирпича, но более сложной конструкции, проверенной опытом Выйского завода на Урале, где такой рекуператор был устроен И. Залесским около 1901 года и исправно работал много лет у шплейзофена.

Маленькие печи для кузниц.

Печь (фиг. 49) обыкновенного типа: форсунка на дутье от вентилятора поставлена внизу

ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК

При штамповке 6" и 48"" снарядов.

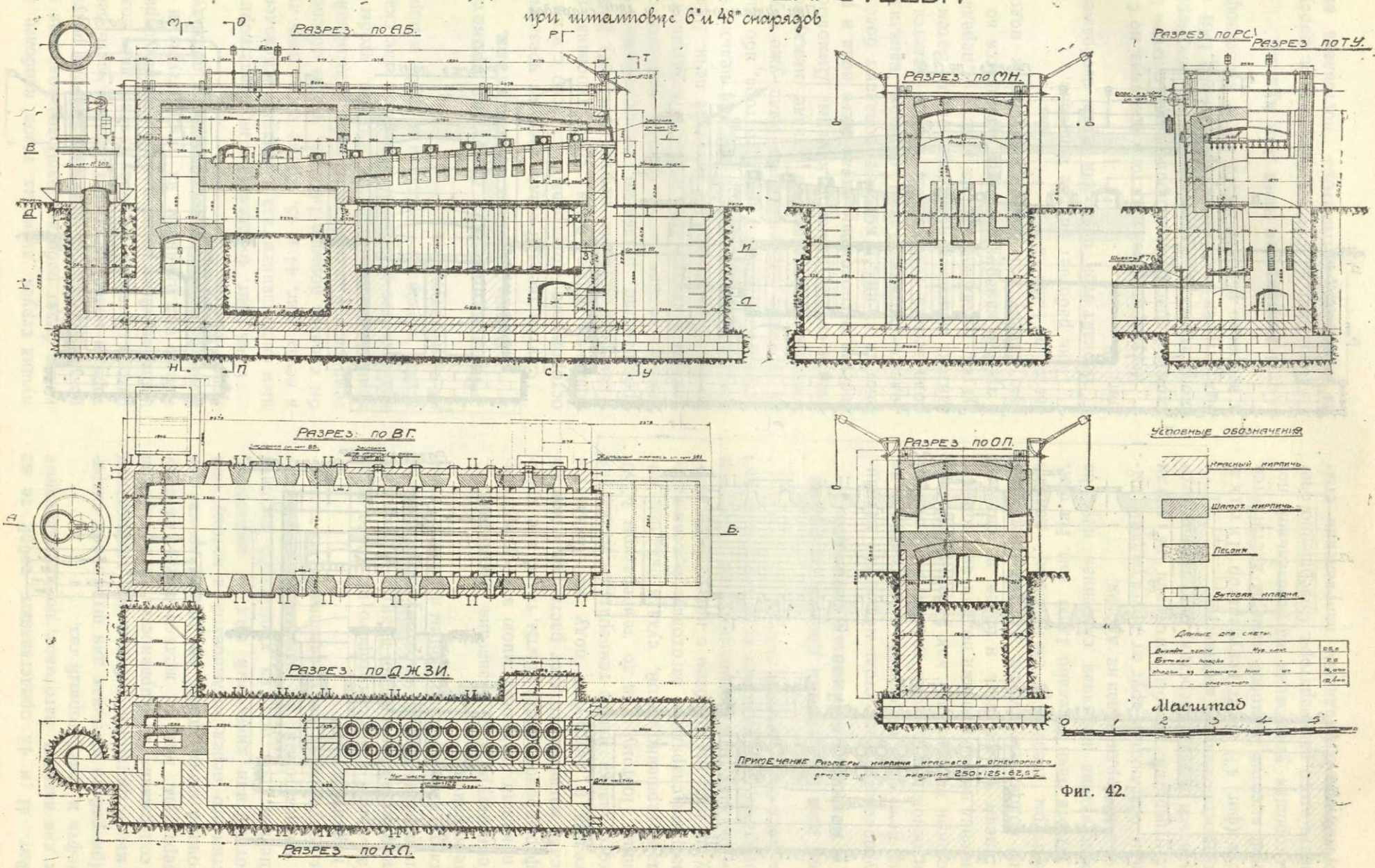


Фиг. 41.

Для газа.

ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВАНИЯ ЗАГОТОВОК

при штатовце 6" и 48" снарядов

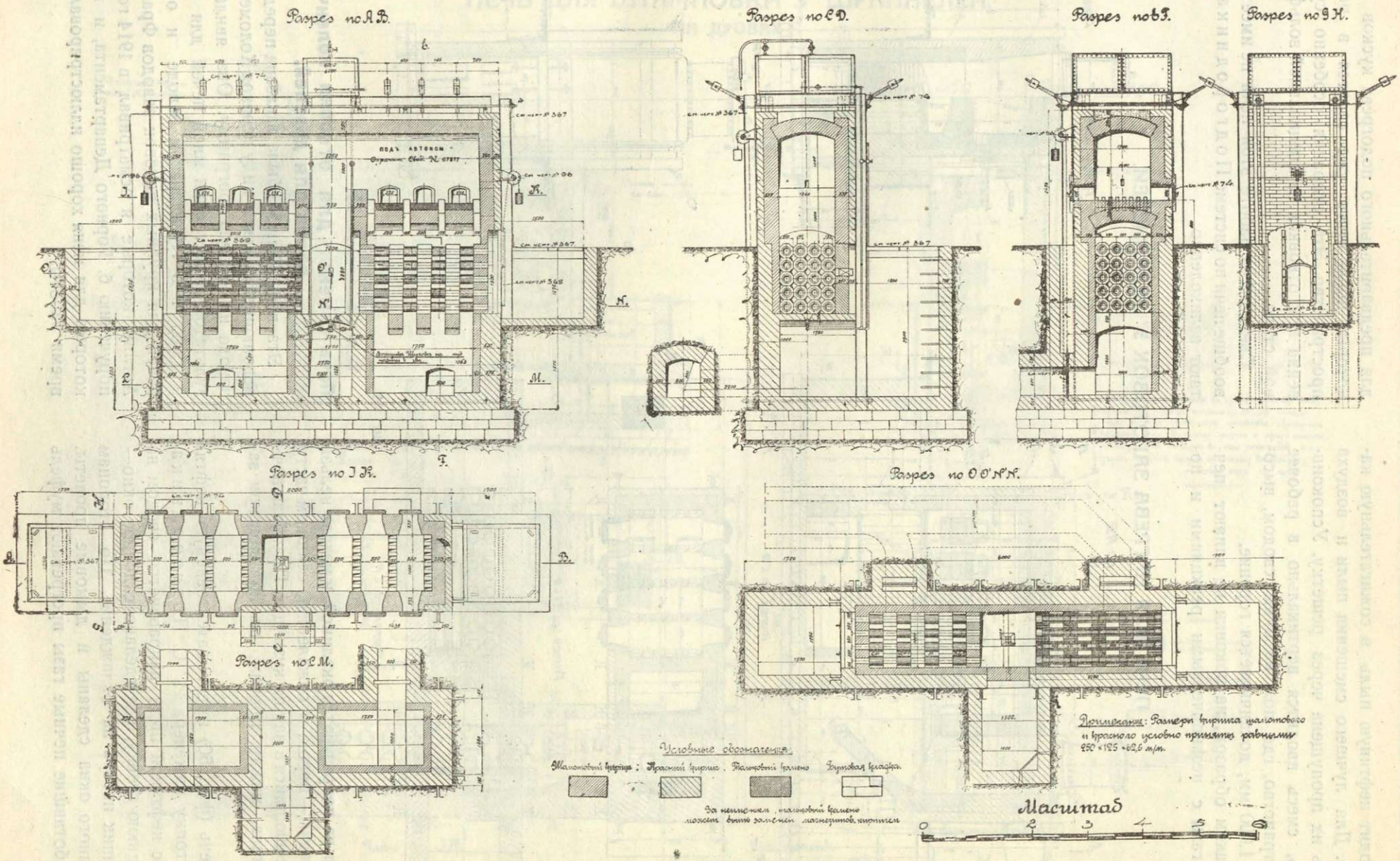


Примечание. Размеры кирпича красного и огнеупорного ... равны 250×125×62,5 м.

Фиг. 42.

Для нефти.

ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК 3" ШРАПНЕЛЕЙ.



Фиг. 43.

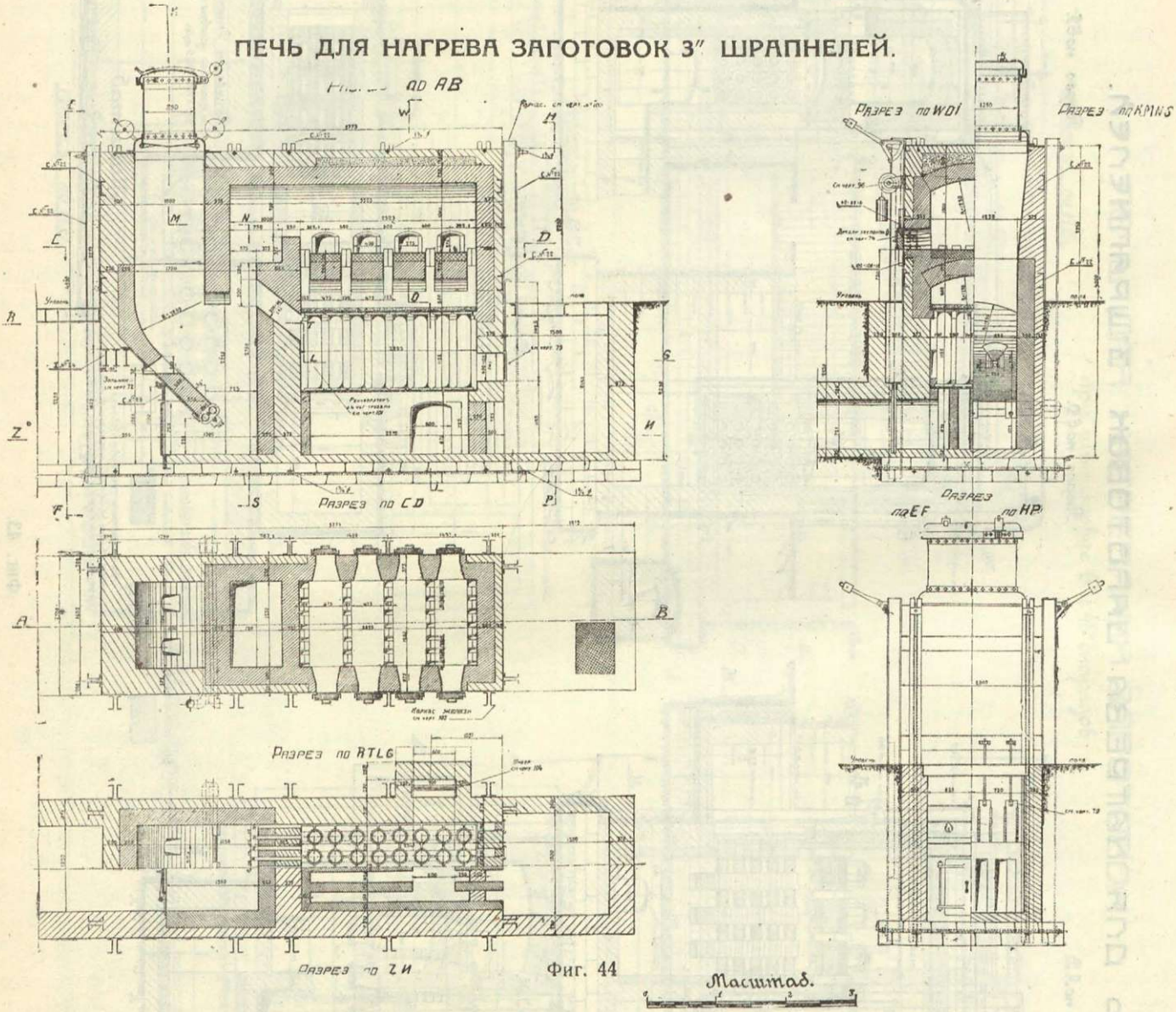
и вводит нефтяную пыль в сожигательную камеру. Для лучшего смешения пыли и воздуха смесь их пропущена через решетку. Успокоившись, смесь вводится вертикально в рабочее пространство, где под высоким сводом, высотою 1.000 мм, доканчивается горение.

Таким образом, на поковки не влияют печные газы с незаконченными реакциями и подовки не покрываются окалиной, и металл нельзя пережечь,—порок, к сожалению, слишком часто встречающийся в наших кузницах. Подобная печь работала, между прочим, на Путиловском заводе.

Печь (фиг. 50) имеет патентованную нефтяную топку инженера И. С. Подгородника. Конус нефтяной пыли направляется сводом на переднюю стенку, где сделано садочное окно—источник потерь на охлаждение. По сторонам садочного окна сделаны и дымовые пролеты. Отработавшие печные газы прогревают муфель для предварительного подогрева кусков стали, которые после этого уже садятся в рабочее пространство. Эта операция особенно существенна при отковках из специальной вольфрамовой стали.

Сведений о работе этой печи не имеется, но вообще печи по системе Подгородника работают великолепно.

ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК 3″ ШРАПНЕЛЕЙ.



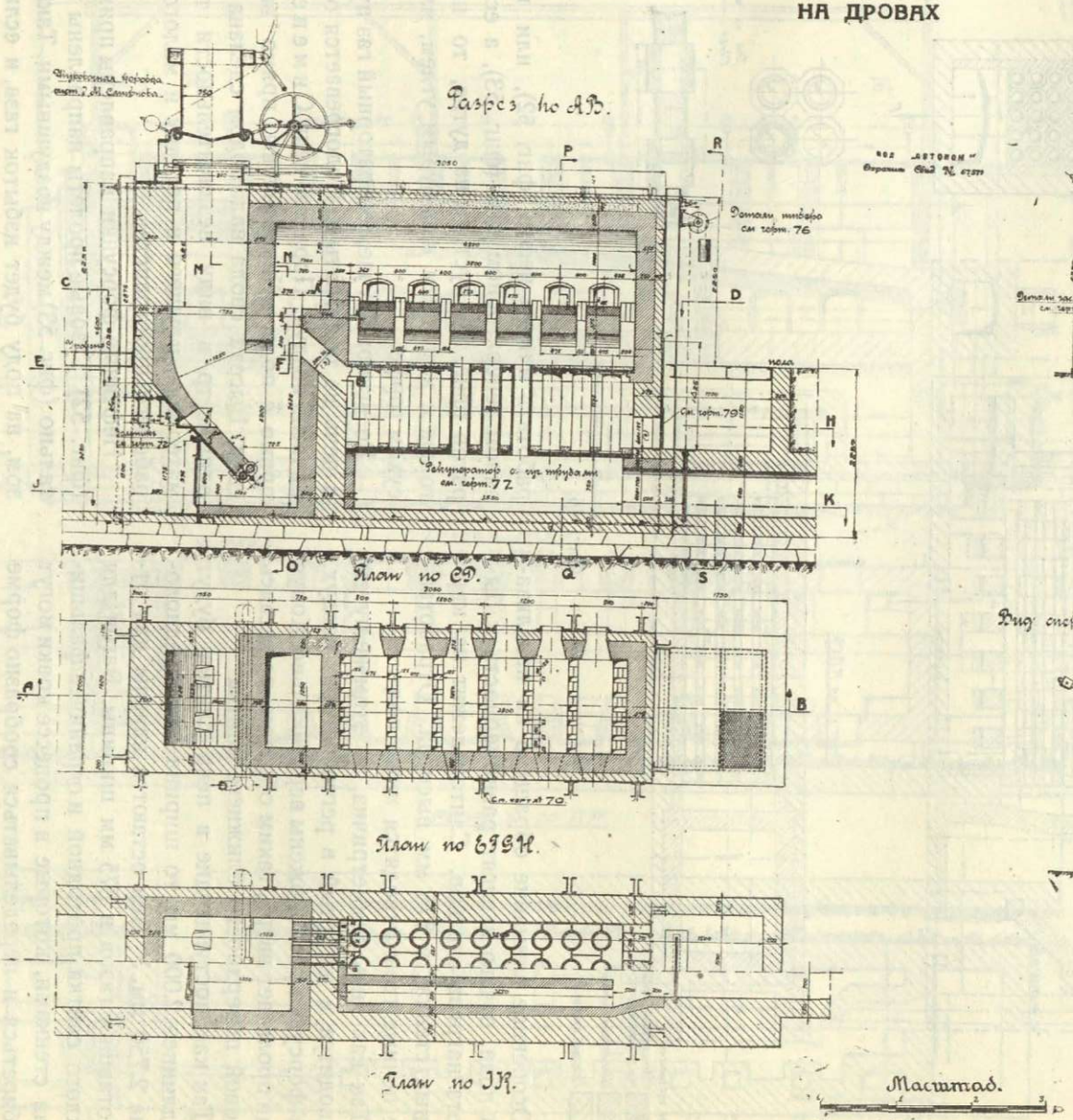
Фиг. 44

Печь Сименса для отковки коленчатых валов для дизелей.

Эта печь (фиг. 51) была заказана перед самой революцией, имея в виду переход Коломенского завода на мирную программу. Она явилась результатом перестройки мной печей для пресса в 1.000 т в Путиловском заводе и осмотра печей для крупных поковок заводов Франции и Англии, которые я осматривал в 1914 году по поручению б. Горного Департамента, и пороки которых для меня хорошо иллюстрировались во время работы.

ПЕЧЬ ДЛЯ ШТАМПОВКИ 3" ШРАПНЕЛЕЙ.

НА ДРОВАХ



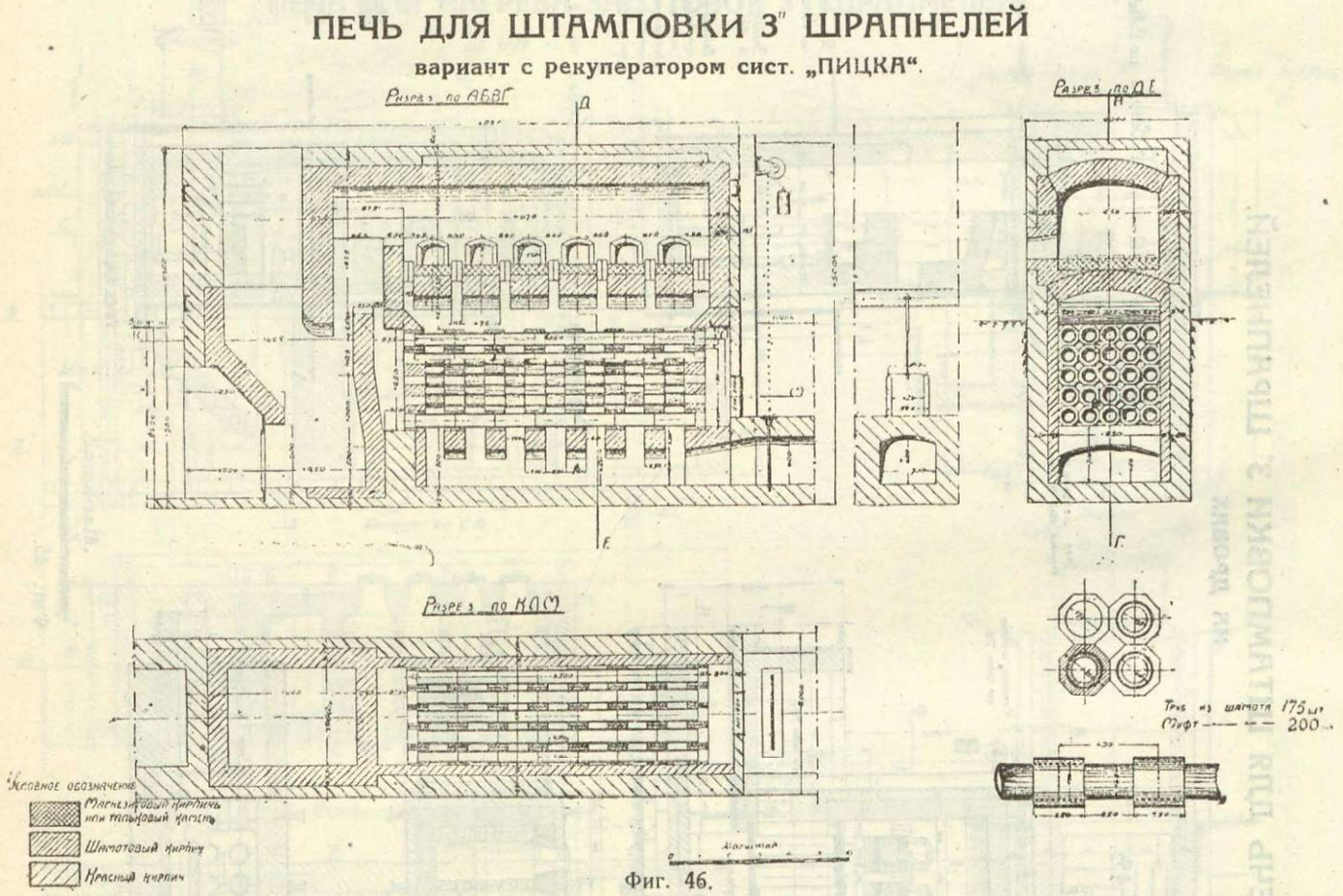
Фиг. 45.

Печь имеет три выдвижных пода. Ковка идет непрерывно трех валов сразу. Влияние перемены направления пламени печи Сименса ликвидировано высотой свода над подом 2.375 м или над низом слитка 2.000 мм. Таким образом, свободное пространство над слитком не менее 1.000 мм, что обеспечивает поверхность слитка от влияния острого пламени и сообщает печи по всему своду равномерную температуру.

менять заслонкой, показанной на чертеже. Подобную же заслонку можно сделать и для заднего окна по требованию кузнеца.

Печь Сименса для прокатки тонкого котельного железа в стане Лаута.

Прокатка листов предполагается с одного нагрева или из легковесных слитков, или из тяжеловесной болванки (сутунки). Печь может



Фиг. 46.

Особенное внимание обращено на канализацию пода, отчего зависят равномерность и быстрота нагрева слитков. Слиток лежит на кирпичных стенках в 375 мм высотой. Отработавшие печные газы отводятся ниже пода.

Так как печь симметрична, то этим же путем подводится и нагретый в регенераторах воздух. Три форсунки расположены веритикально. Конус пыли пролетает вверх, таким образом, не касаясь боковой поверхности ближнего слитка.

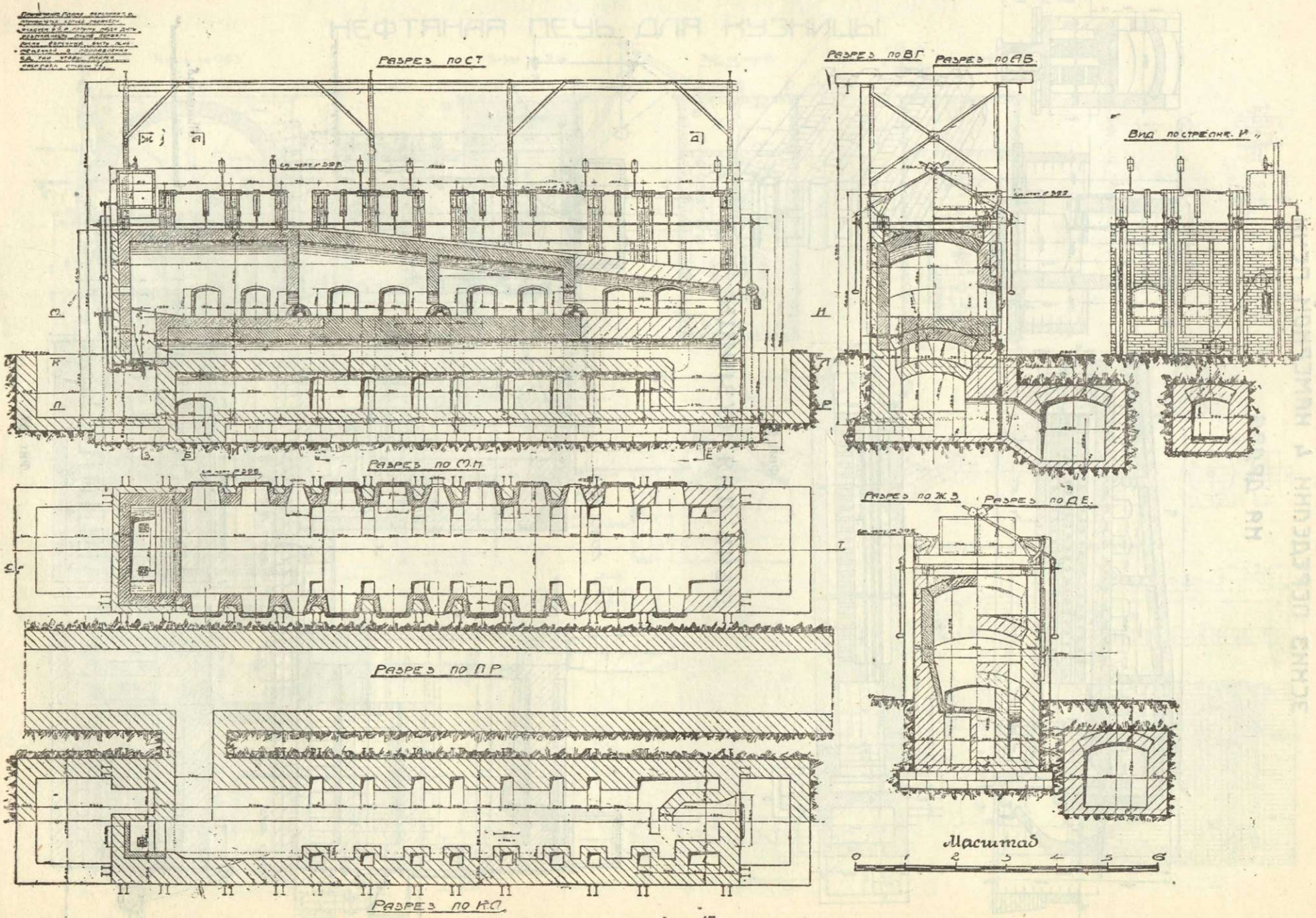
Так как поступающие в печь слитки будут не длиннее 2.000 мм, то ширина печи предположена 2.750 мм. У стен остаются каналы для отработавших газов в 375 мм ширины. Вагон для каждого слитка проходной и ограничен фальшивыми стенками, которые в процессе ковки могут разбираться и переделываться сообразно форме отковки. Переднюю стенку иногда удобнее заработать или на нефти (фиг. 52), или на дровяном генераторном газе (фиг. 53), а если генератор (фиг. 54) пустить на дутье, то на смеси торфа с каменным или бурым углем, или очень сухом торфе.

Во всяком случае, генераторный газ пускается в печь не подогретым. Подогревается один вторичный воздух. Пролеты печи Сименса взяты прямо с пода и направлены прямо вверх на свод. Высота свода над подом сделана только один метр в виду незначительности толщины материала, идущего в посадку и малого объема рабочего пространства.

Нефтяные форсунки направлены прямо вверх (фиг. 52). Газовые пролеты направлены горизонтально (фиг. 53) между воздушными. Таким образом, на поду будет избыток газа, и если воздух попадет на под, то на нем он найдет газ и не

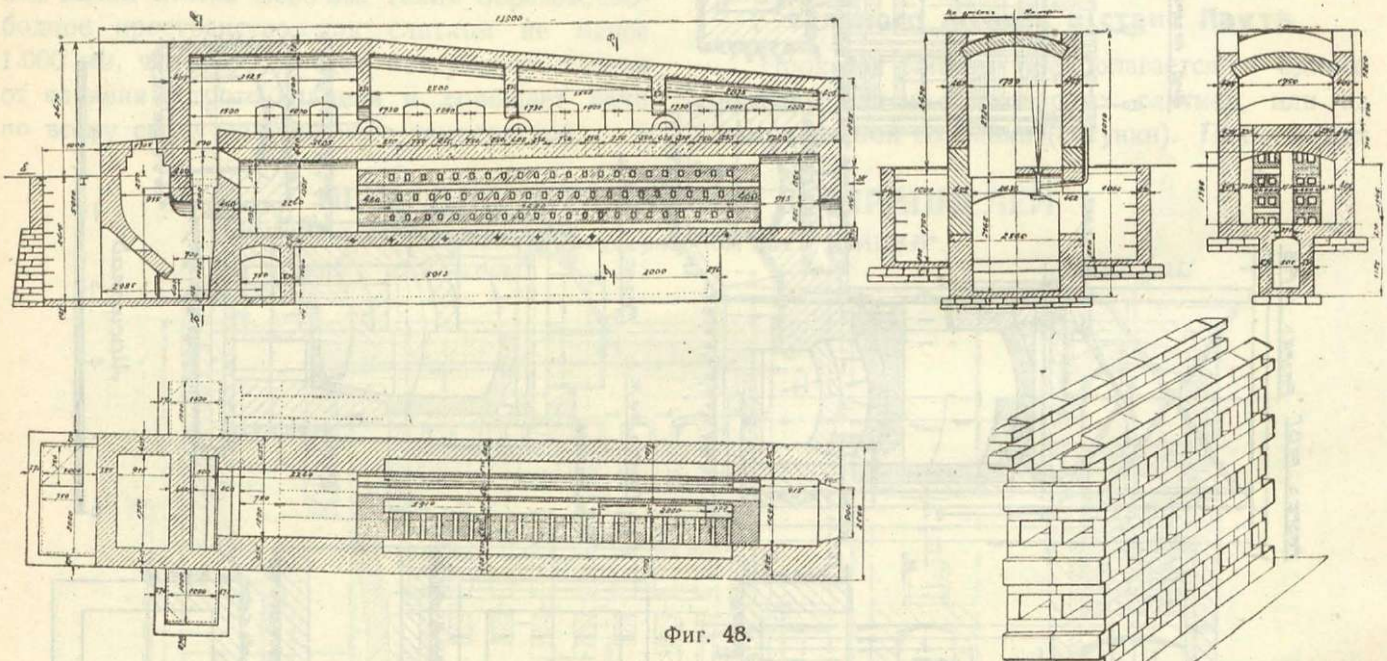
Для нефти

ЧЕТЫРЕХКАМЕРНАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ КУЗНИЦЫ.



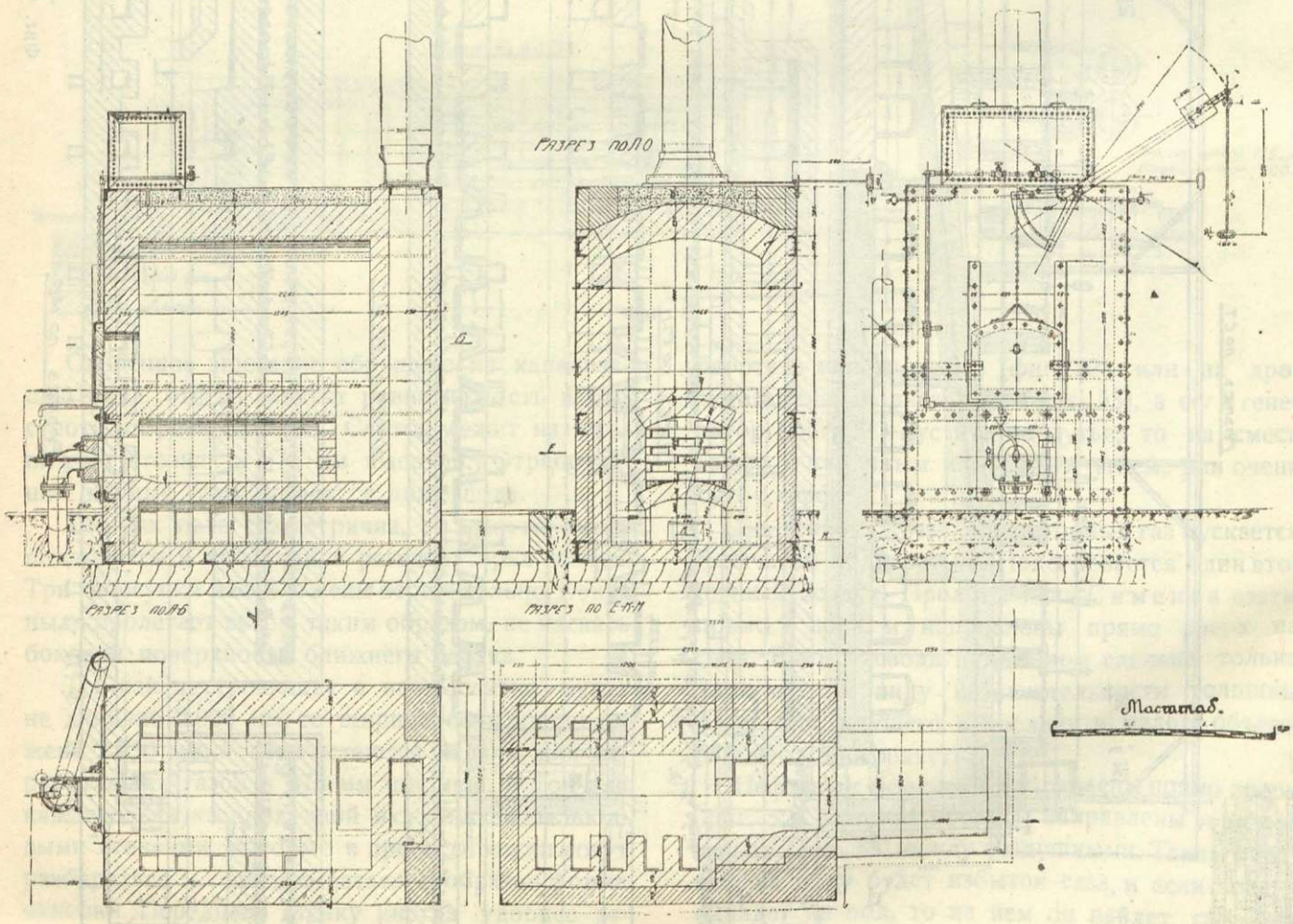
Фиг. 47.

ЭСКИЗ ПЕРЕДЕЛКИ 4 КАМЕРНОЙ ПЕЧИ НА ДРОВА.

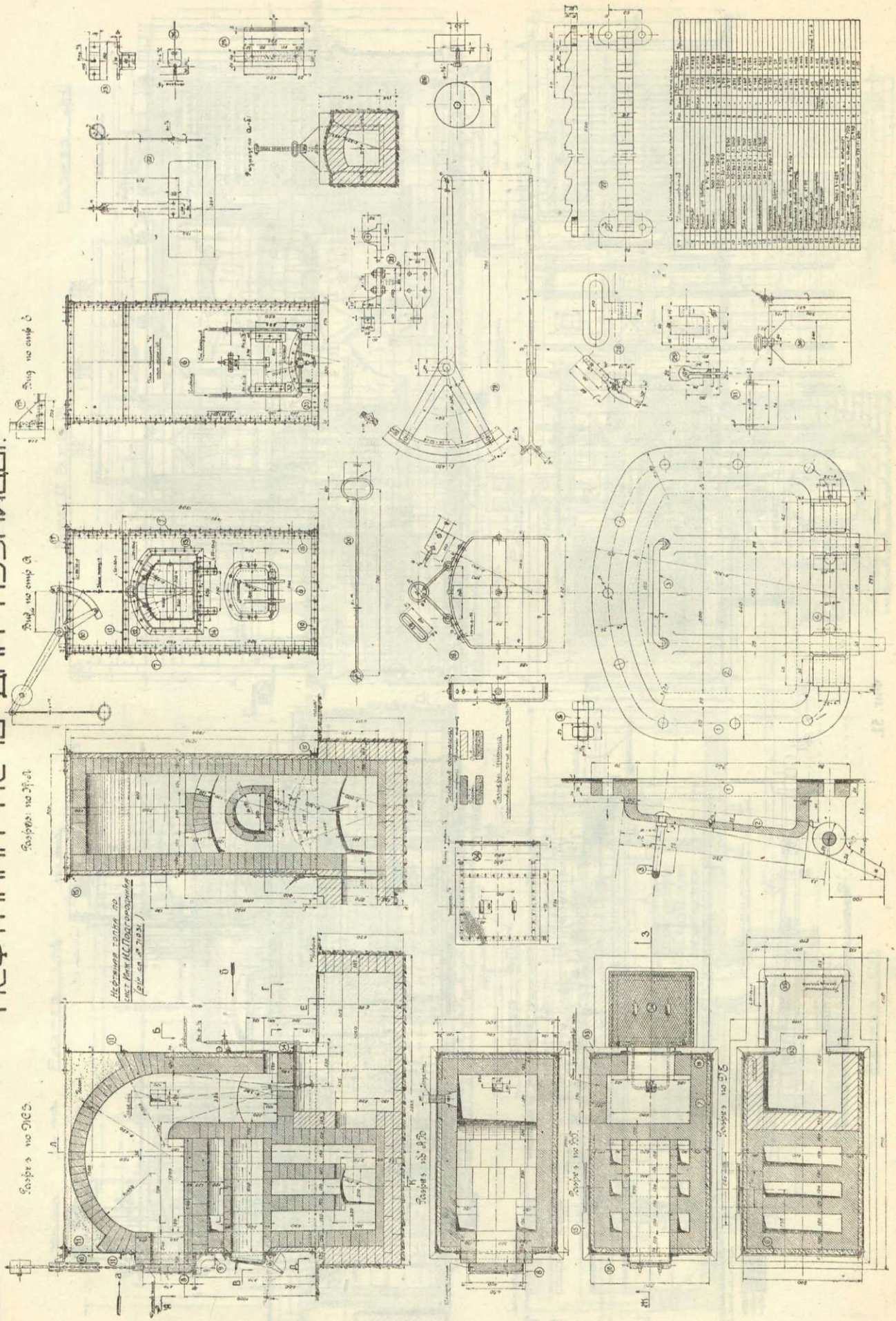


Фиг. 48.

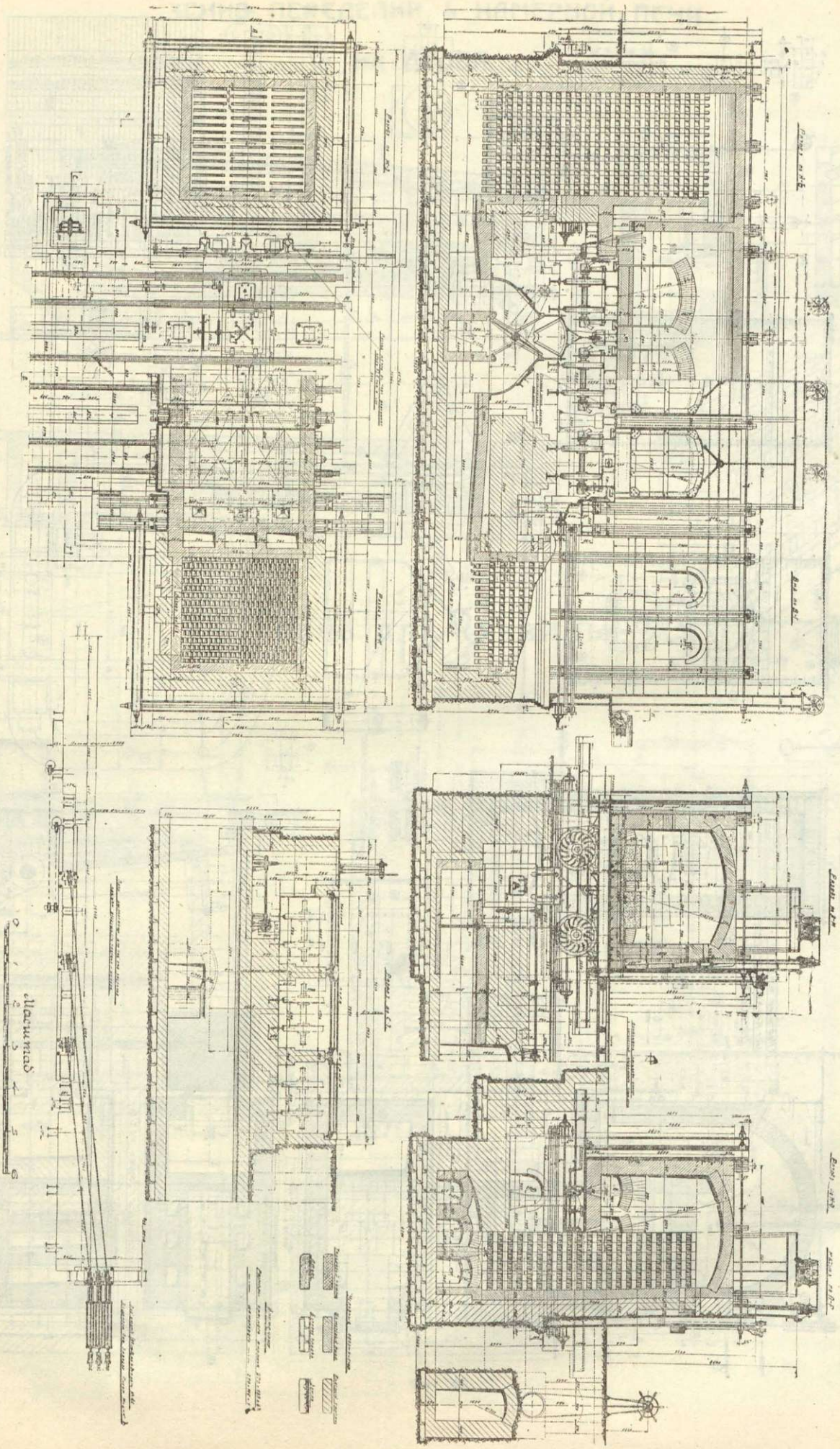
ПЕЧЬ ДЛЯ КУЗНИЦЫ.



Фиг 49.



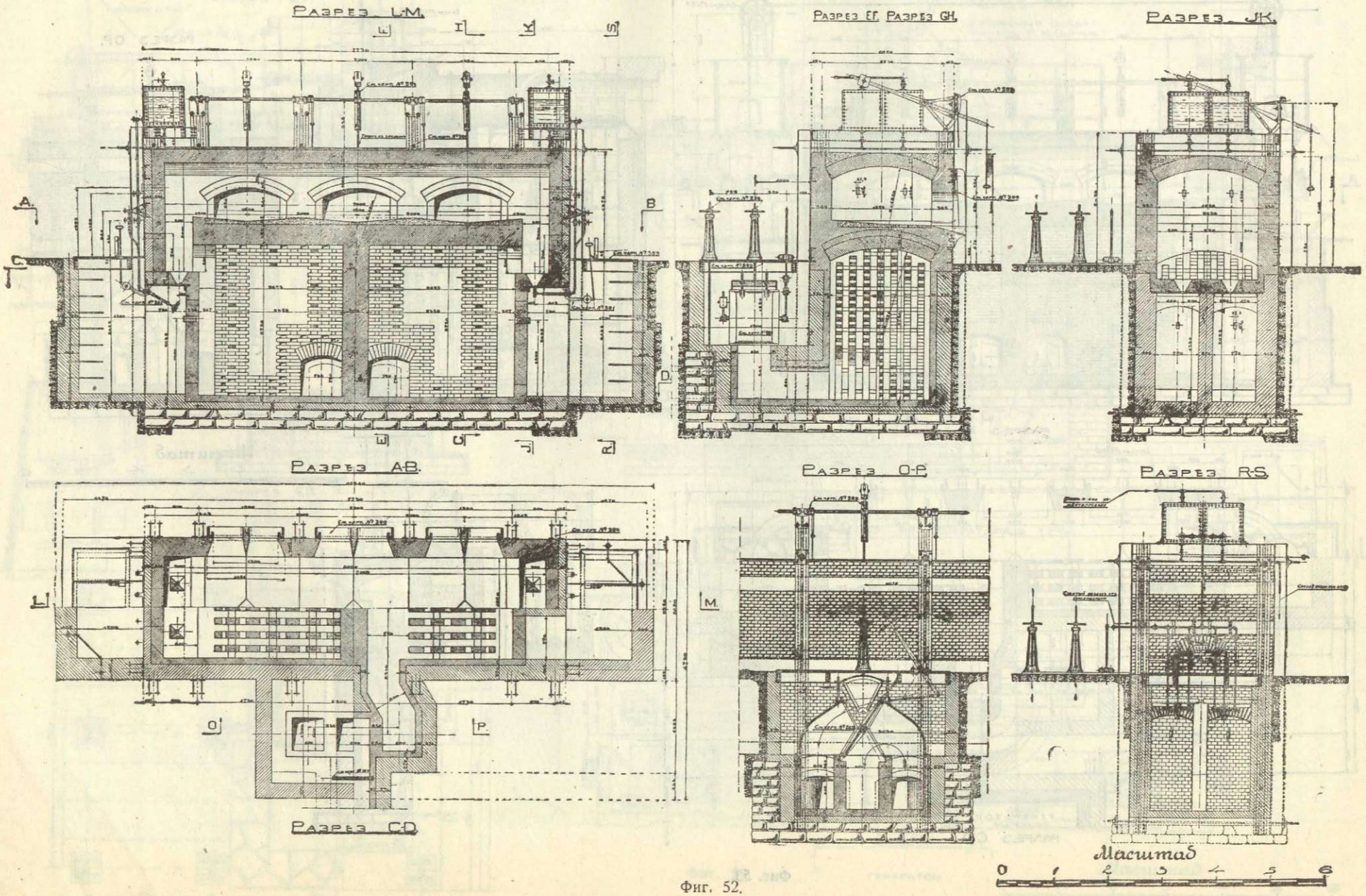
Фиг. 50.



Фиг. 51.

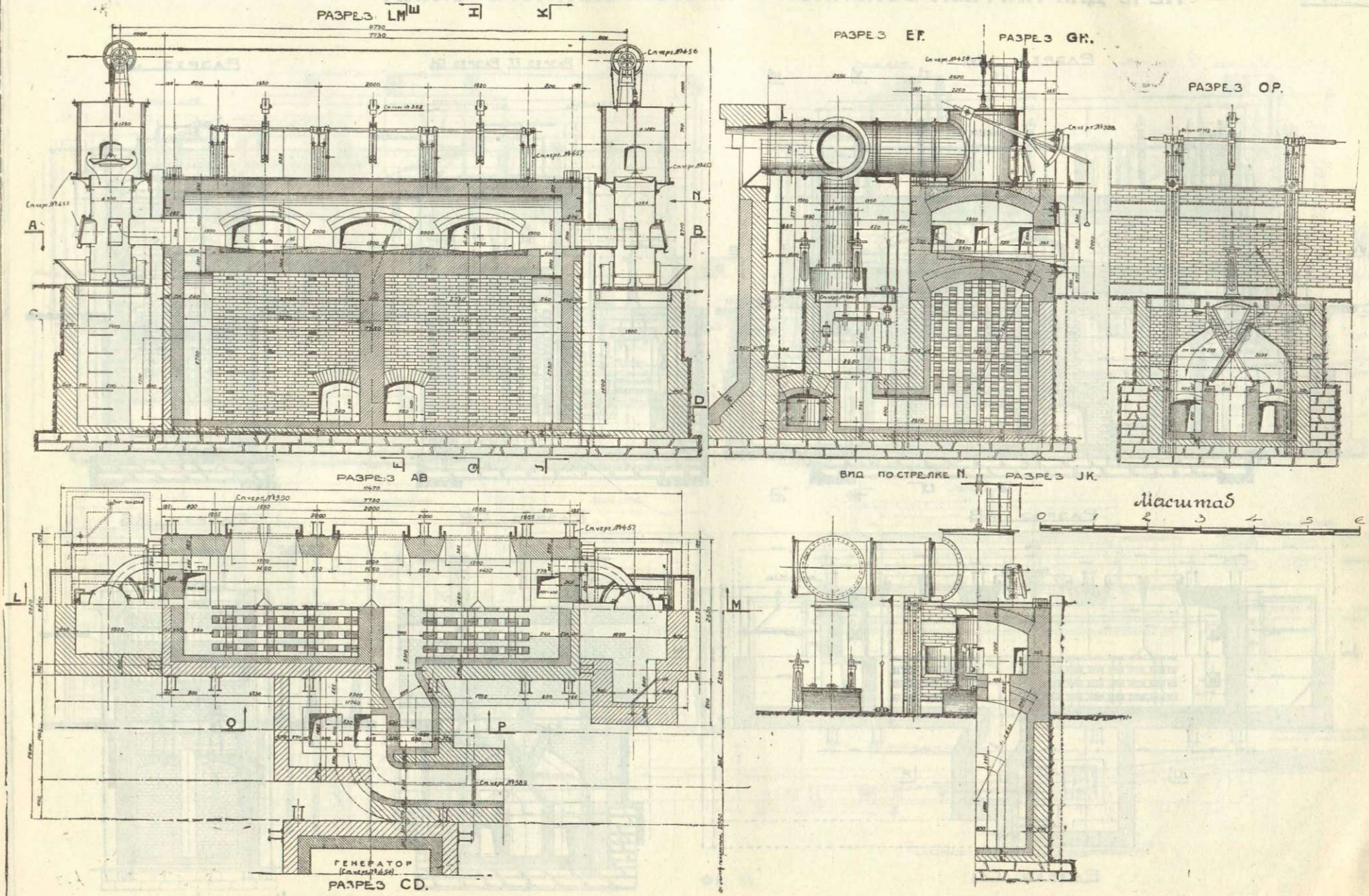
ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА БОЛВАНОК К ПРЕССУ 1.200 ТОНН.

ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА БОЛВАНОК К ЛИСТОПРОКАТНОМУ СТАНУ.



Фиг. 52.

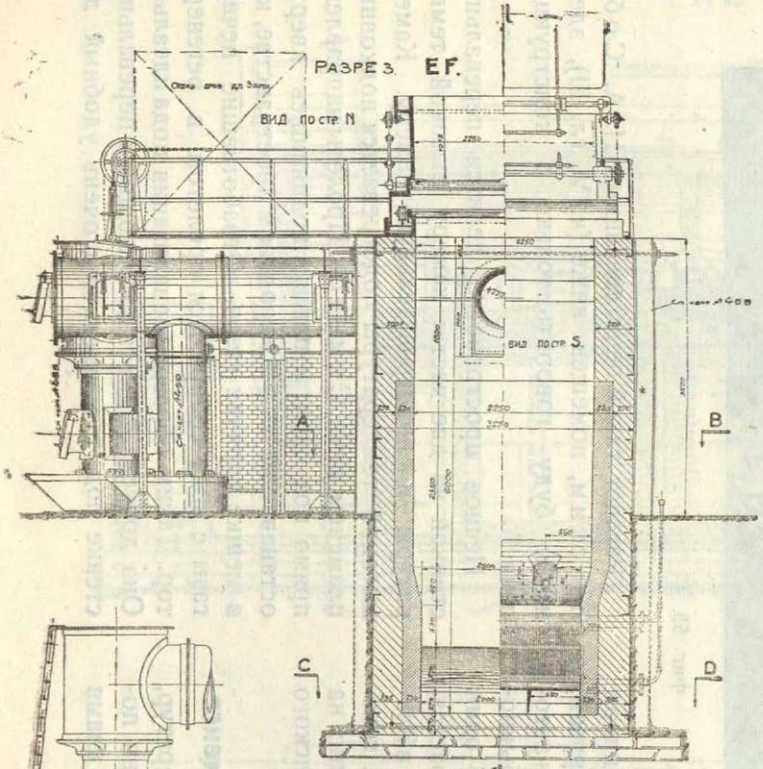
ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА БОЛВАНОК К ЛИСТОПРОКАТНОМУ СТАНУ.

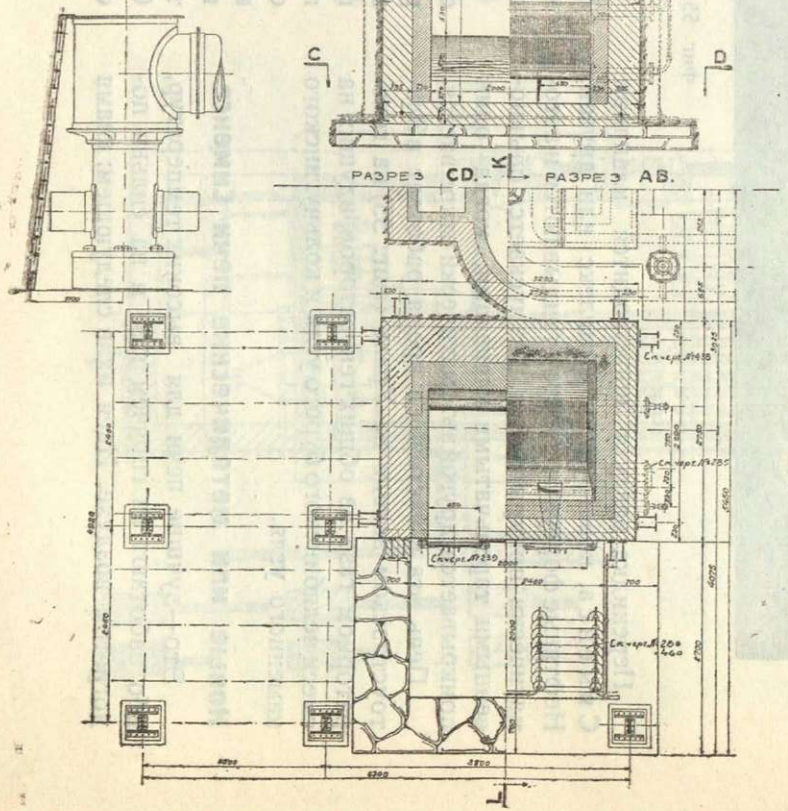


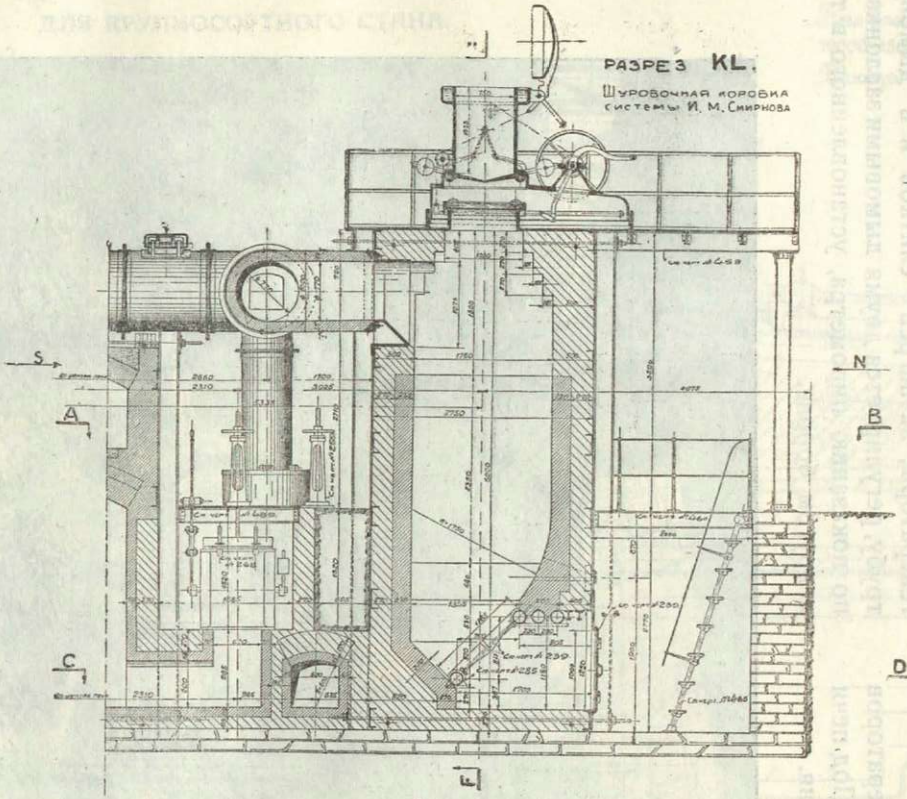
Фиг. 53.

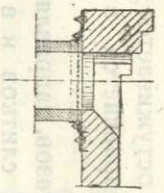
ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА БОЛВАНОК К ЛИСТОПРОКАТНОМУ СТАНУ.

ГЕНЕРАТОР ДЛЯ ДРОВ.



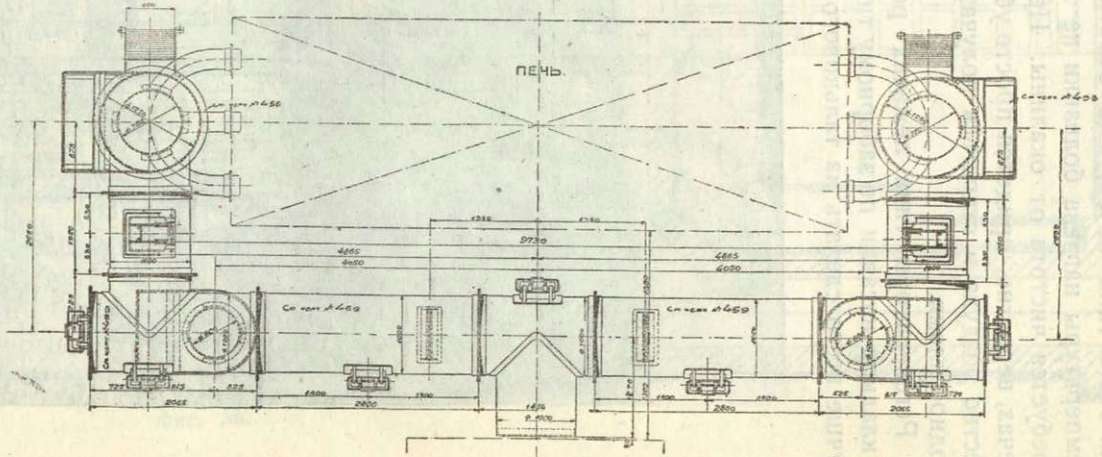






ВАРИАНТ ПРИСОЕДИНЕНИЯ ГАЗОПРОВОДА К ГЕНЕРАТ.

План устройства, подводящего газ из генератора в печь.



Фиг. 54.

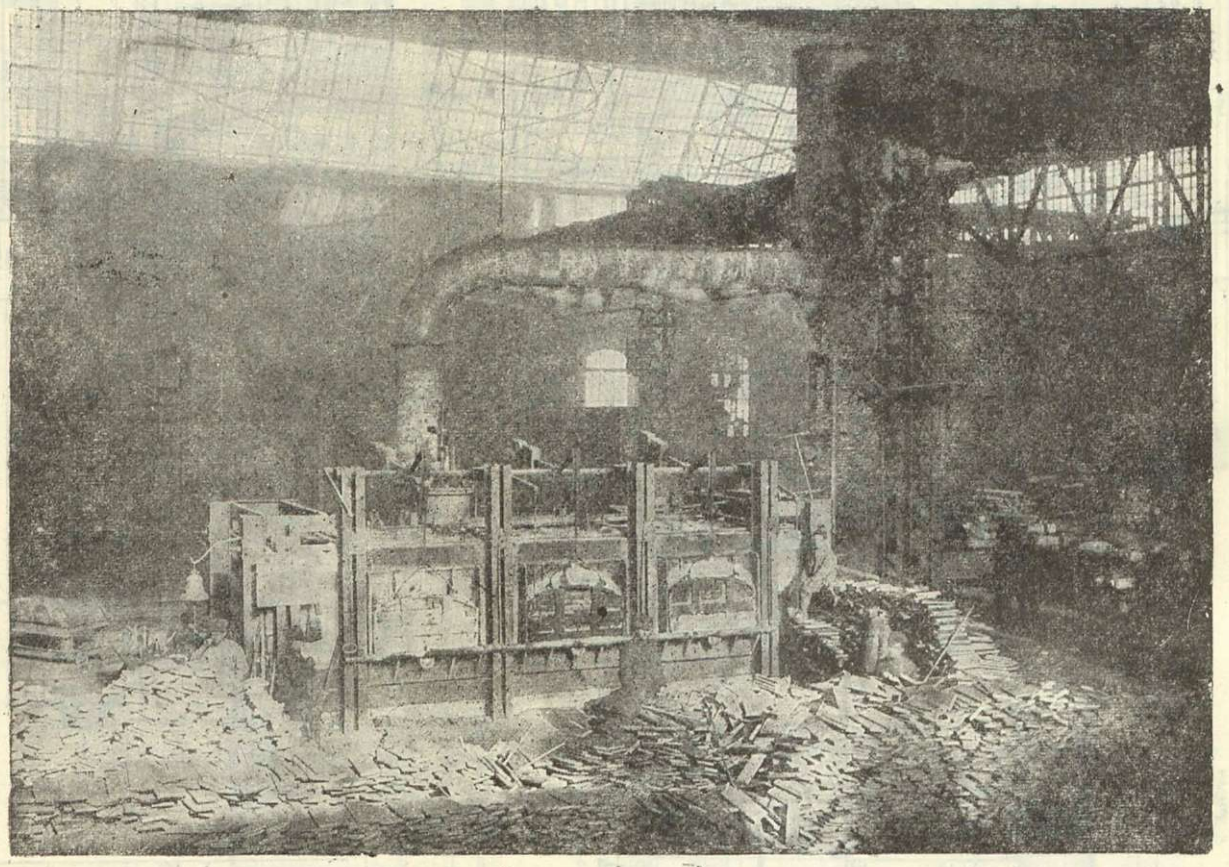
Масштаб 0 1 2 3 4 5 6

окислит поверхность болванки; болванка будет предохранена от окисления, а это существенно для этого типа печей, где особенно высокой температуры нагрева болванки не требуется, но требуется чистота от окалины. При нефтяных печах, вероятно, придется просто убавлять количество воздуха и стараться получать бескислородное пламя.

Регенераторы типа лежачих регенераторов с кладкой насадки по заборному типу. Под печи лучше всего сделать из талькового камня.

делится на две части; одна часть идет в регенераторы и подогревает их; другая часть направляется для методического нагрева холодных слитков; здесь она остуживается до 3.000° С и непосредственно направляется в дымовую трубу.

Количество печных газов, направляемых в регенераторы, на нагрев слитков и в дымовую трубу, регулируется двумя дымовыми заслонками по показанию пирометра, установленного в том и другом борове.



Фиг. 55.

Перекидка воздуха производится клапаном Сименса, конструкции Симплекс или другой. Нефтяные форсунки просто откидываются и автоматически прикрываются. Газ пускается обыкновенными тарельчатыми клапанами; когда один прикрывается, другой автоматически открывается.

Печь эта в настоящее время работает в Златоустовском заводе на Урале (фиг. 55) на генераторном газе из общих генераторов, идущих на смеси челябинского бурого угля и кольчугинского каменного угля.

Новые или методические печи Сименса

Это—лучшие печи для высоких температур, ибо работают на горячем газе и на сильно подогретом воздухе. Идея их в следующем: пламя

Рассчет такой печи, сделанный Н. А. Соболевским, помещен ниже (ч. V, гл. III), здесь же я буду говорить только о конструкции печи.

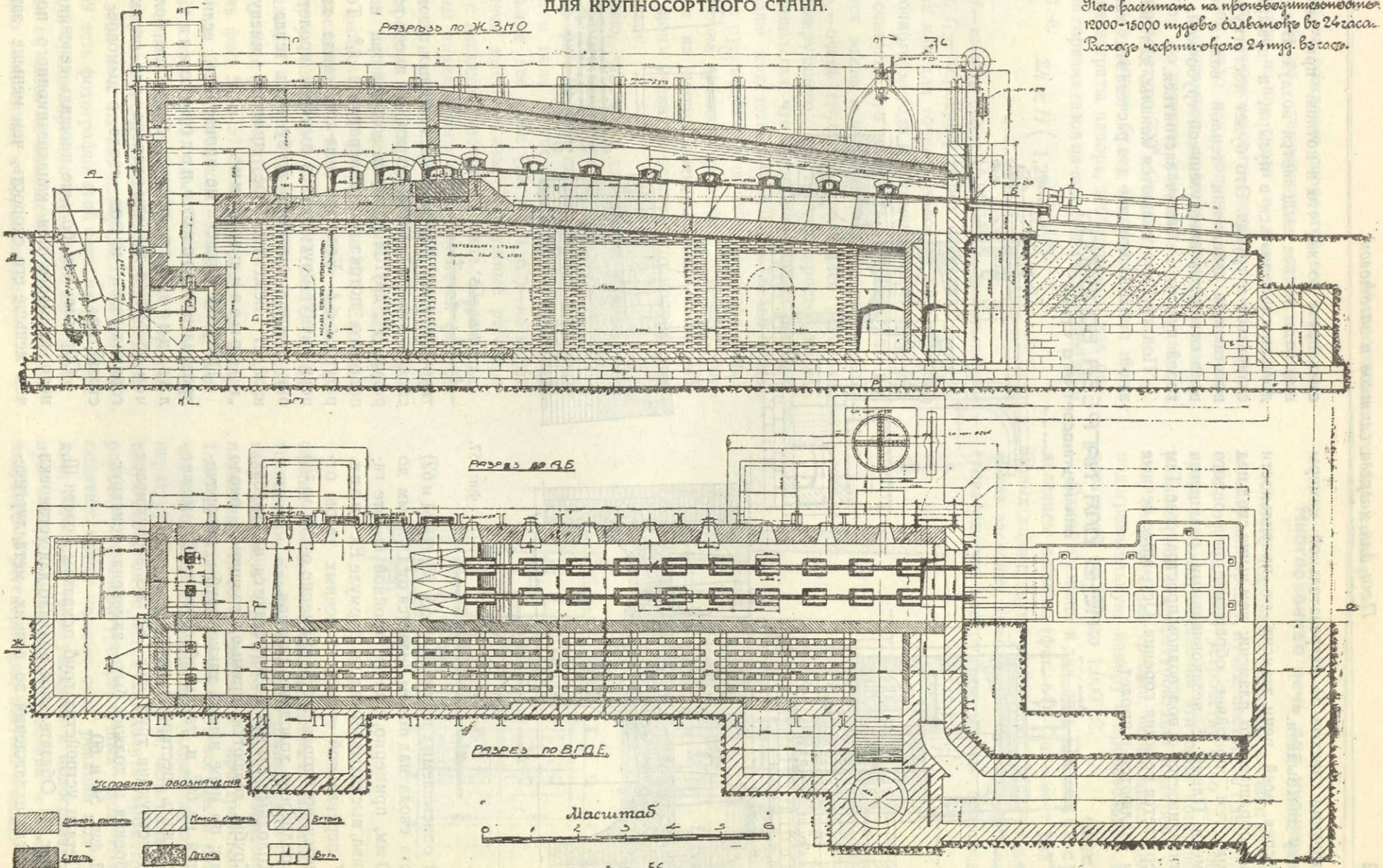
Печное пространство делится перевальной стенкой на две части: камеру высокой температуры и подогревательную камеру. Камера высокой температуры подогревается подковным пламенем печи Сименса. Пролеты направлены прямо под свод, и пламя, поднявшись кверху, останавливается в подсводовом пространстве, как в мешке горячих газов. Отработавшие печные газы с пода собираются пролетом в регенератор. Таким образом, канализация пода идеальна. Она допускает иметь восстающий к перевальной стенке под, т.-е. иметь под очень удобный для

Для нефти

ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА БОЛВАНОК

ДЛЯ КРУПНОСОРТНОГО СТАНА.

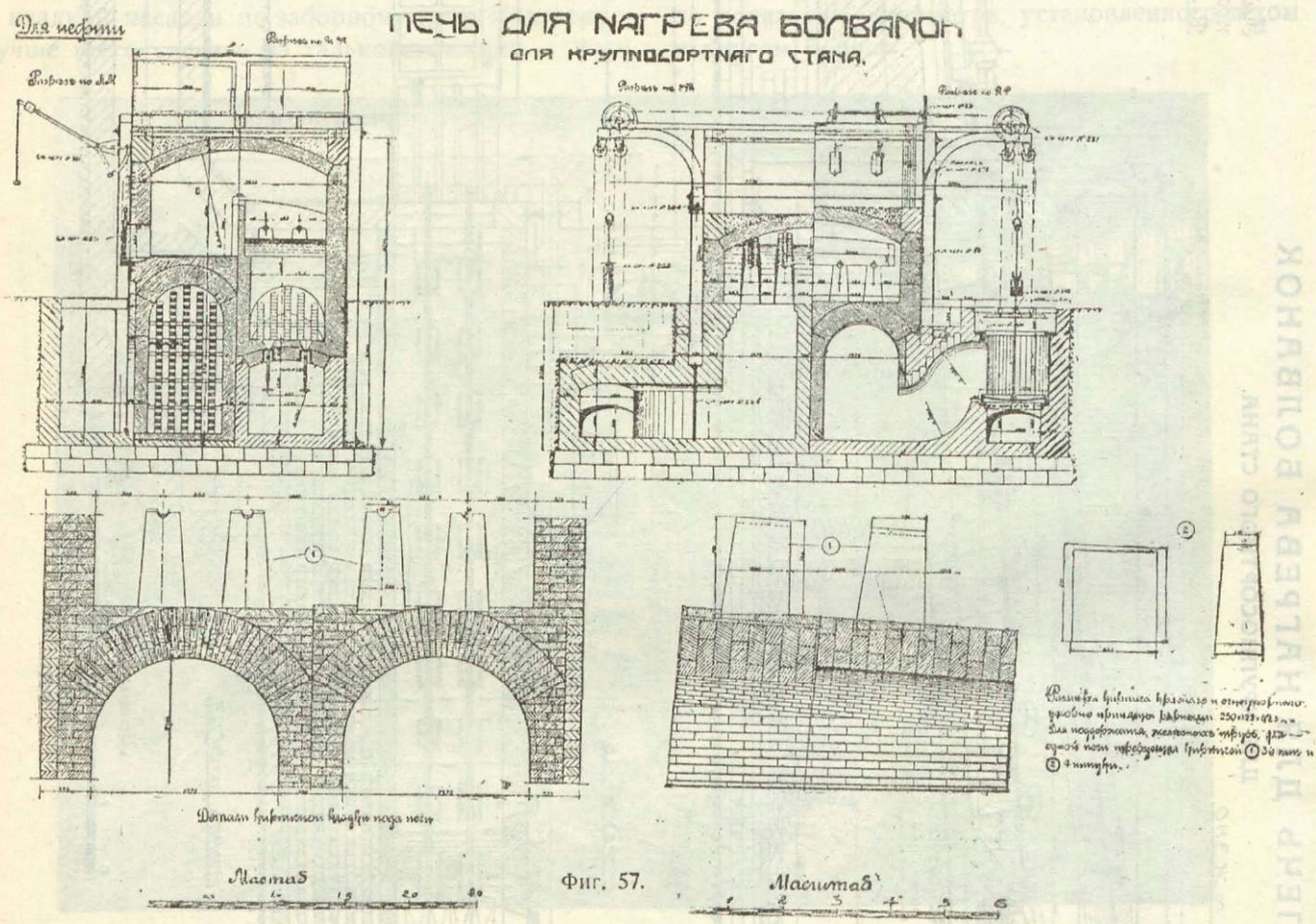
Печь рассчитана на производительность 12000-15000 пудовъ болванокъ въ 24 часа. Расходъ нефти около 24 пуд. въ часъ.



Фиг. 56.

кантования слитков от нагревательной камеры к окну для выдачи.

Успех всей печи зависит от правильности струи обращаемого пламени; чем выше свод над подом, тем спокойнее обращение подковного пламени. Пламя с незаконченными реакциями останавливается в подсводном пространстве. Там совершается реакция горения. Остывшие печные газы удаляются в пролет.



Фиг. 57.

В описываемых печах (фиг. 55, 57, 60, 61 и 62) высота свода над подом делается от 1.875 мм до 2.250 мм, примерно, равной тройной высоте газослива, высчитываемого по формуле Есьмана.

У перевальной стенки от печных газов отделяется некоторая часть (примерно от $^1/_3$ до $^2/_3$) для подогрева холодных слитков.

Холодные слитки подогреваются на трубах.

Трубы делаются прямые, толщиной около 10 мм; по мере износа такие трубы поворачиваются на 60°, и, таким образом, труба может прослужить шестерной срок.

Конструкция труб фиг. 62 не заслуживает одобрения и должна быть заменена конструкцией фиг. 56 и 60.

Детали устройства труб показаны в части III, на фиг. 41. Обязательное правило для установки труб для охлаждения во всяких металлургических печах то же, что в котлах: при нагревании воды из нее выделяется воздух. Воздух не должен скапливаться в пузыри, а пузыри застаиваться в трубах. Это будет достигнуто при восстающем движении теплой воды. Теплая вода отводится вниз узенькой трубочкой, в которой пузыри не могут застояться.

Под трубами делаются каналы для канализации пода. Основание для расчета этих каналов такое: возьмем один пузырек печных газов под сводом хвоста печи; допустим, он имеет температуру $t°$; другой пузырек возьмем при начале подового потока с температурой $t_1°$. Температура $t < t_1$. Если газы из-под свода хвоста печи начнут опускаться в дымовые пролеты, то они унесут в дымовую трубу часть тепла. Произойдет нежелательное явление, именуемое „прорывом пламени“.

Прорыва пламени не произойдет, если сопротивление донного, подового или канализационного потока будет не больше, чем требуется затраты напора для опускания горячих газов из-под свода в дымовое пространство.

Обратно: чем больше площадь сечения донного, подового или канализационного потока, чем меньше его скорость, чем меньше затрата

напора на рождение скоростей его струй, тем ниже будет температура струй, прорывающихся из-под свода в дымовые пролеты.

Итак, проектировать потоки, канализирующие под надо так: допустим, что все печные газы, нагревающие подогревательную камеру, следуют по сечению канализационного потока при температуре 300°. Скорость их будет—V_{300}. Потеря в напоре будет Σh; она должна быть меньше затраты напора, необходимого для опускания горячих газов из-под свода в дымовой пролет, т.-е. $\Sigma h \leqslant H\left(1{,}29 - \frac{1{,}30}{1 + \frac{t_1}{273}}\right)$,

где H—высота свода над устоем дымовых пролетов; t_1 — температура под сводом.

Так как для точного подсчета Σh у нас пока нет точного метода и рекомендуемый мною метод—считать, что скорость каждый раз рождается вновь и на рождение ее расходуется напор,—очень груб, то я задавался размерами канализирующего под потока просто наглаз. Я предполагал, что когда печи будут работать, я сделаю подсчеты работающих печей и дам нужное руководство для их проектирования.

Условие времени отложили решение этого вопроса на неопределенное время, и я предлагаю моим ученикам решить этот вопрос самостоятельно.

Делаю, что могу: даю метод размышлений и программу исследований.

Печь фиг. 60 и 61 сконструирована на генераторном газе, лучше горячем, чем холодном. Остальные две печи (56, 57 и 62)—на нефти. Все печи имеют только воздушные регенераторы с насадкой заборного типа. Перекидные клапаны тарельчатого типа для печей фиг. 56, 57, 60 и 61 и клапан Симплекс для печи фиг. 62.

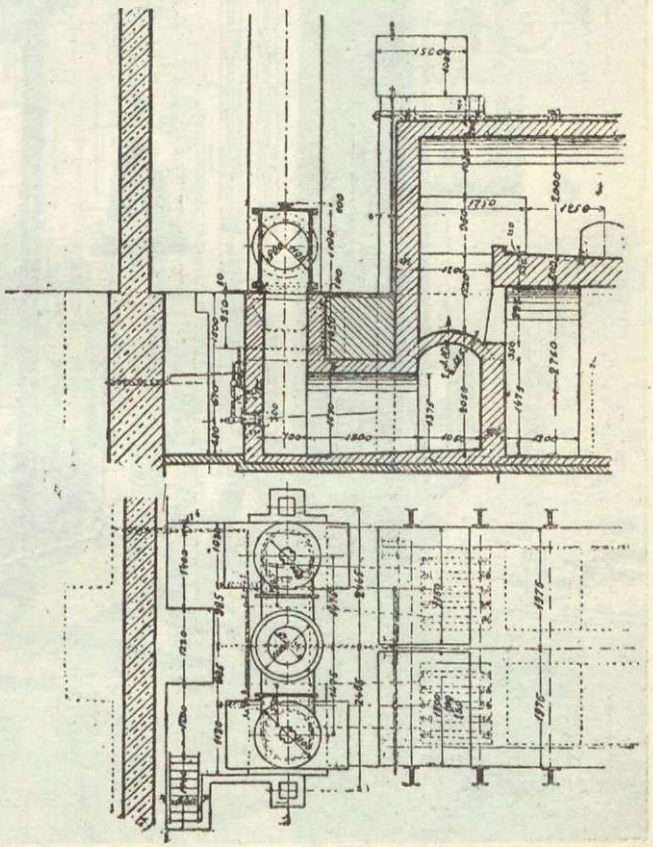
Скорость в каналах от регенераторов к перекидным клапанам должна быть больше скорости, вычисляемой по формуле И. Г. Есьмана для газосливов, ибо если она будет меньше, то на поду регенераторов останется мешок холодных газов, и под регенератора не примет участия в работе регенератора.

Печь фиг. 56 и 57 была построена во время войны на Златоустовском заводе и пущена только осенью 1923 года. Несмотря на плохой генераторный газ челябинского бурого угля, она дала замечательно ровный нагрев слитков. Переделка этой печи на газ изображена на фиг. 58. Фиг. 59 есть фотография этой печи; на фиг. 63—печь для среднесортного стана того же завода, чертежи ее здесь не помещены, так как они совершенно аналогичны с помещенными

Многооконная печь для кузниц.

Вместо отдельных горновых печей к каждому молоту или прессу, лучше поставить одну общую печь, дав каждому устройству окно для подогрева металла, обеспечив эти окна совершенно равномерной температурой. Для подогрева слитков, во избежание трещин, необходимо сделать подогревательную камеру с произвольной температурой от 400 до 1.000° С.

Одной кузнице я дал печь Сименса с разделением пламени (фиг. 64). Она имеет два дымовых хода с двумя заслонками. Запирая и поднимая заслонку, отводящую часть газов в подогревательную камеру, мы можем подогревать



Фиг. 58

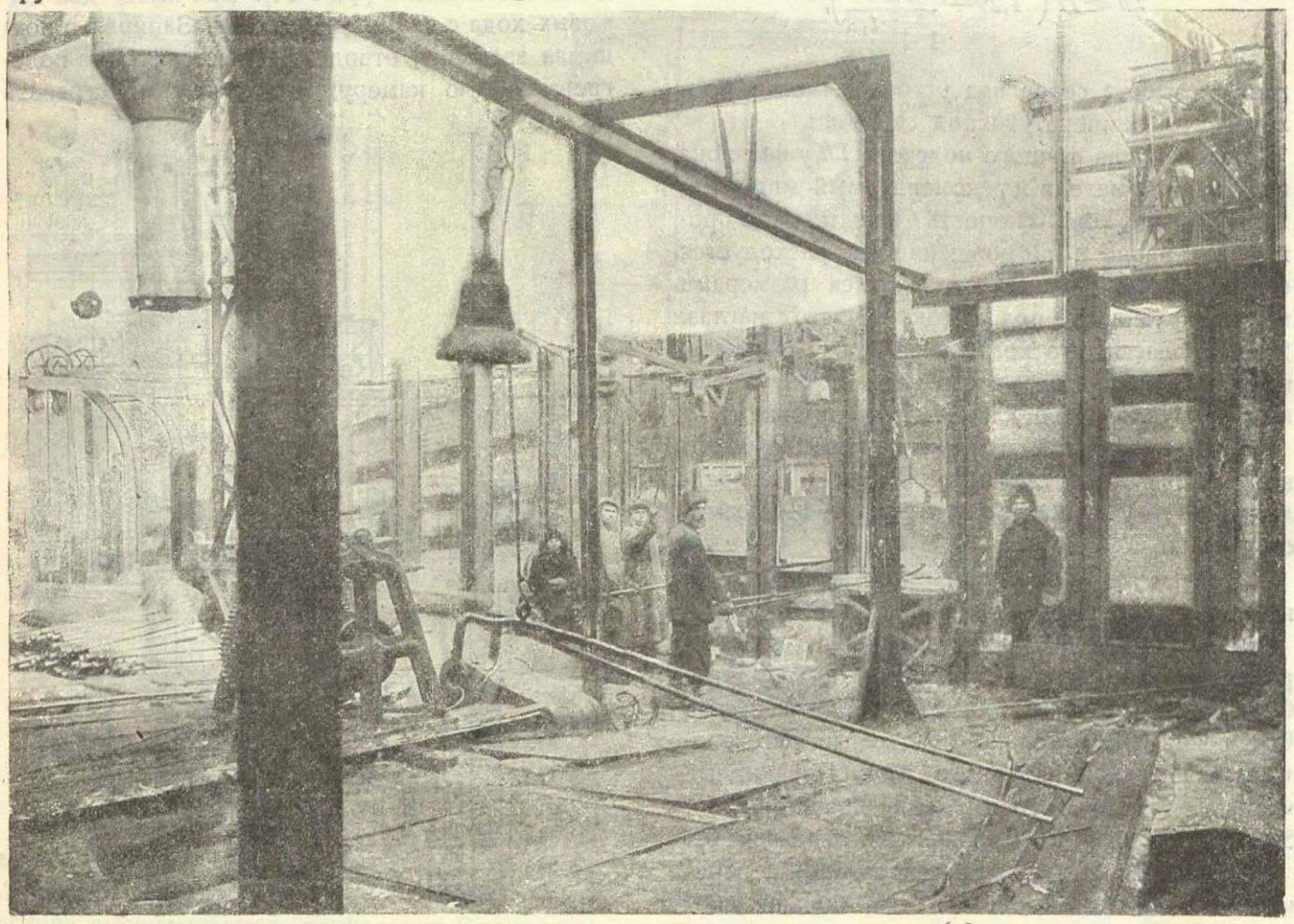
слитки очень осторожно, избегая разрыва их трещинами. Камера высокой температуры работает как печь Сименса с подковообразным пламенем. Высота рабочего пространства — 1.250 мм —настолько велика, что все шесть рабочих окон имеют совершенно одинаковую температуру. По словам инженеров, испытывавших такую печь, они не могли определить пирометром разницу в температуре различных окон. И это понятно: пламя кончает свои реакции под сводом; остывшие газы уводятся в подогревательную камеру при помощи газослива и пролета, ведущего в регенераторы, взятого с пода.

Результатом этого являются одинаковая температура во всем рабочем пространстве и прекрасная канализация пода.

Рекуперативная печь для нагрева слитков для среднесортного стана.

Печь Алапаевского завода работала неудовлетворительно. Мне было поручено ее исправить, сохранив по возможности ее арматуру.

Старая печь была очень большой длины—24 м. Если даже сделать нагрев слитков на трубах и под ними сделать канализирующий



Фиг. 59

под канал, то и тогда остуженные печные газы придется тащить в дымовую трубу целых 16 метров. Очевидно, сопротивление такого длинного канализирующего канала может оказаться столь большим, что произойдет прорыв горячих газов из-под свода, и вся эта громадная длина печи будет совершенно бесполезной.

Кроме того, почвенные воды в Алапаевске не допускали углубления фундамента печи для того, чтобы поместить рекуператор обычного типа. Эти трудности были обойдены мной, когда я соединил канализационный подовой поток с дымовыми камерами печи непосредственно через вертикальные, чугунные, рекуперативные трубы. Таким образом, получилась интересная и простая конструкция (фиг. 65).

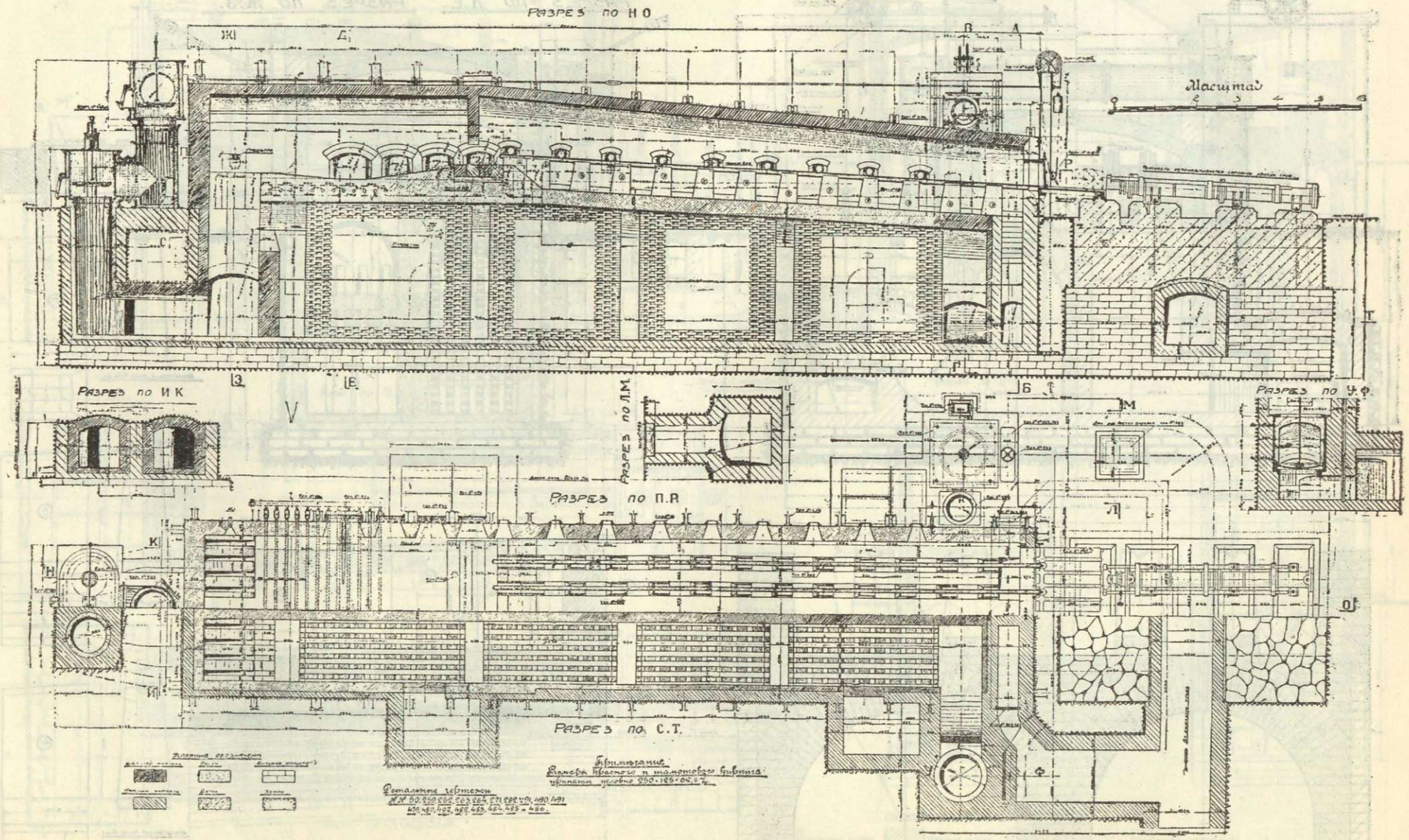
В чугунные трубы в начале нагревательной камеры поступают газы более высокой температуры; в чугунные трубы хвоста печи поступают печные газы более низкой температуры. Совершенно очевидно, что циркуляция в трубах, в начале и в конце нагревательной камеры, будет различной интенсивности. Печные газы в начале подогревательной камеры будут двигаться крайне медленно и энергично в конце печи.

Так как печь должна была работать на генераторном газе, то подогретый воздух приходилось направлять между труб рекуператора от хвоста печи к ее голове.

При большой длине печи была опасность, что естественного напора горячего воздуха нехватит и придется дать дутье.

Я вообще не люблю усложнять своих печей установкою воздуходувных устройств и стараюсь обходиться без них. В данном случае я уменьшил сопротивление поступающего в печь холодного воздуха, сделав у каждой чугунной трубы рекуператора отверстие для холодного воздуха.

ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА БОЛВАНОК К СРЕДНЕСОРТНОМУ СТАНУ.

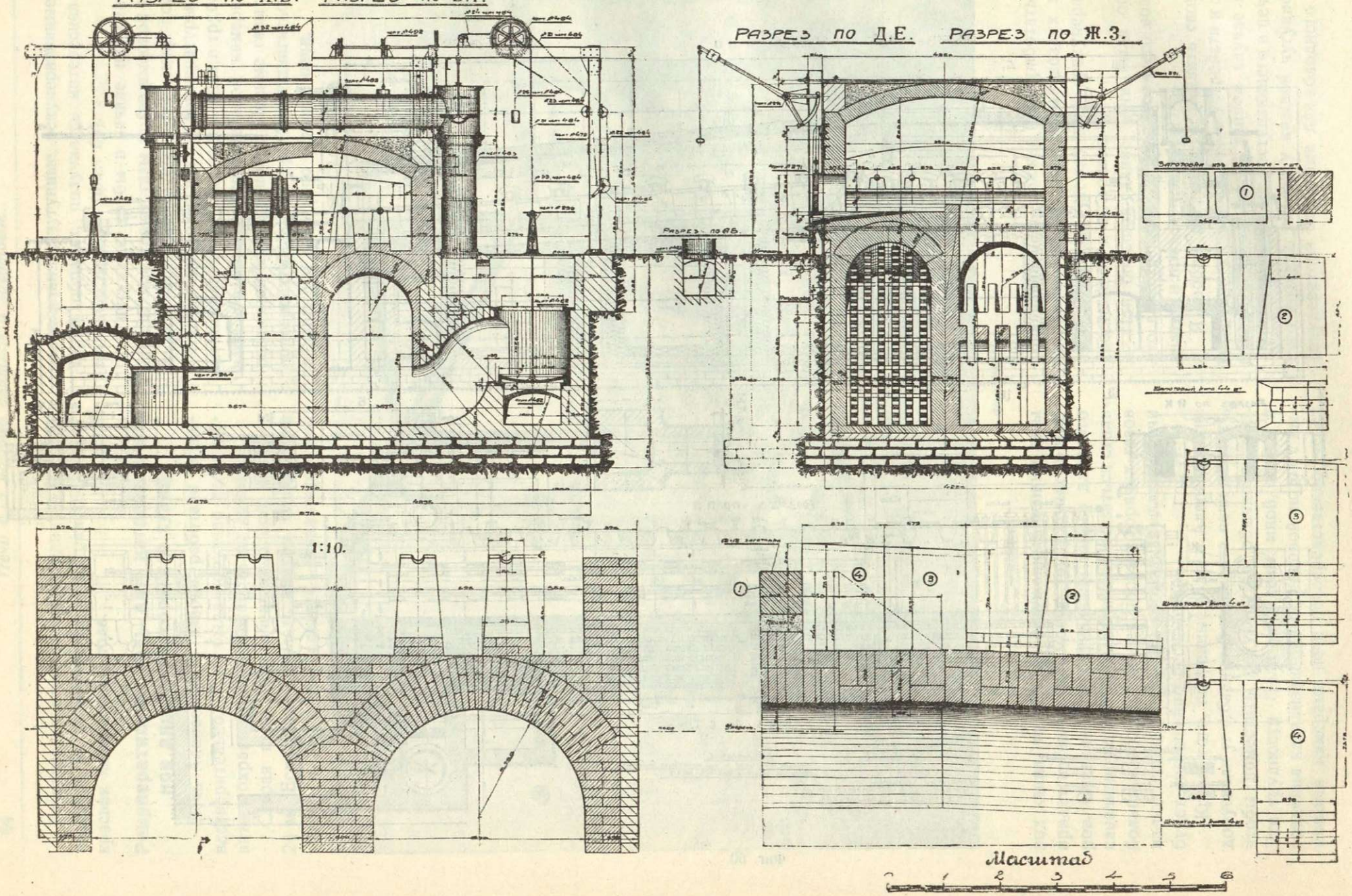


Фиг. 60.

Для газа.

ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА БОЛВАНОК.

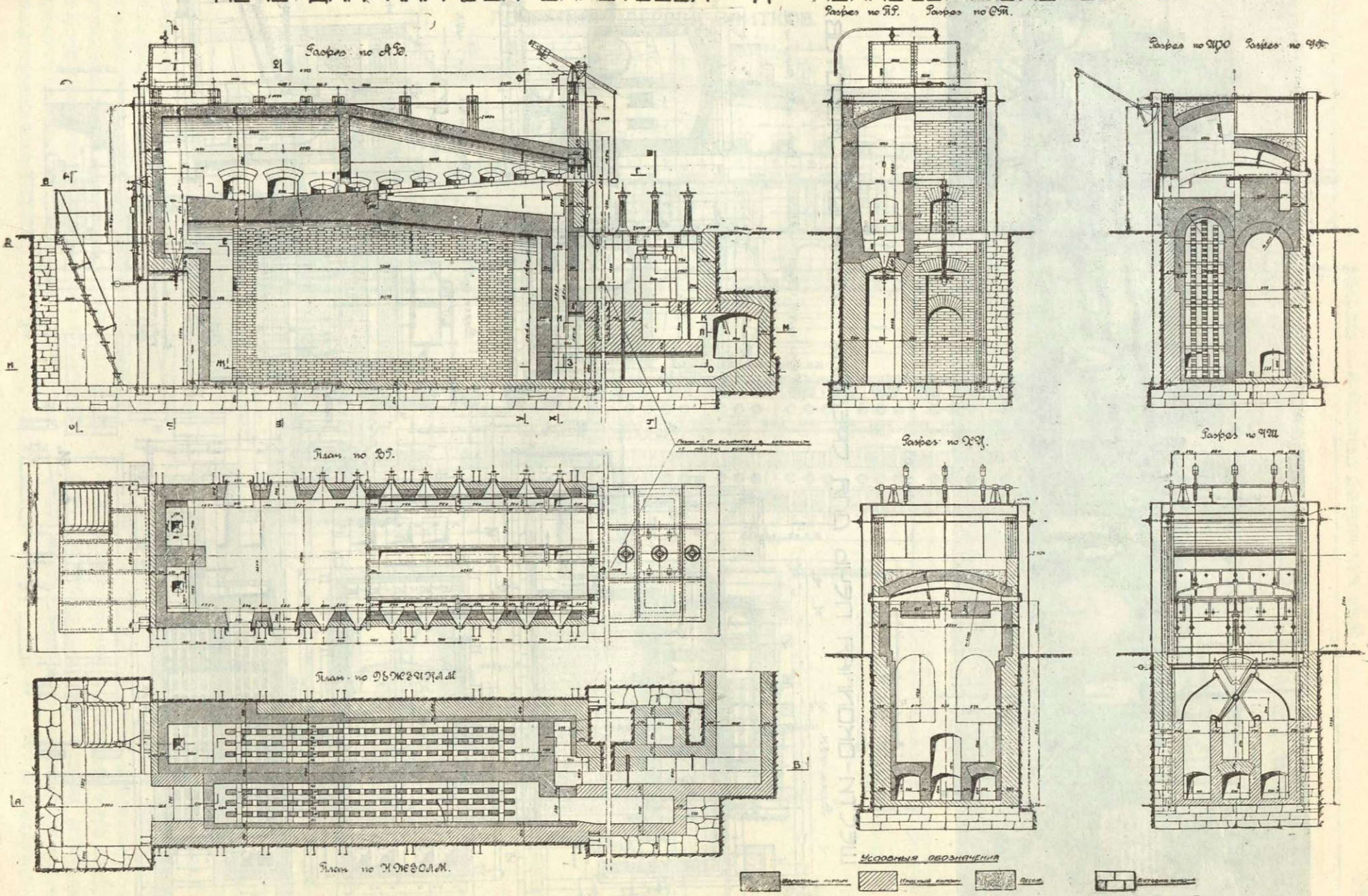
к среднесортному стану.



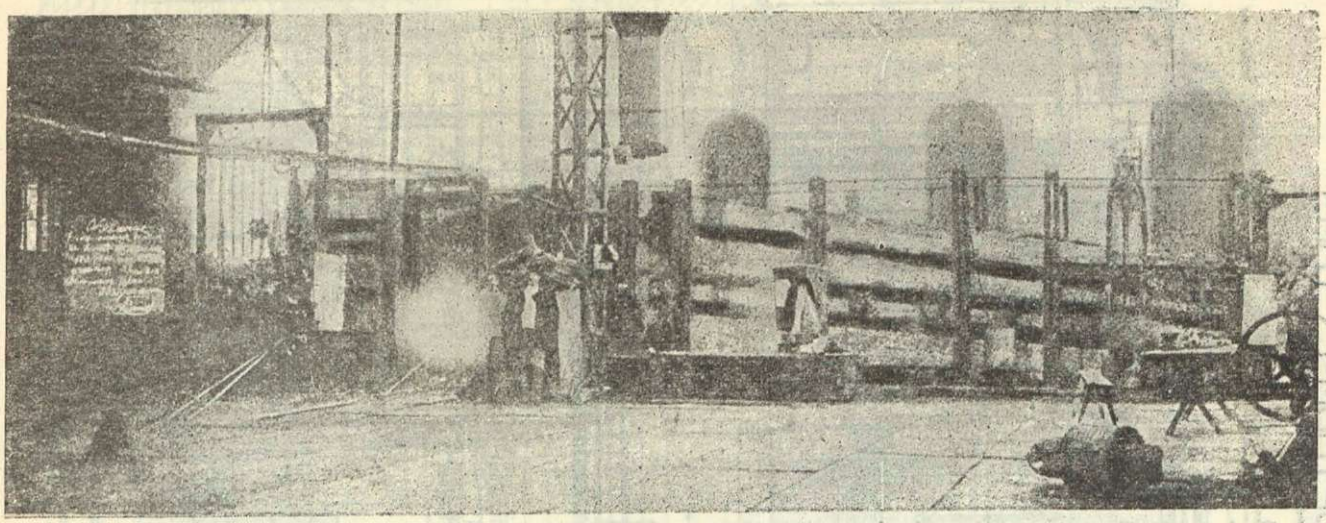
Фиг. 61.

Для мастер.

ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА ЗАГОТОВОК К МЕЛКОСОРТНОМУ СТАНУ.

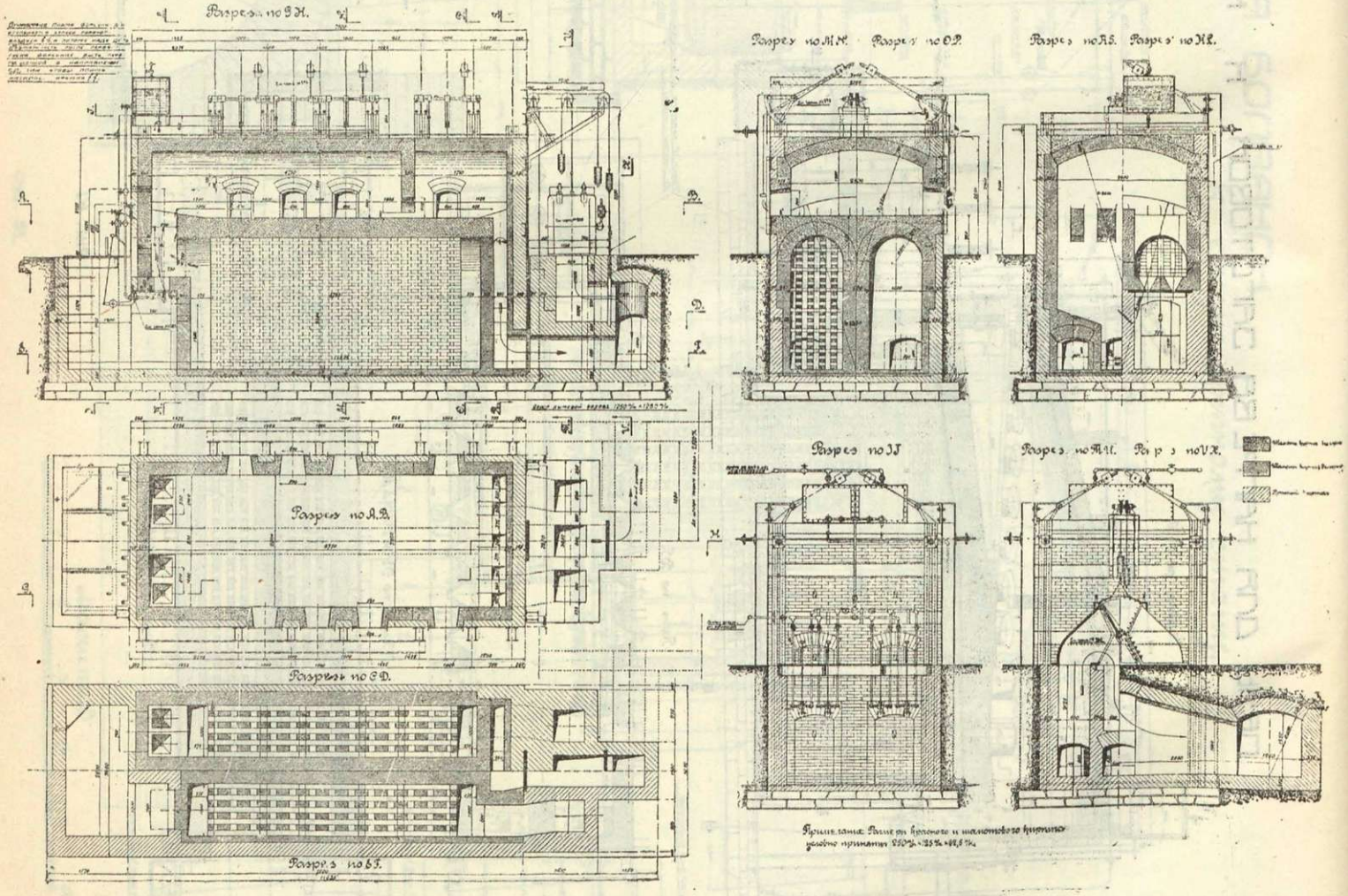


Фиг. 62



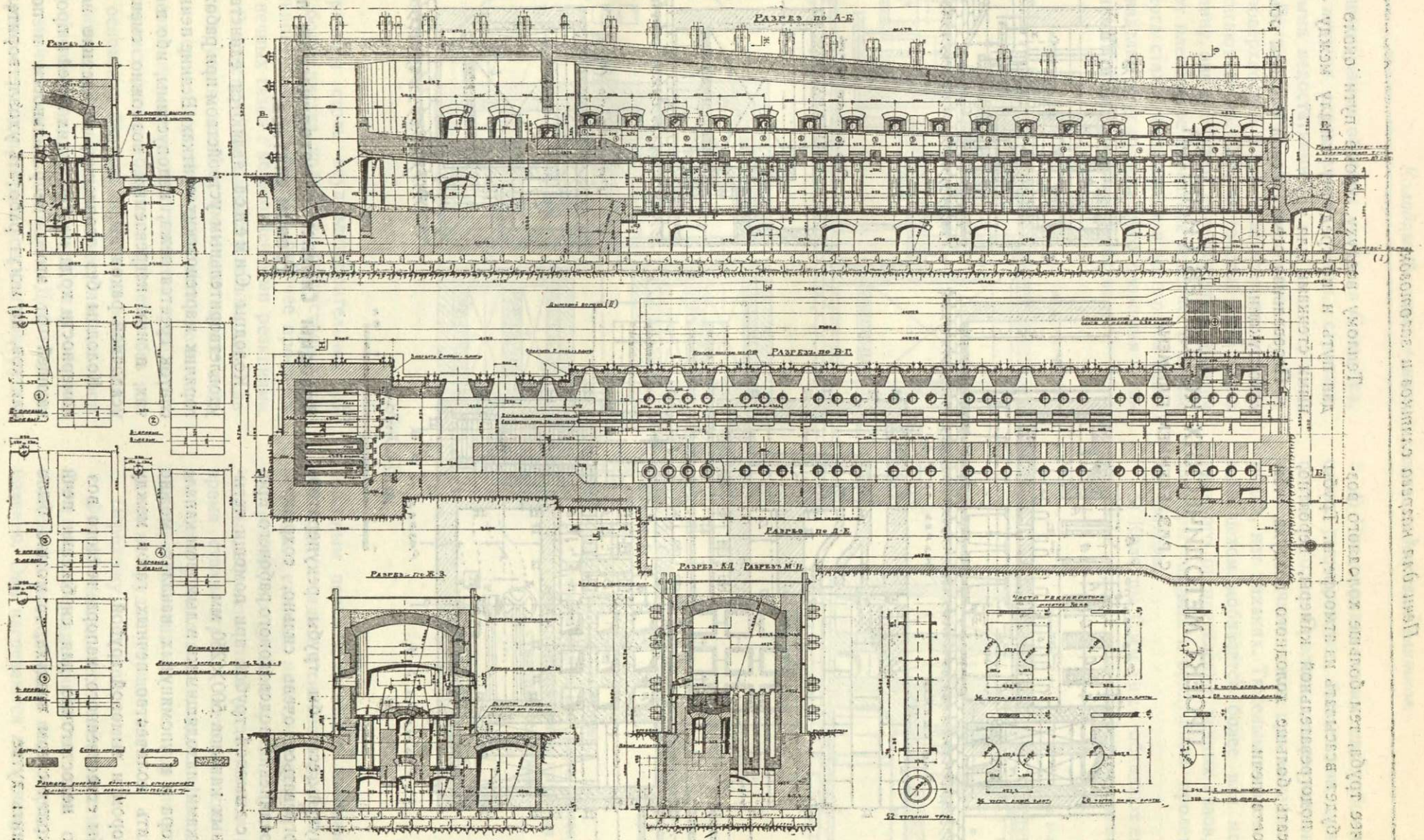
Фиг 63

ШЕСТИ-ОКОННАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ СРЕДНИХ И МАЛЫХ МОЛОТОВ



Фиг. 64.

ПЕЧЬ ДЛЯ НАГРЕВА СЛИТКОВ.



Фиг. 65.

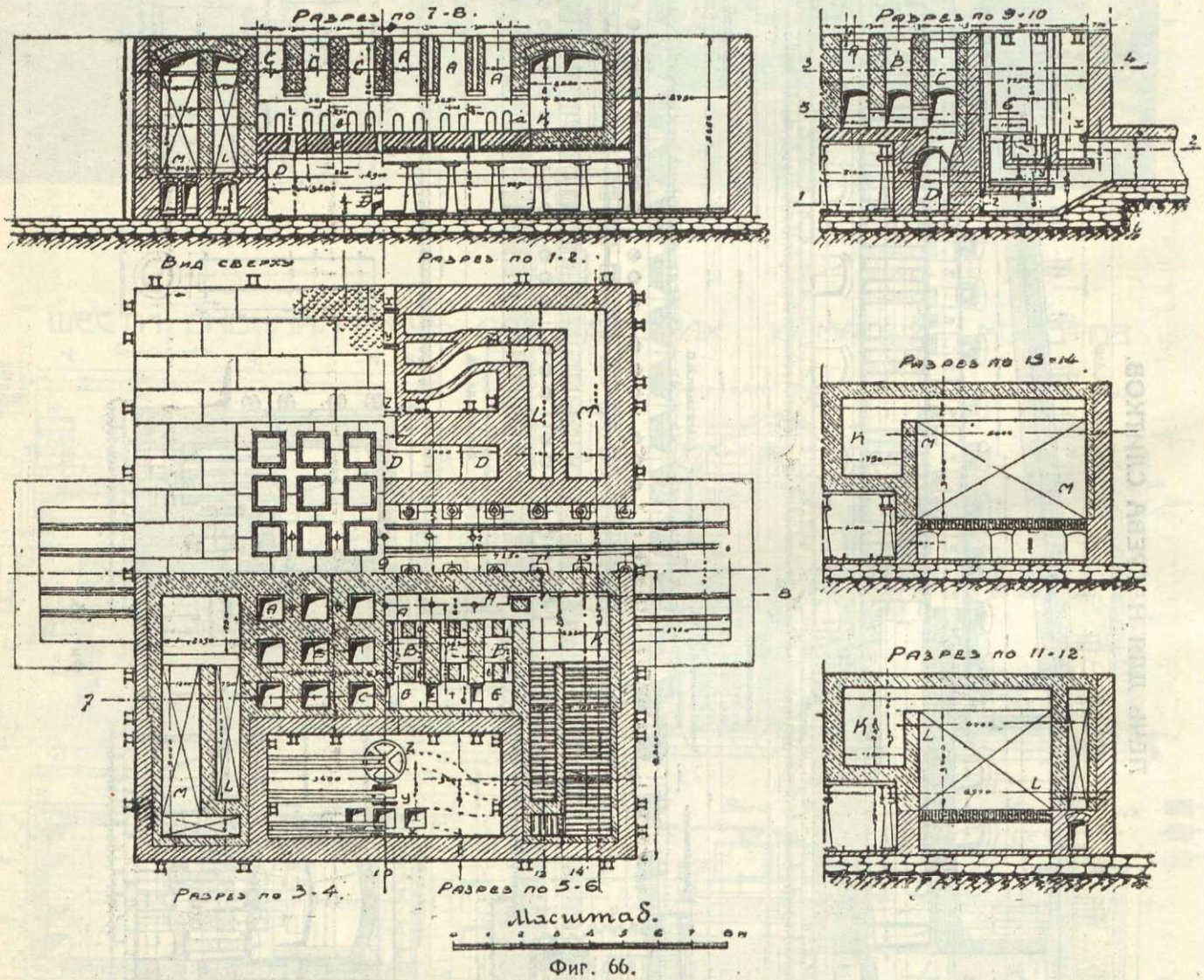
Чем горячее труба, тем больше холодного воздуха она будет всасывать из атмосферы. Трубы в начале подогревательной камеры, вероятно, будут сосать больше холодного воздуха, чем трубы хвоста печи.

Теплому воздуху, кроме пути около труб, дан путь и по среднему каналу между опорными стенками для труб.

Перевальная стенка и свод сделаны обычной конструкции.

ПРОЕКТ МЕТОДИЧЕСКИХ КОЛОДЦЕВ СИМЕНСА

С РАЗДЕЛЕНИЕМ ПЛАМЕНИ



Фиг. 66.

На случай, если бы трубы рекуператора стали прогреваться очень сильно, сохранены прямые соединения подсводового рабочего пространства с дымовой трубой при помощи четырех дымовых каналов 500×250 мм.

Заслонками, находящимися в дымовом канале рекуператора и в упомянутых каналах, можно распределить количество печных газов между рекуператором и дымовой трубой.

Если бы естественного напора теплого воздуха было недостаточно для снабжения печи нужным количеством воздуха, то можно было бы применить дутье.

Колодцы Сименса с методическим подогревом слитков.

Колодцы Сименса являются единственно удовлетворительным устройством при работе на горячих мартеновских слитках. Всякие печи, где слиток греется лежа, недопустимы, ибо в слитках, в них нагреваемых, возможно смещение усадочной раковины.

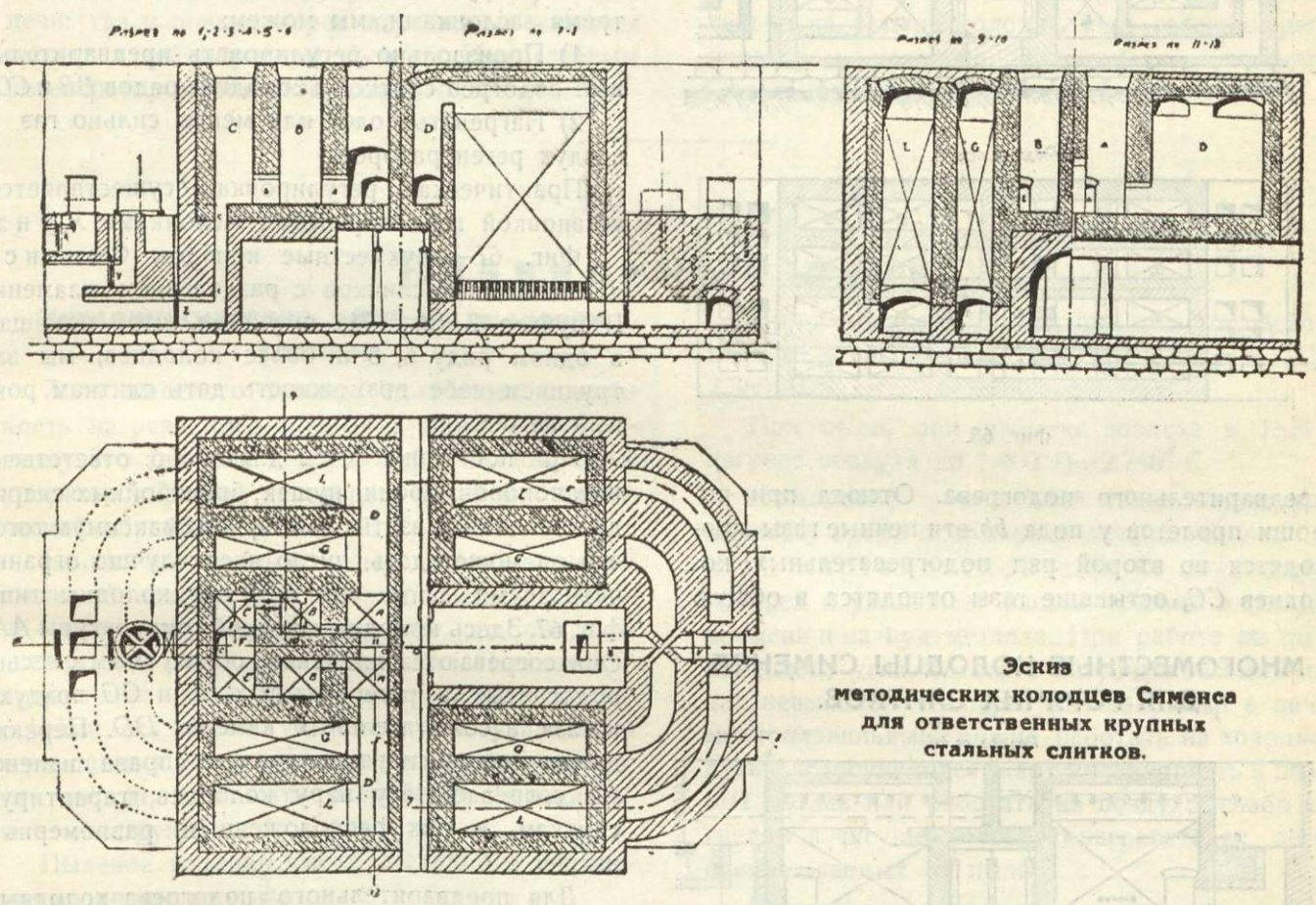
Колодцы без отопления, вследствие неравномерности хода мартеновских печей и проистекающей от этого неправильности в подаче слитков, не могут работать удовлетворительно.

Существующие образцы колодцев Сименса, даже лучших строительных фирм, страдают крупными недостатками:

1) Печи эти жгут слитки, сильно окисляют их с поверхностей, а при малейшем недосмотре пережигают сталь. Сжигая толстый слой стали в окалину, они обнажают поверхностные пузыри и дают плеховатое прокатное изделие. В случае пережога сталь рассыпается, а перегретая сталь дает изделия крупнозернистого сложения с пониженными механическими свойствами.

4) Число рядов колодцев, работающих от одних регенераторов, бывает два, три, четыре, шесть и более. Средств для регулирования количеством печных газов, протекающих по этим рядам, нет никаких. Тяжелым опытом заведующий цехом добивается более или менее правильного распределения печных газов, изменяя размеры газовых и воздушных пролетов в регенераторы.

5) Колодцы Сименса обладают еще одним крупным недостатком, свойственным всем обык-



Эскиз методических колодцев Сименса для ответственных крупных стальных слитков.

Фиг. 67.

Причины столь неудовлетворительной работы большинства колодцев—отсутствие сожигательной камеры и впуск в рабочее пространство печных газов с незаконченными реакциями.

2) В конструкции колодцев весьма часто делается крупная ошибка, имеющая своим следствием неравномерный нагрев слитка по высоте. А именно: низ слитка прогревается хуже верха. Это происходит потому, что пролеты без всякого основания берутся выше пода колодцев и низ слитков оказывается в мешке холодных газов.

3) Число колодцев в одном ряду обыкновенно значительно: 6, 8 и более. Добиться при этом равномерного прогрева всех слитков трудно.

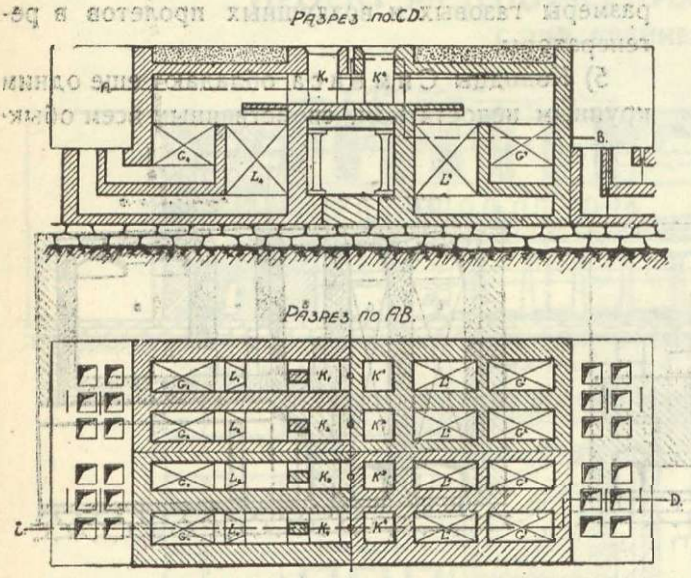
новенным печам Сименса: холодный слиток приходится садить в сильно нагретую печь. При рельсовых слитках последние весьма часто дают внутренние, поперечные трещины (скворечники). Чтобы избежать этого недостатка в последнее время стали строить методические печи Сименса с разделением пламени. Колодцев с разделением пламени до сих пор не появлялось, но их не трудно осуществить.

Перехожу к их описанию.

Фиг. 66—методические многоместные колодцы Сименса с разделением пламени. Шесть колодцев *AA* расположены в один ряд, как обыкновенно. Они нагреваются пламенем, предвари-

тельно прошедшим сожигательную камеру *KK*. Пролеты расположены на уровне пода. У пода каждой ячейки взяты пролеты *aa*, отводящие части пламени в соседний ряд колодцев *BB* для

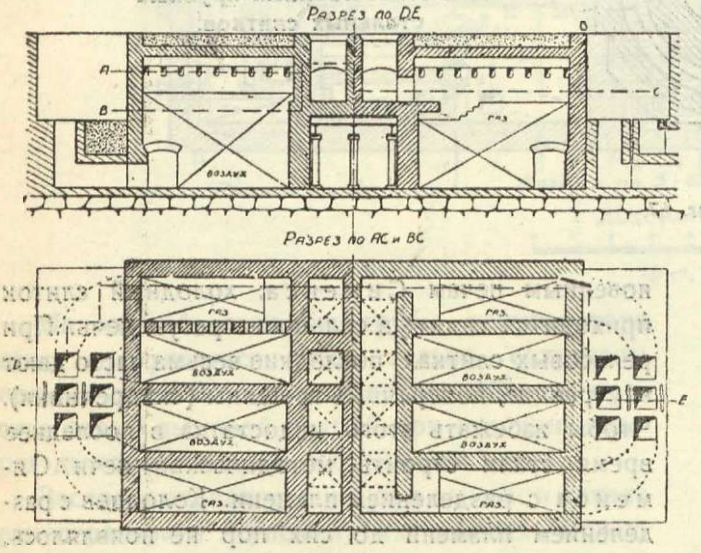
ДВУХМЕСТНЫЕ КОЛОДЦЫ СИМЕНСА ДЛЯ ГОРЯЧИХ СЛИТКОВ.



Фиг. 68.

предварительного подогрева. Отсюда при помощи пролетов у пода *bb* эти печные газы проводятся во второй ряд подогревательных колодцев *CC*, остывшие газы отводятся в общую

МНОГОМЕСТНЫЕ КОЛОДЦЫ СИМЕНСА ДЛЯ ГОРЯЧИХ СЛИТКОВ.



Фиг. 69.

дымовую камеру *DD* и через заслонку *z* в общий дымовой пролет. Таким образом, осуществлено пожелание 5-е, и колодцы сделаны с методическим подогревом.

Слитки садятся в колодцы *CC*, где подогреваются до 300°, отсюда пересаживаются в колодцы *BB*, где подогреваются до 700—800°, а из них в колодцы *AA*, где подогреваются до 1.200—1.300° С.

Печные газы делятся на три ветви:

а) через воздушные регенераторы *M*; заслонка *x*;

б) через газовые регенераторы *L*; заслонка *y*;

в) через колодцы для подогрева *BB* и *CC*; заслонка *z*.

Регулируя количество печных газов этими тремя заслонками, мы можем:

1) Произвольно регулировать предварительный подогрев слитков в колодцах рядов *BB* и *CC*.

2) Нагревать более или менее сильно газ и воздух регенераторов.

Практическая регулировка осуществляется установкой термопар перед заслонками *x*, *y* и *z*.

Фиг. 67—двухместные колодцы Сименса для стальных слитков с разделением пламени. В пункте 3 (стр. 71) я указал, что, помещая в одном ряду 6, 8 и более колодцев, мы затрудняем себе возможность дать слиткам ровный нагрев.

При постройке печей для особо ответственных поковок, брони, пушек, бронебойных снарядов, когда надо взять от материала максимум того, что он может дать, число ячеек лучше ограничить двумя. Тогда мы получим колодцы типа фиг. 67. Здесь колодцы высокой температуры *AA*. Они согреваются пламенем, образуемым смесью подогретых в регенераторах *LL* и *GG* воздуха и газа, в сожигательных камерах *DD*. Перекидывая пламя слева направо и справа налево, мы согреваем эту пару колодцев, гарантируя слиткам, в них расположенным, равномерный нагрев.

Для предварительного подогрева холодных слитков у пода колодцев сделаны пролеты *aa*, которые отводят часть печных газов из колодцев *AA* в подогревательные колодцы *BB*; из этих колодцев, через пролеты у дна *bb*, печные газы входят в колодцы *CC*, а при помощи расположенного у пода пролета *c*, оставшие печные газы направляются в дымовой пролет, проходя заслонку. В остальных своих частях эти колодцы представляют обычное расположение.

Двухместные колодцы Сименса для горячих слитков (фиг. 68). Эти колодцы не имеют подогревательных ячеек и представляют нормальную печь Сименса для двух колодцев. Чтобы сделать расположение этих колодцев компактным и дешевым, печи Сименса соединены попарно. Клапаны перекидываются одно-

временно у двух печей, и две печи участвуют в общем круговом процессе.

К первой печи принадлежат колодцы K_1 и K^1
Ко второй „ „ „ K_2 и K^2
К третьей „ „ „ K_3 и K^3
К четвертой „ „ „ K_4 и K^4

Работают вместе две печи. Газ и воздух, подогретые в генераторах G^1 и L^1, дают пламя, которое, обогрев слитки в K^1 и K_1, проходит в регенераторы G_1 и L_1 и через перекидные клапаны в дымовую трубу. Так же и во второй печи: газ и воздух через перекидные клапаны входят в регенераторы L_2 и G_2. Над газовым регенератором они загораются; пламя идет через колодцы от K_2 к K^2 (в направлении обратном K_1 и K^1), входят в регенераторы L^2 и G^2 и через перекидные клапаны в дымовую трубу. При перекидке клапанов газы текут в обратном направлении.

Совмещение и одновременная работа двух пар колодцев, следовательно, двух печей Сименса, дает конструкции компактность и конструктивное изящество.

На фиг. 69 изображены многоместные колодцы для горячих слитков. Тут две печи поставлены смежно, но каждая работает самостоятельно на четыре колодца. Над газовым регенератором устроена сожигательная камера. Остальное понятно из чертежа.

ГЛАВА IV.

Плавильные печи.

Металлургические печи на пылевом топливе.

Зола пылевого топлива покрывает поверхность нагреваемого предмета слоем пыли; поэтому это топливо неудобно для обжига огнеупорного кирпича, некоторых печей для термической обработки и т. д.

Ванна плавильных печей покрыта слоем шлака. А потому, если зола пылевого топлива не содержит вредных примесей, то она безвредна для плавильного процесса. Неудобство применения пылевого топлива заключается в засорении его золою устройств для утилизации теряющегося жара, особенно регенераторов, против чего должны быть разработаны специальные конструкции.

Пылевое топливо имеет следующие неоспоримые преимущества:

1. Так как уголь высушен, то количество паров воды в продуктах горения не велико, и объем и вес их меньше, чем при обыкновенном топливе.

2. Избыток воздуха, нужный для полного сжигания пыли, достаточен в количестве 10—20%.

3. Поэтому вычисленная температура горения на пылевом топливе выше температуры горения на обыкновенном топливе.

4. При работе на подогретом дутье нагревается не только вторичный, но и первичный воздух, что еще более повышает температуру горения пыли.

Для сравнения могут служить такие цифры: горение хорошего кускового угля при избытке воздуха в 50% дает теоретическую температуру горения 1.658° С.

При генераторном газе, при том же расходе воздуха и нагреве газа и воздуха до 1.100° С—2.360° С.

При пыли, при избытке воздуха в 15% и нагреве воздуха до 1.000° [1])—2.740° С.

Повышение вычисленной температуры увеличивает время пребывания печных газов в полости мартеновской печи от двух секунд до трех и уменьшает расход топлива в единицу времени и на пуд металла. При работе на пыли каменного угля, богатого летучими газами, в печах невысокой температуры, например в печах медноплавильных, можно работать на холодном дутье, а теряющийся жар утилизировать в паровых котлах или работать на воздухе, слабо нагретом в чугунных воздухонагревателях, легко освобождаемых от пыли.

Печи Мартена должны работать обязательно на сильно подогретом в генераторах воздухе. То же касается и печей большой производительности для проплавки медных руд.

Здесь я опишу эскизные проекты трех типов плавильных печей:

1. Проект перестройки на пыль опытной печи Калатинского завода для переплавки легких медных руд и пыли из пылевых камер (фиг. 70) на холодном воздухе или воздухе, подогретом в чугунных воздухонагревателях.

2. Проект медноплавильной печи Сименса большой производительности (фиг. 71).

---

[1]) Несколько ниже, чем в обыкновенной печи Мартена, ибо часть дутья холодная.

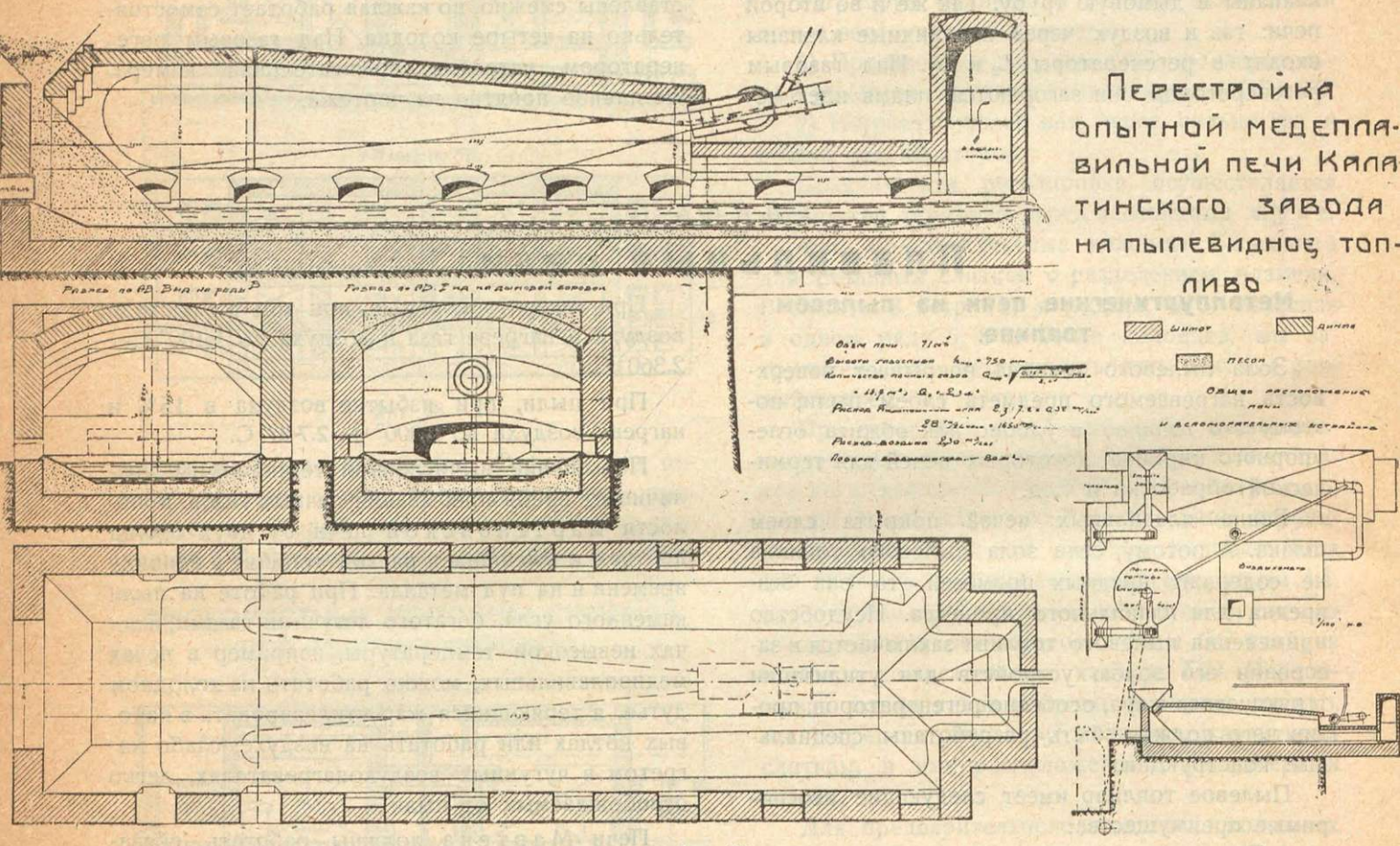
3. Проект печи Мартена на 50 тонн (фиг. 72).

1) Непрерывное питание рудной печи Калатинского завода предположено через щель в своду у короткой стены печи. Форсунка, расположенная в десяти метрах, ударяет в откос руды и плавит ее. Чтобы обеспечить подачу свежих порций руды, в короткой стене установлен толкатель. Продвигая руду вперед, он при обратном ходе освобождает под щелью пустое место; полустекшая руда обрушивается, и из закрома сыплется свежая порция холодной руды.

Печь рассчитана на потребление 26 т/24 часа Кизеловского каменного угля и проплавку 170 т руды.

По этому типу могут быть спроектированы простые, нерегенеративные печи для нагрева слитков, для проковки и прокатки, посудные муфельные печи, отжигательные и т. п.

2) Медноплавильная печь Сименса на 30 тысяч пудов руды в 24 часа (фиг. 71). Размеры взяты согласно американским данным: длина 30 метров, ширина 6 метров; высота свода над



Фиг. 70.

Во всей остальной печи происходит окончательное плавление и разделение руды и штейна по удельному весу. Шлак выпускается через шлаковое окно у борова; штейн—у близлежащего бокового окна.

Весьма вероятно, что явится возможность, кроме нагрузки руды у короткой стены, пробить еще дополнительные, для дополнительной нагрузки, отверстия в своду у длинных стен печи.

Теряющийся жар печных газов температурой около 1.100° С предположено использовать для нагрева дутья в воздухонагревателе с чугунными трубами.

ванной 2 метра. Загрузка руды происходит через отверстия в своде вдоль продольных стен печи. Четыре форсунки с каждой стороны поставлены инвертно. Печные газы, покидающие рабочее пространство, оставляют пыль золы и руды в обширных пылевых камерах, расположенных в пространстве под подом. Печь поставлена на колоннах, и потому в пространстве под подом печи хорошо умещаются два громадных борова 2½ метра шириной и 5 метров высотой. По расчету высота газовой реки в таком борове имеет при температуре 1.200° С всего 2½ метра глубины, следовательно, газовая река не лижет пода этого борова; у пода остается

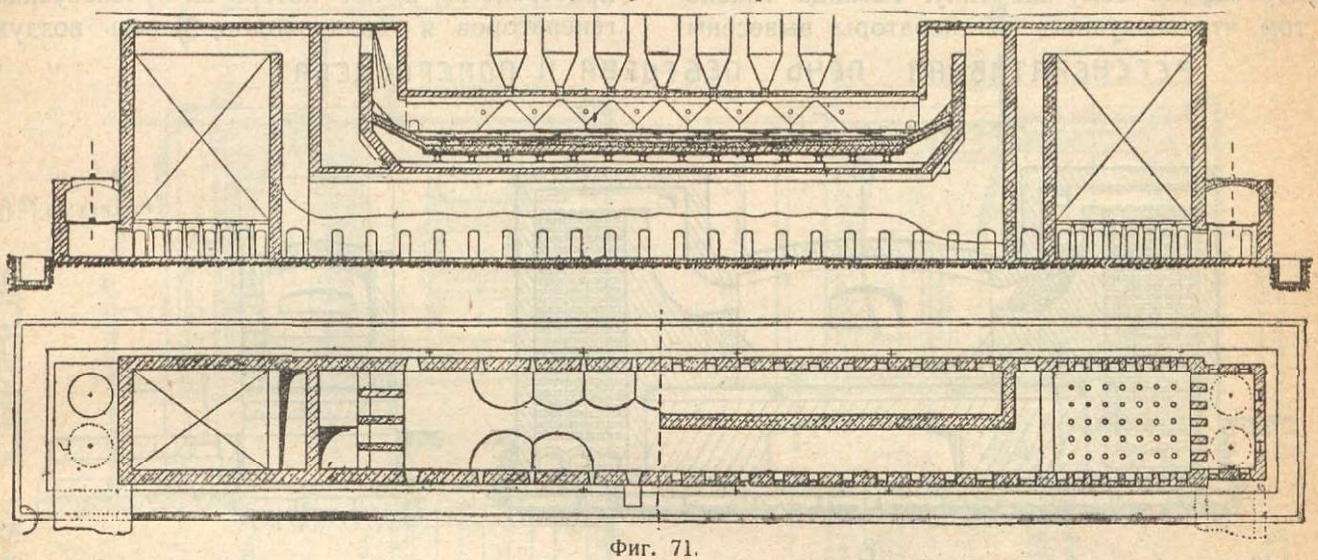
около 2 метров спокойного пространства, где осаждается пыль, выносимая из плавильного пространства. Длина этих боровов около 43 метров, и газовый поток успеет освободиться в них от пыли. Затем он вступает в вертикальный канал, по которому входит в регенератор для нагрева воздуха. Насадка регенератора устроена

на под регенератора, а по поду вода с пылью поступит в отстойные каналы, окружающие печь со всех сторон, а затем в канализацию. Водой же будет смываться вся пыль из боровов под печью.

Такое мытье будет делаться один, два раза в месяц, при полном прекращении работы печи. Остынут регенераторы, очень мало остынут бо-

ЭСКИЗНЫЙ ПРОЕКТ МЕДЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ.

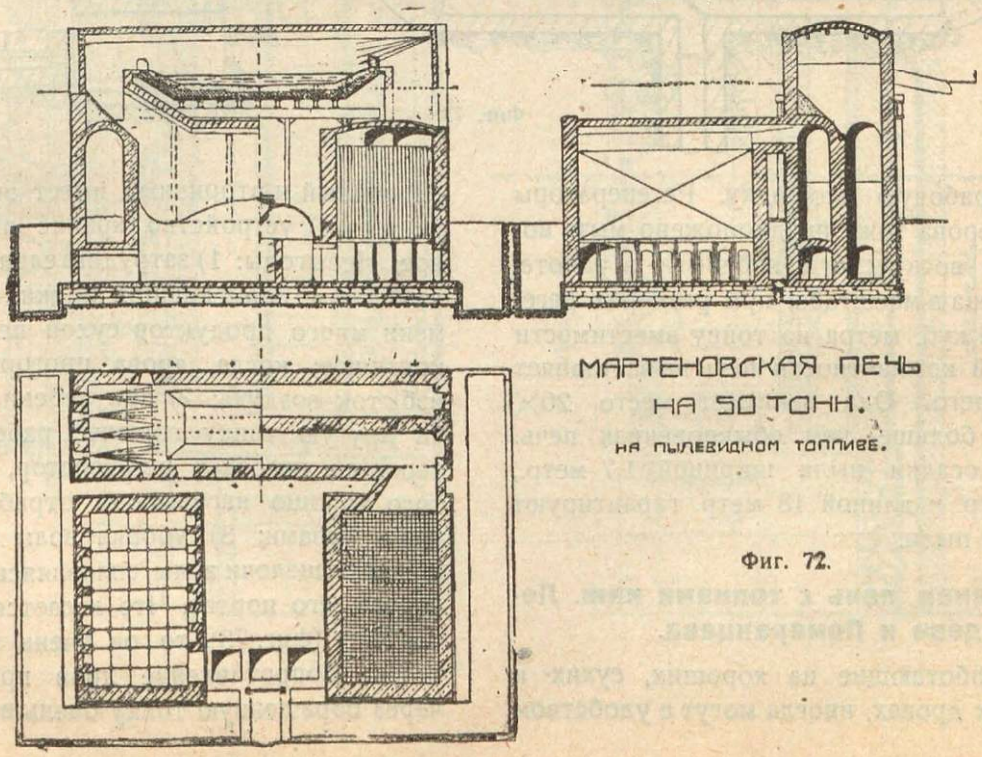
На 30.000 пуд. суточной проплавки.



Фиг. 71.

по типу аппарата Каупера. Она собирается на чугунной решетке, опирающейся на чугунных колоннах, из кирпичей, образующих пчелиные соты. В своде регенератора сделаны против каждой ячейки решетки отверстия 112×56 мм, через которые можно вставить брызгало и промыть решетку водой. Вода вынесет всю пыль

рова под плавильным пространством, но совсем не остынет рабочее пространство, ибо оно представляет мешок горячих газов, и раскаленный воздух из него не может никуда выйти. Потеря будет только через лучеиспускание. После мытья печь очень скоро должна восстановить свою полную работу.



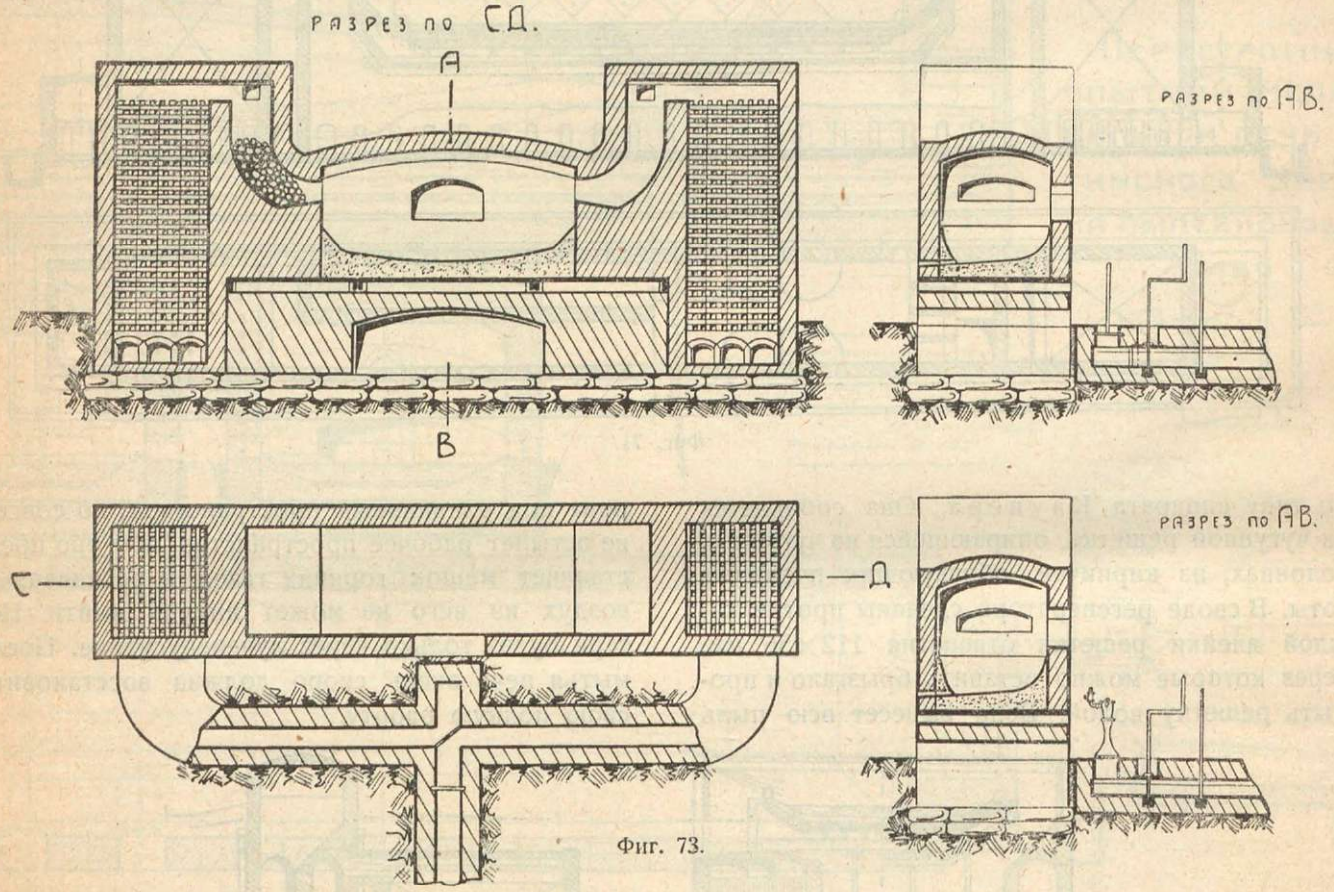
Фиг. 72.

Мытье решетки регенераторов было испробовано в Каменском заводе, и никаких неудобств при этом обнаружено не было.

В указанной конструкции, при работе форсунок с левой стороны, горячий воздух будет давать правый регенератор, а не левый, как в обыкновенных печах Сименса. На эту конструкцию заявлено мною право авторства.

3) 50-тонная мартеновская печь на пыли построена по тому же типу. Разница только в том, что воздушные регенераторы вынесены вперед под рабочую площадку. Регенераторы и пылевые борова тоже предположено мыть водой во время воскресного перерыва в работе. Печь вычерчена в масштабе, при размерах регенераторов 4½ куб. метра на тонну вместимости печи; по своей компактности печь не заставляет желать лучшего. Она занимает место 20×18 метр., не больше, чем обыкновенная печь. Борова для осадки пыли шириной 1,7 метр., высотой 8 метр. и длиной 18 метр. гарантируют осадку в них пыли.

РЕГЕНЕРАТИВНАЯ ПЕЧЬ ЛЕБЕДЕВА И ПОМЕРАНЦЕВА.

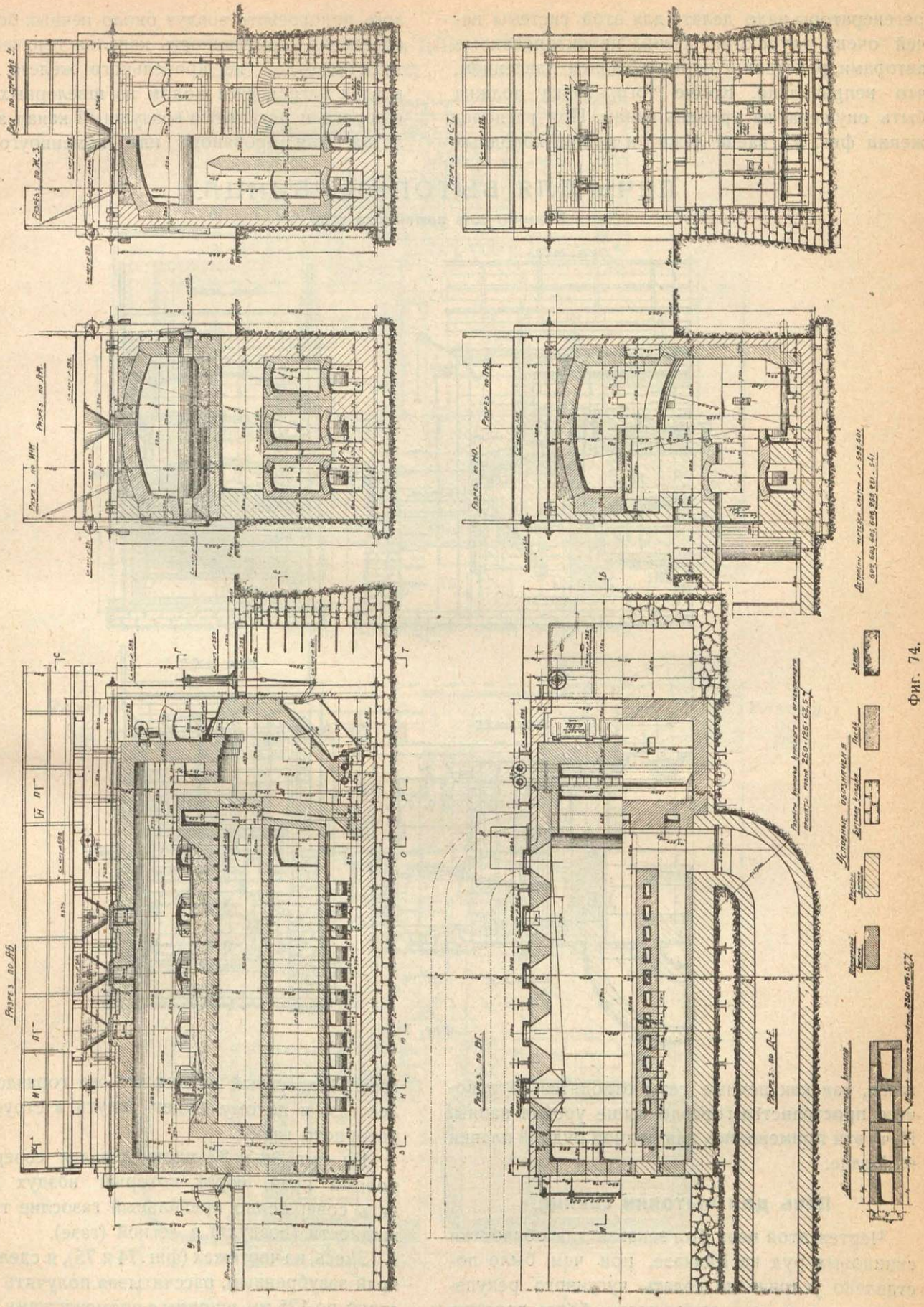


Фиг. 73.

Регенеративная печь с топками инж. Лебедева и Померанцева.

Заводы, работающие на хороших, сухих и мелкоколотых дровах, иногда могут с удобством применять печи с топками Лебедева и Померанцева (фиг. 73). Это печь Сименса с двумя воздушными регенераторами; она имеет по обе стороны рабочего пространства две обращенных дровяных топки, пользующиеся горячим воздухом регенераторов. Выгода этой конструкции, сравнительно с печами Сименса, нижеследующая: 1) все составные части топлива, как, например, смолы, утилизируются в рабочем пространстве; 2) нет потерь на лучеиспускание генераторов и газопроводов; 3) весь воздух и первичный и вторичный имеет высокую температуру; 4) устройство крайне простое и дешевое. Невыгоды: 1) затруднительная регулировка качеством пламени: при подкидке дров в пламени много продуктов сухой перегонки, пламя коптящее; когда дрова прогорят, в пламени избыток воздуха; 2) при перекидке и переходе на другую топку горючее работавшей топки теряется, нагревая регенератор, который и без того хорошо нагревается отработавшими печными газами; 3) уборка золы очень несовершенна, и щелочи золы, сплавляясь с материалами откоса, его портят. Что касается прилагаемого чертежа (фиг. 73), то он очень неудовлетворителен. Сопротивление дров проходу пламени через обращенную топку очень велико, и потому

ПЕЧЬ ДЛЯ ВЫТОПКИ СВИНЦА.



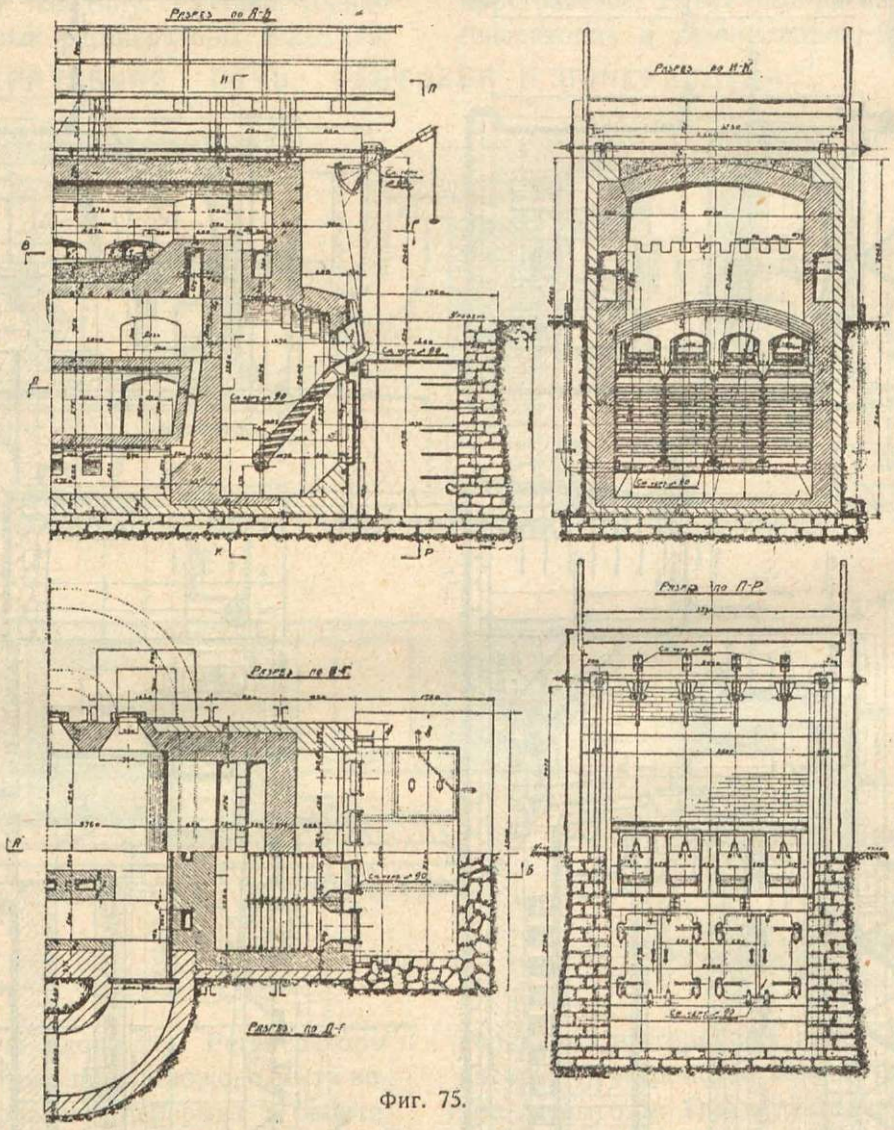
Фиг. 74.

регенераторы надо делать для этой системы печей очень глубокими. Печи, проектированные авторами, работали с отрицательным давлением, что неправильно. Кроме того, топка должна быть опущена на уровень ванны. При расположении фиг. 73 ванна лежит в мешке холодных

лось подогревать воздух около печных боровов, обеспечив герметичность каналов горячего воздуха одеждой из кровельного железа. Затем воздух нагревается подом из швелерных балок в пороге и вступает в воздушный канал за пролетом для дровяного или каменноугольного

ПЕЧЬ ДЛЯ ВЫТОПКИ СВИНЦА.

Вариант для каменного угля.



Фиг. 75.

газов, так как печные газы отводятся из рабочего пространства гораздо выше уровня ванны. Печи эти применялись для медной рудной плавки на Урале.

Печь для вытопки свинца.

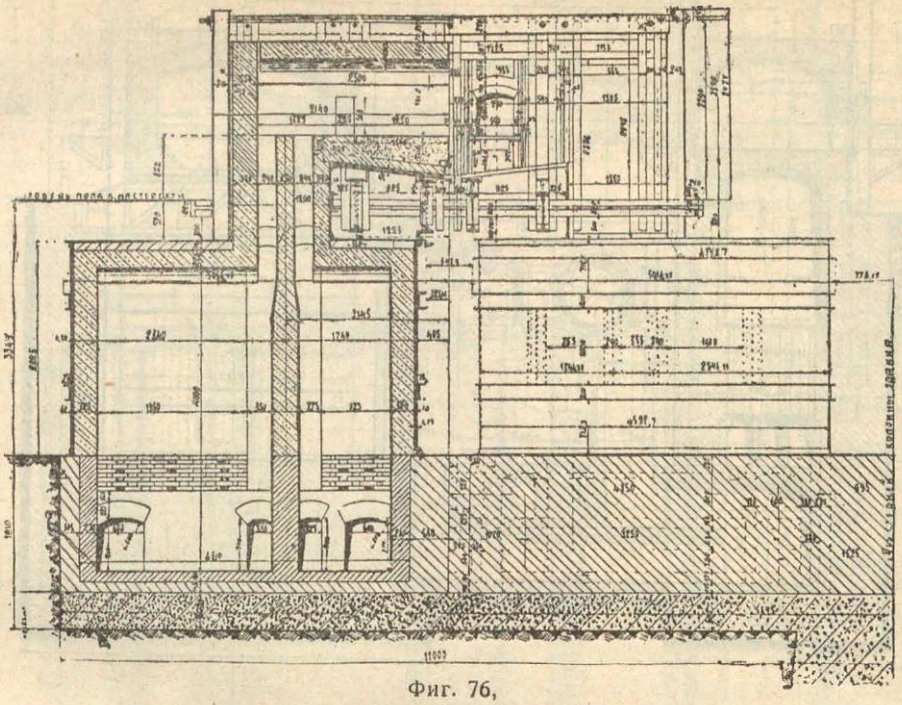
Чертеж этой печи был заказан для обработки свинцовых руд на Кавказе, при чем было поставлено условие не делать чугунного рекуператора и дать, по возможности, более простую печь для дров (фиг. 74) и каменного угля (фиг. 75) с боровами, легко очищаемыми от пыли. Пришгаза. Подогретый воздух все же гораздо тяжелее газа и потому будет тонуть в струе генераторного газа.

На фиг. 36 и 37 мною делался совершенно ровный край, через который воздух должен дать совершенно правильный газослив тяжелой жидкости (воздуха) в легкой (газе).

Здесь, на чертежах (фиг. 74 и 75), я сделал этот край зазубренным, рассчитывая получить восемь струй по 125 мм ширины с промежутками газа по 125 мм ширины. Таким образом, я полагаю получить более быстрое смешение газов и воздуха.

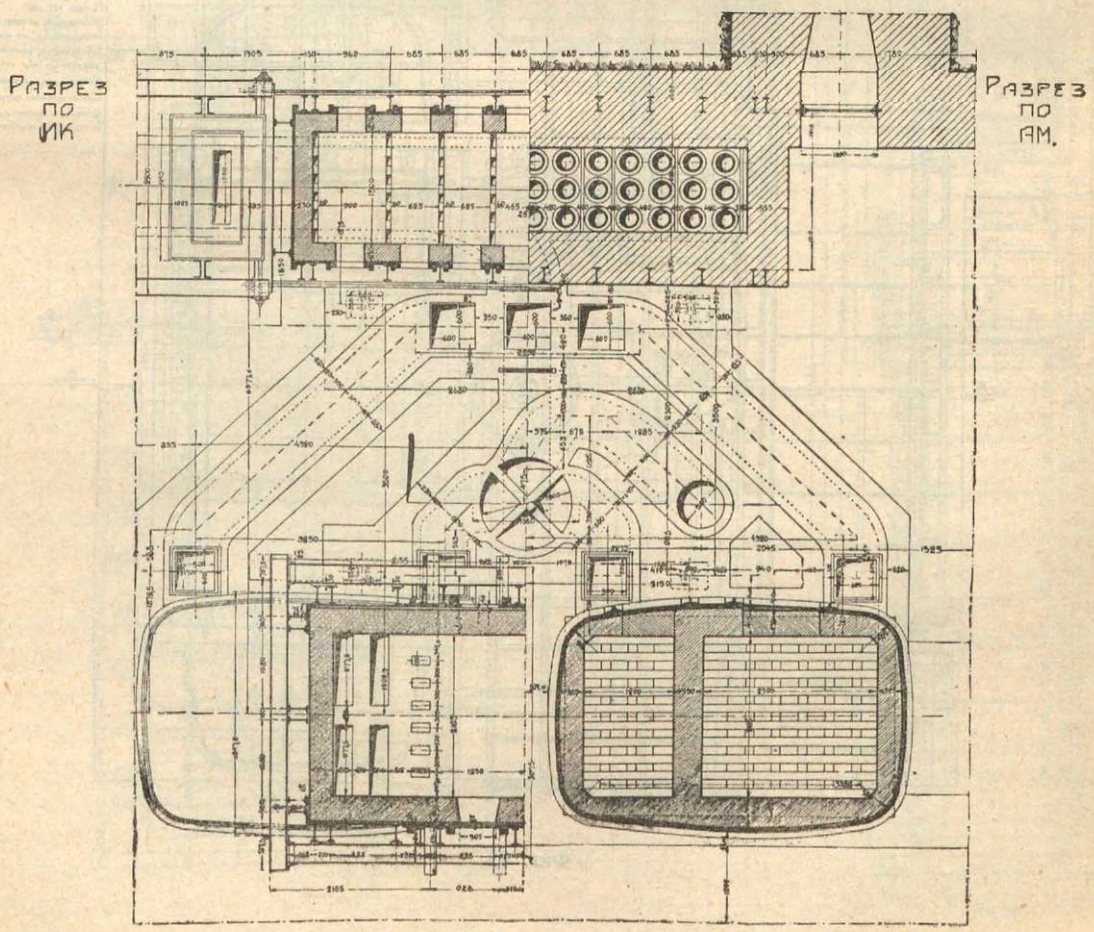
ТИГЕЛЬНАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ ПЛАВКИ СТАЛИ.

Продольный разрез по средней оси. Вид со стороны рабочих окон.



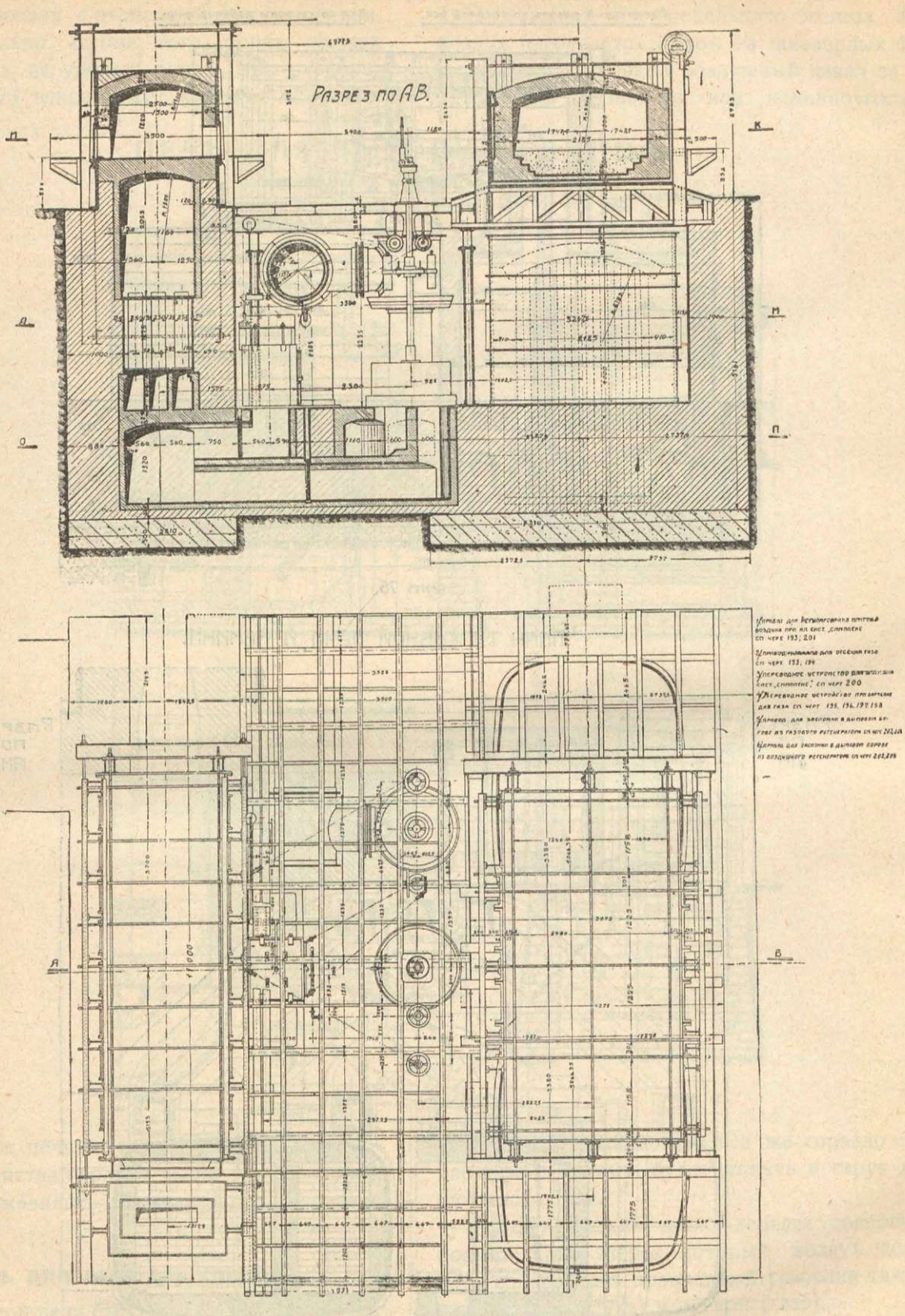
Фиг. 76,

ПЛАН ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ И КАМИНА.

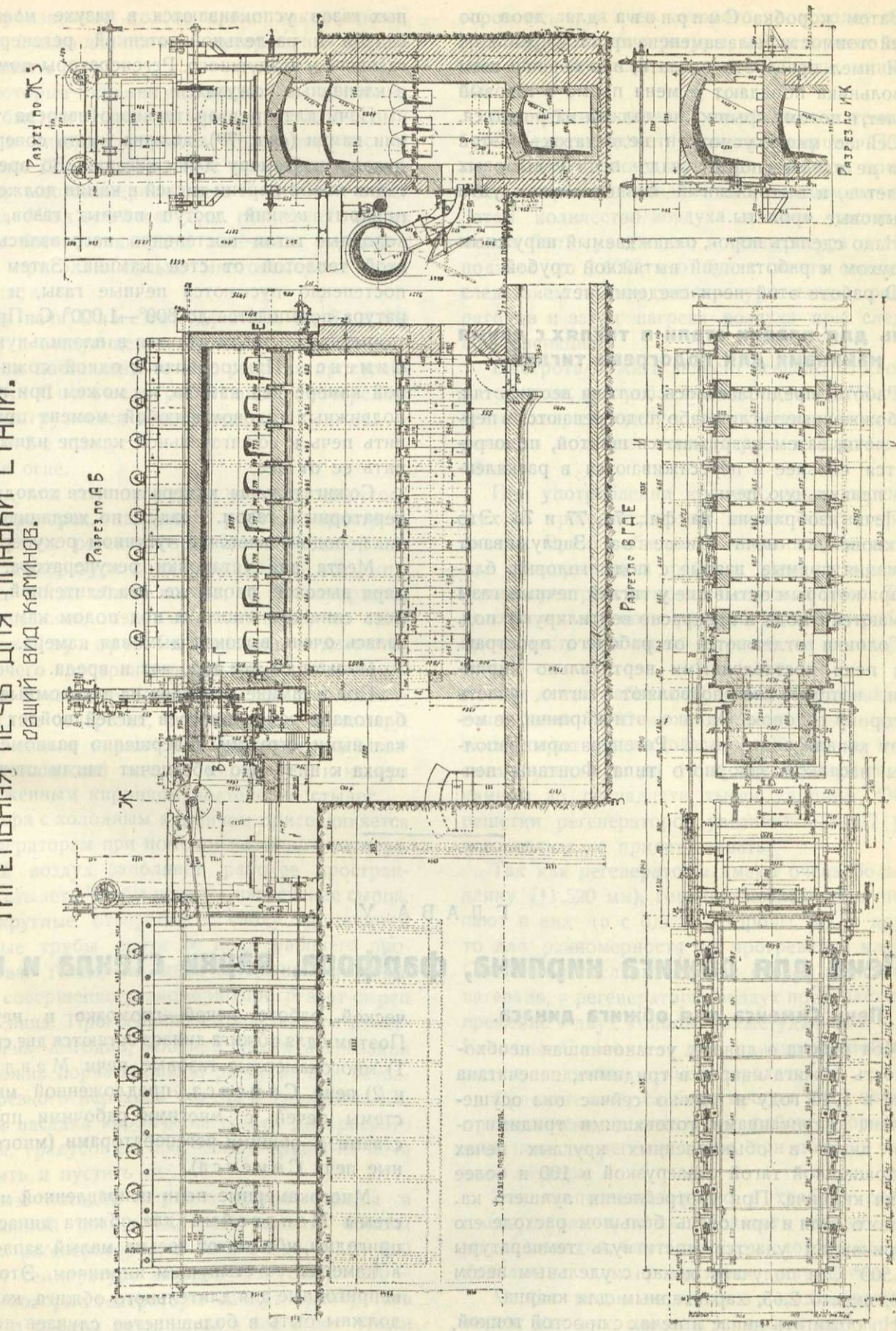


Фиг. 77.

РАЗРЕЗ И ПЛАН ТИГЕЛЬНОЙ ПЕЧИ И КАМИНА.



Фиг. 78.



Фиг. 79.

ТИГЕЛЬНАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ ПЛАВКИ СТАЛИ.

ОБЩИЙ ВИД КАМИНОВ.

Затем коробка Смирнова для дров по своей стоимости была заменена простой крышкой.

Я имел право это сделать, ибо горячие газы из зольника попадают у меня прямо в газовый пролет, и потому крышка не должна нагреваться.

Сейчас мною усмотрен недостаток—в этой печи не сделан порог сзади печи у дымовых пролетов, и вытопленный свинец может уйти в дымовые пролеты.

Надо сделать порог, охлаждаемый наружным воздухом и работающий вытяжной трубой.

О работе этой печи сведений нет.

Печь для плавки стали в тиглях с двумя каминами для подогрева тиглей.

Работа, предполагалось, должна вестись так: необожженные тигли слабо подогреваются в первой печи, затем нагружаются шихтой, подогреваются сильнее и пересаживаются в раскаленную плавильную печь.

Печь изображена на фиг. 76, 77 и 78. Это обыкновенная печь Сименса. Заслуживают внимания прямые, взятые с пода головки, благодаря которым остывшие у тиглей печные газы снимаются с пода и прекрасно вентилируют под.

Головки отделяются от рабочего пространства печи поставленными вертикально кирпичами, которые не позволяют тиглю упасть в сторону головок. Однако, эти кирпичи не мешают канализации пода. Регенераторы заполнены насадкой заборного типа. Фонтаны печных газов успокаиваются в пазухе между насадкой и раздельной стенкой регенераторов газового и воздушного. Регенераторы помещены в клепанных кожухах.

Печь для предварительного нагрева тиглей, или камин (фиг. 79), должна иметь совершенно отдельную камеру для сжигания. Во время посадки новой партии тиглей в камин должен быть прикрыт всякий доступ печных газов, чтобы холодные тигли постепенно нагревались лучистой теплотой от стен камина. Затем в печь постепенно пускаются печные газы, и температура повышается до 800°—1.000° С. При этой температуре тигли садятся в плавильную печь Сименса. Присоединяя к одной сожигательной камере два камина, мы можем при помощи подвижных головок в любой момент присоединить печь к сожигательной камере или отъединить ее от нее.

Сожигательная камера топится холодным генераторным газом. Воздух, по желанию заказчика, подогревается в чугунном рекуператоре.

Места для установки рекуператора, благодаря высокой площадке сталелитейной, оказалось слишком много, и под подом камина оказалась очень высокая дымовая камера.

Пользы от нее нет, нет и вреда.

Под в камине разделен на автономные части, благодаря чему подогрев тиглей пойдет вертикальными струями совершенно равномерно от верха к низу, что обеспечит тигли от трещин.

ГЛАВА V.

Печи для обжига кирпича, фарфора, варки стекла и пр.

Печь Сименса для обжига динаса.

Моя работа о динасе, установившая необходимость обжига кварца в тридимит, напечатана была в 1910 году и только сейчас она осуществлена американцами, готовящими тридимитовый динас в обыкновенных круглых печах с обращенной тягой с нагрузкой в 100 и более тысяч кирпича. При употреблении лучшего каменного угля и при очень большом расходе его американцам удается достигнуть температуры в 1.500° С и получать динас с удельным весом 2.33, вместо 2,65, характерным для кварца.

Но обжигать динас в печах с простой топкой, конечно, не рационально. Топить улицу — разорительно; ставить паровые котлы при периодической работе печей—громозко и неудобно. Поэтому для обжига динаса остаются две системы: 1) многокамерные газовые печи Мендгейма и 2) печи Сименса, предложенной мной системы печей с многими рабочими пространствами и общими регенераторами (многокамерные печи Сименса).

Многокамерные печи исправленной мной системы Мендгейма для обжига динаса мало пригодны, ибо имеют весьма малый запас тепла в камерах со стынущим кирпичом. Это—печи, непригодные для длительного обжига, каковыми должны быть в большинстве случаев печи для обжига динаса. В печах Сименса, напротив того, можно поддерживать высокую темпера-

туру произвольно долгое время; такое время, которое нужно для полного превращения кварца в тридимит.

Некоторые кремни переходят в тридимит очень быстро. Напротив того, молочно-белый кварц и чистые кварциты переходят весьма медленно. Для первых могут оказаться пригодными и многокамерные печи Сименса и печи типа Мендгейма. Для получения же из всякого богатого кварцем материала хорошего динаса пригодны только многокамерные печи Сименса.

Идея печи Сименса (фиг. 80, 81, 82 и 83) состоит в следующем:

Рядом поставлены четыре рабочих пространства печи Сименса, работающие поочередно:

1-е выгружается и нагружается,

2-е и 3-е стынут,

4-е в огне.

Продукты горения газа и воздуха, нагретого в регенераторах, нагревают рабочее пространство и затем регенераторы очень большой емкости, температура коих поднимается все выше и выше. Когда обжиг кончен, то газ запирается герметическими газовыми клапанами, по типу клапанов Каупера. Регенераторы отделяются от рабочего пространства при помощи песчаного затвора. В своде рабочего пространства имеются круглые отверстия, через которые из камеры с обожженным кирпичом выходит горячий воздух, отопляющий здание кирпичной, и камера с обожженным кирпичом постепенно стынет.

Камера с холодным кирпичом присоединяется к регенераторам при помощи песчаного затвора. Горячий воздух заполняет рабочее пространство и стынет. Чтобы усилить нагревание сырца, через круглые отверстия в своду опускаются железные трубы почти до пода рабочего пространства. Тогда, по мере остывания, горячий воздух совершенно равномерно прогревает сырец сверху вниз. Прогревание сырца теплым воздухом очень выгодно, ибо при таком нагревании невозможна порча кирпича, раздутие его, вследствие резкого перехода кварца в тридимит. Когда вся насадка кирпича нагреется до красного каления, градусов до 800, можно трубы из печи вытащить и пустить газ.

Объем посадки кирпича одной камеры в описываемой печи в $4^1/_2$ раза меньше объема насадки регенераторов, и нагревание ее до 800 понизит температуру насадки градусов на 250—300° С, которые генераторы начнут приобретать в период работы печи, когда в нее будет пущен газ. Итак, регенераторы в этой печи играют роль не только регенераторов, но и аккумуляторов тепла, за счет которого происходит подогрев сырца до температуры, когда горение делается уже возможным, т.-е. 800° или минимум 600° С.

При обжиге динаса резкий подъем температуры пламени может испортить кирпич. Поэтому в начале обжига придется работать при небольшом расходе воздуха на коптящем пламени. Затем количество воздуха и газа постепенно может быть увеличено, и температура пламени поднята до 1.600°, что будет иметь своим последствием подъем температуры кладки регенераторов и затем нагрева воздуха при следующей операции.

Быстрота обжига зависит всецело от свойств материалов, употребленных для динаса. Молочно-белый кварц потребует очень медленного и осторожного подъема температуры и длительного обжига.

При употреблении кремней, легко переходящих в тридимит, обжиг можно вести гораздо смелее. Время обжига уменьшится, и потому для непрерывности работы печи четырех рабочих пространств может оказаться мало. Тогда надо будет эту печь развить до шести рабочих пространств при одной паре общих регенераторов.

Вся длина рабочих пространств описываемой печи равна 7.480 мм и емкость около—десяти тысяч кирпича в каждой камере. Эту длину можно смело увеличить до 10 м и увеличить емкость камеры до пятнадцати тысяч кирпича. Объем решетки регенераторов увеличится в 1,7 раза, чего нельзя не приветствовать.

Так как регенераторы имеют очень большую длину (11.520 мм), горячие печные газы поступают в них то с одной стороны, то с другой, то для равномерности их прогревания клапаны Сименса сделаны с обеих сторон печи; следовательно, в регенераторы воздух поступает одновременно с двух концов. Также удаляется и дым. Клапаны Сименса для одновременной перекидки соединены цепной передачей.

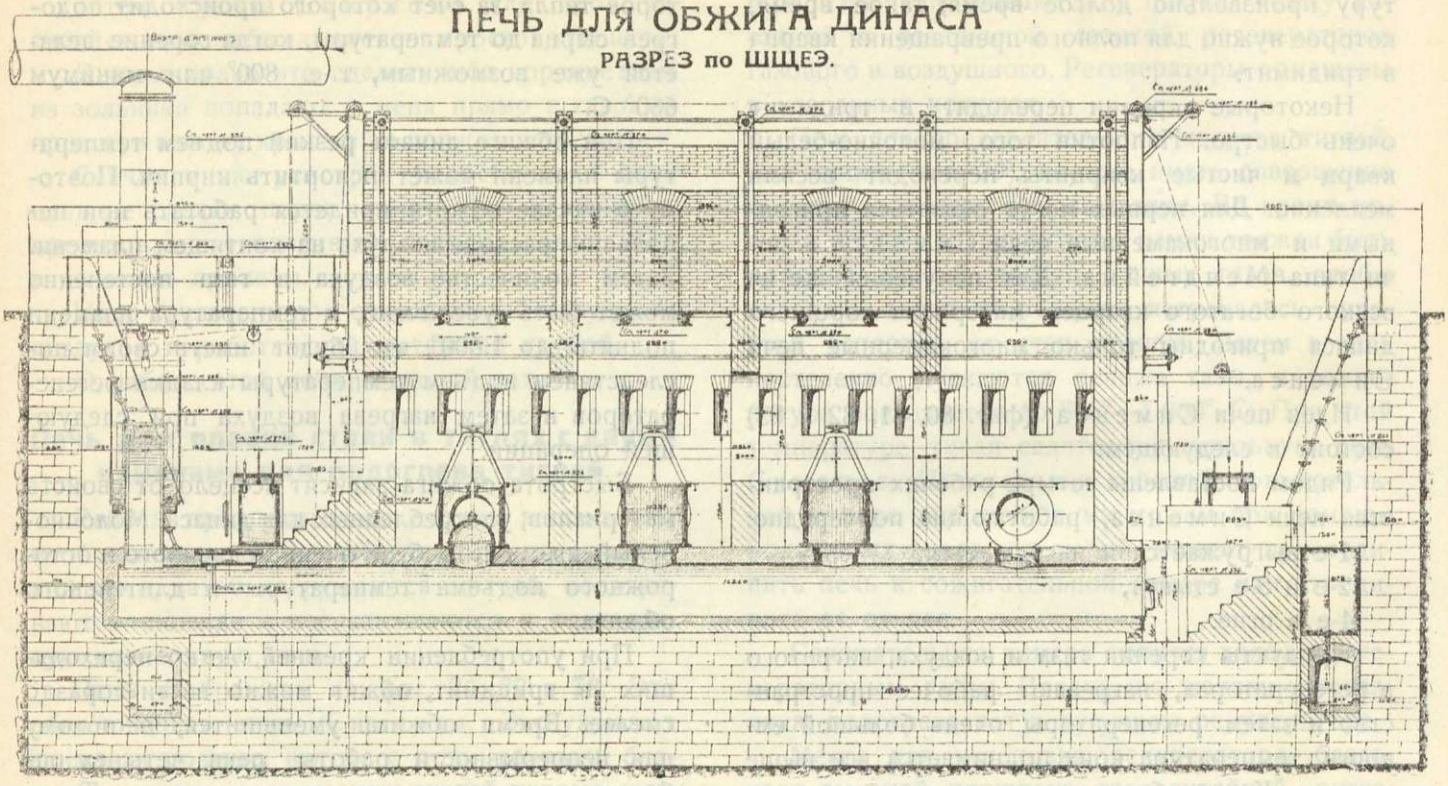
Сравнительно слабым местом печи является присоединение и отделение рабочего пространства печи от регенераторов при помощи песчаного затвора.

Это хлопотливо, грязно и требует расхода глины, кирпича, песка. Но делать клапаны, охлаждаемые водой, было слишком сложно, и я остановился на этом примитивном устройстве.

Чтобы песок не попал в насадки регенераторов, для него сделаны в полости регенератора мешки, из которых песок можно выгрести во время ремонта или остановки печи.

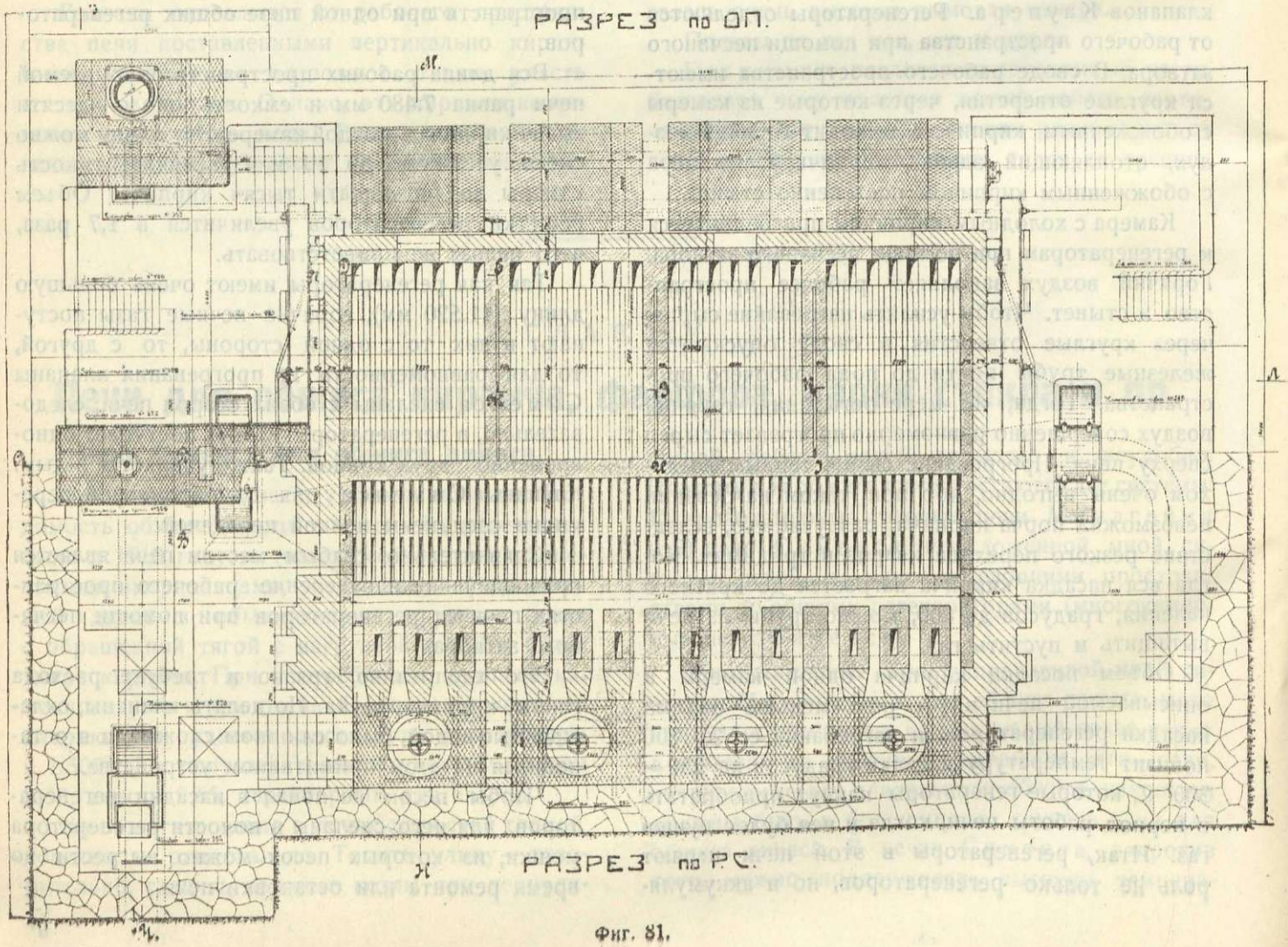
ПЕЧЬ ДЛЯ ОБЖИГА ДИНАСА

РАЗРЕЗ по ШЩЕЭ.



Фиг. 80.

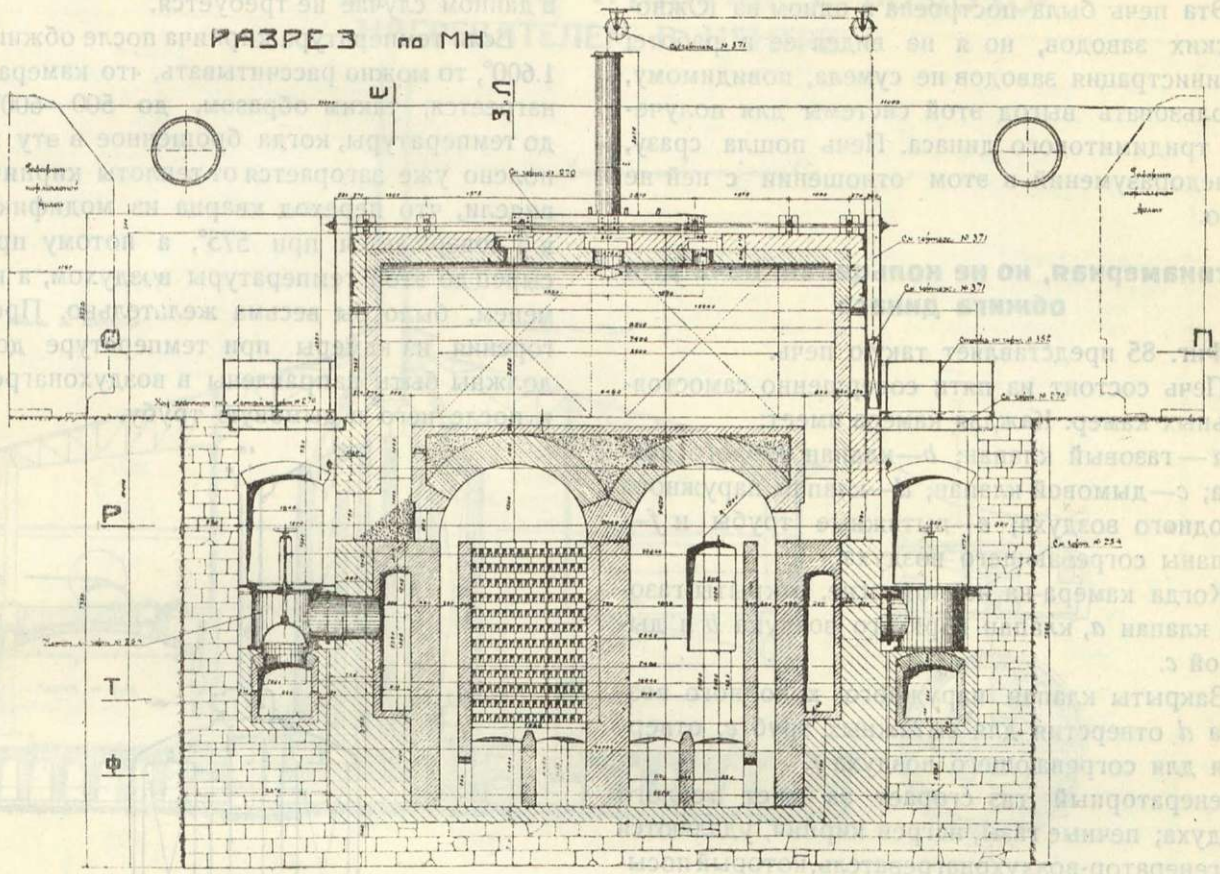
РАЗРЕЗ по ОП.



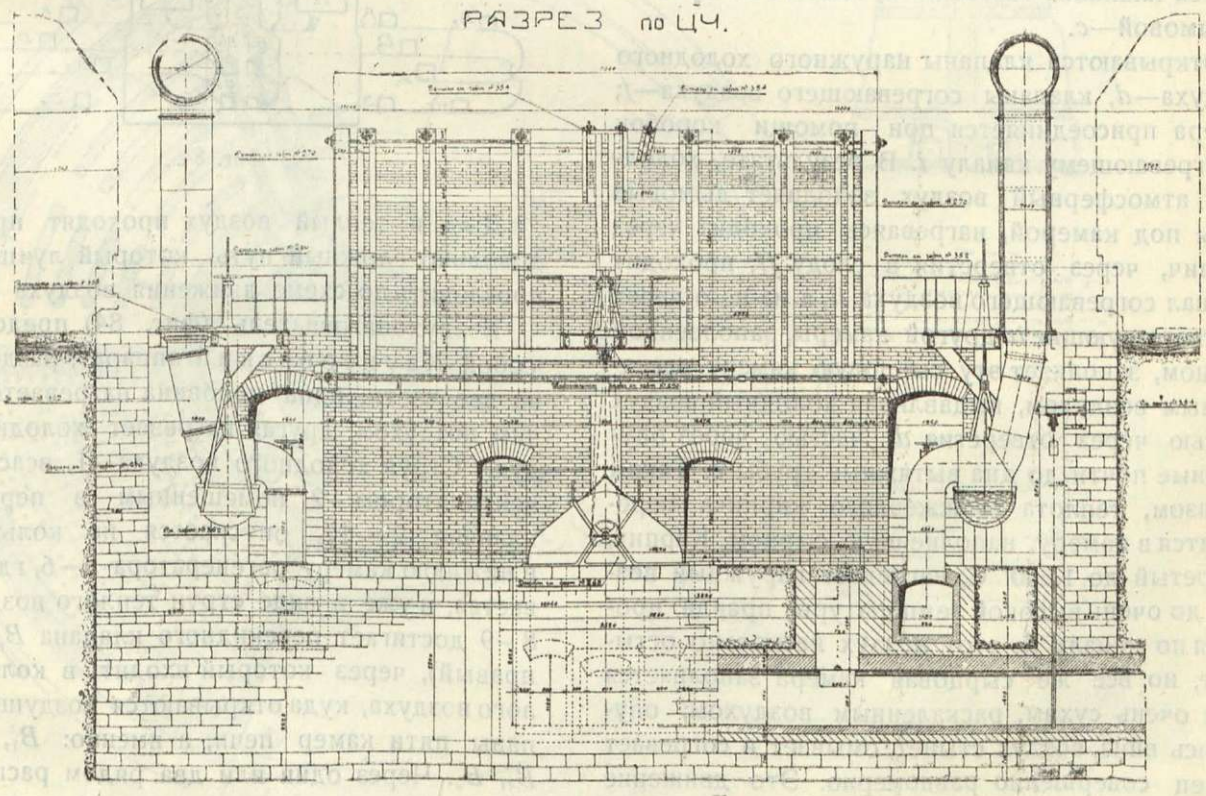
РАЗРЕЗ по РС.

Фиг. 81.

ПЕЧЬ ДЛЯ ОБЖИГА ДИНАСА



Фиг. 82.



Фиг. 83.

Пролеты печи Сименса взяты прямо с пода, и канализация пода поэтому весьма совершенна.

Эта печь была построена в одном из Южнорусских заводов, но я не видел ее в работе; администрация заводов не сумела, повидимому, использовать выгод этой системы для получения тридимитового динаса. Печь пошла сразу, и недоразумений в этом отношении с ней не было.

Пятикамерная, но не кольцевая, печь для обжига динаса.

Фиг. 85 представляет такую печь.

Печь состоит из пяти совершенно самостоятельных камер. Каждая камера имеет:

a — газовый клапан; *b*—клапан теплого воздуха; *c*—дымовой клапан; *d*—клапан наружного холодного воздуха; *e*—вытяжные трубы и *f*—клапаны согревающего воздуха.

Когда камера на полном огне, открыты газовый клапан *a*, клапан горячего воздуха *b* и дымовой *c*.

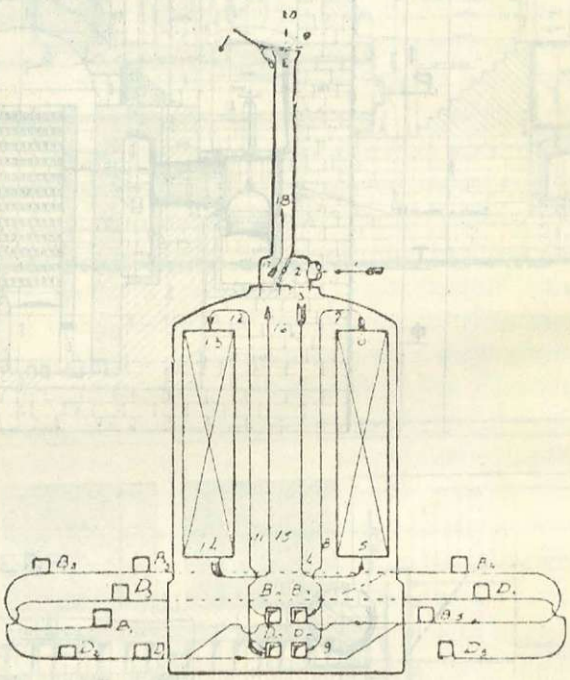
Закрыты клапан наружного холодного воздуха *d* отверстия для вытяжных труб *e*, отверстия для согревающего воздуха *f*.

Генераторный газ сгорает за счет теплого воздуха; печные газы, нагрев кирпич, удаляются в регенератор-воздухонагреватель, который посылает в камеру теплый воздух.

Когда обжиг кончен, в каждой камере прикрываются клапаны: газовый—*a*, теплого воздуха—*b* и дымовой—*c*.

Открываются клапаны наружного холодного воздуха—*d*, клапаны согревающего воздуха—*f*; камера присоединяется при помощи коробок к согревающему каналу *i*. В результате, холодный атмосферный воздух заполняет дымовые ходы под камерой, нагреваясь проходит через кирпич, через отверстия в своду *ff*, проходит в канал согревающего воздуха *ii*, а из него через соответствующие *ii* другой камеры, заполненной сырцом, заполняет эту сырцовую камеру раскаленным воздухом, выдавливая холодный воздух частью через отверстие *d*, частью через опущенные почти до дна вытяжные трубы *e*. Таким образом, теплота обожженного кирпича переносится в камеру, наполненную сырцом. Кирпич, нагретый до 1.600° С, нагревает наружный воздух до очень высокой температуры; правда, проходя по каналу *ii*, этот воздух несколько остывает, но все же сырцовая камера заполняется еще очень сухим, раскаленным воздухом; опускаясь вниз, воздух стынет, омывает и согревает сырец совершенно равномерно. Это движение воздуха идет по принципу сифона, одно колено коего заполнено легким теплым воздухом, а другое тяжелым холодным, а потому вентилятора в данном случае не требуется.

Если температура кирпича после обжига была 1.600°, то можно рассчитывать, что камера сырца нагреется, таким образом, до 500—600°, т.-е. до температуры, когда брошенное в эту камеру полено уже загорается от теплоты кирпича. Мы видели, что переход кварца из модификации α в β совершается при 575°, а потому прогреть сырец до этой температуры воздухом, а не пламенем, было бы весьма желательно. Продукты горения из камеры при температуре до 1.600° должны быть направлены в воздухонагреватель и после него в дымовую трубу.

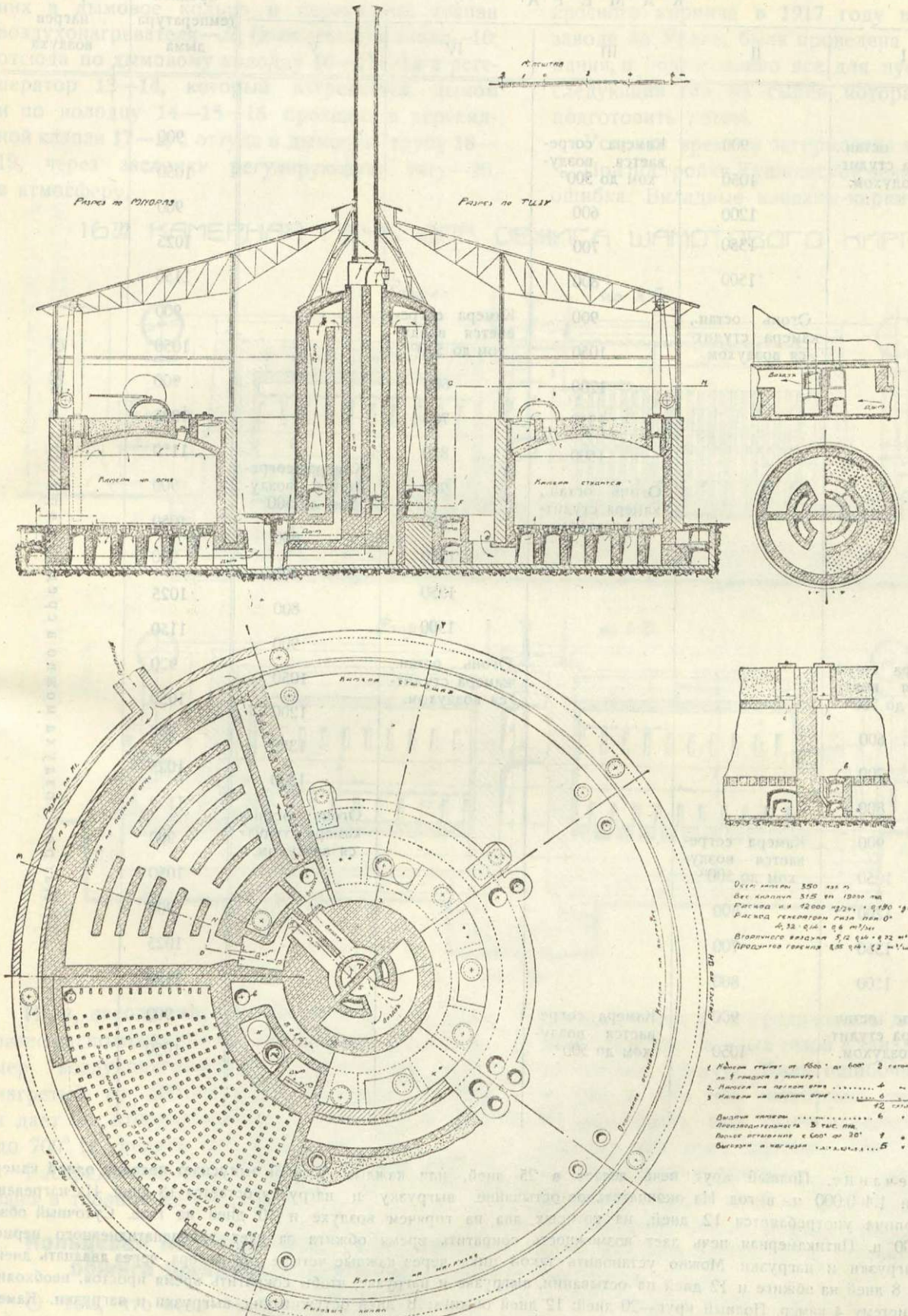


Фиг. 84.

Дым и теплый воздух проходят при этом довольно сложный путь, который лучше всего проследить по схеме движения воздуха и дыма.

Воздухонагреватель (фиг. 84) представляет собой Кауперовский аппарат, разделенный на две части: одна половина нагревается горячим воздухом, другая нагревает холодный воздух. Струя холодного воздуха—1, всасываемая вентилятором—2, помещенным в перекидном клапане 2—17, опускается по кольцу 3—4 в нижнюю камеру регенератора 5—6, где нагревается, и уже в виде струи теплого воздуха 7—8—9 достигает перекидного клапана B_n (воздух правый), через который входит в кольцо теплого воздуха, куда открываются воздушные клапаны пяти камер печи, а именно: B_1, B_2, B_3, B_4, B_5. Через один или два рядом расположенных таких клапана теплый воздух входит в воз-

ПЯТИКАМЕРНАЯ, НО НЕ КОЛЬЦЕВАЯ, ПЕЧЬ ДЛЯ ОБЖИГА ДИНАСА В ТРИДИМИТ С ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕМ В ЦЕНТРЕ.



Фиг. 85.

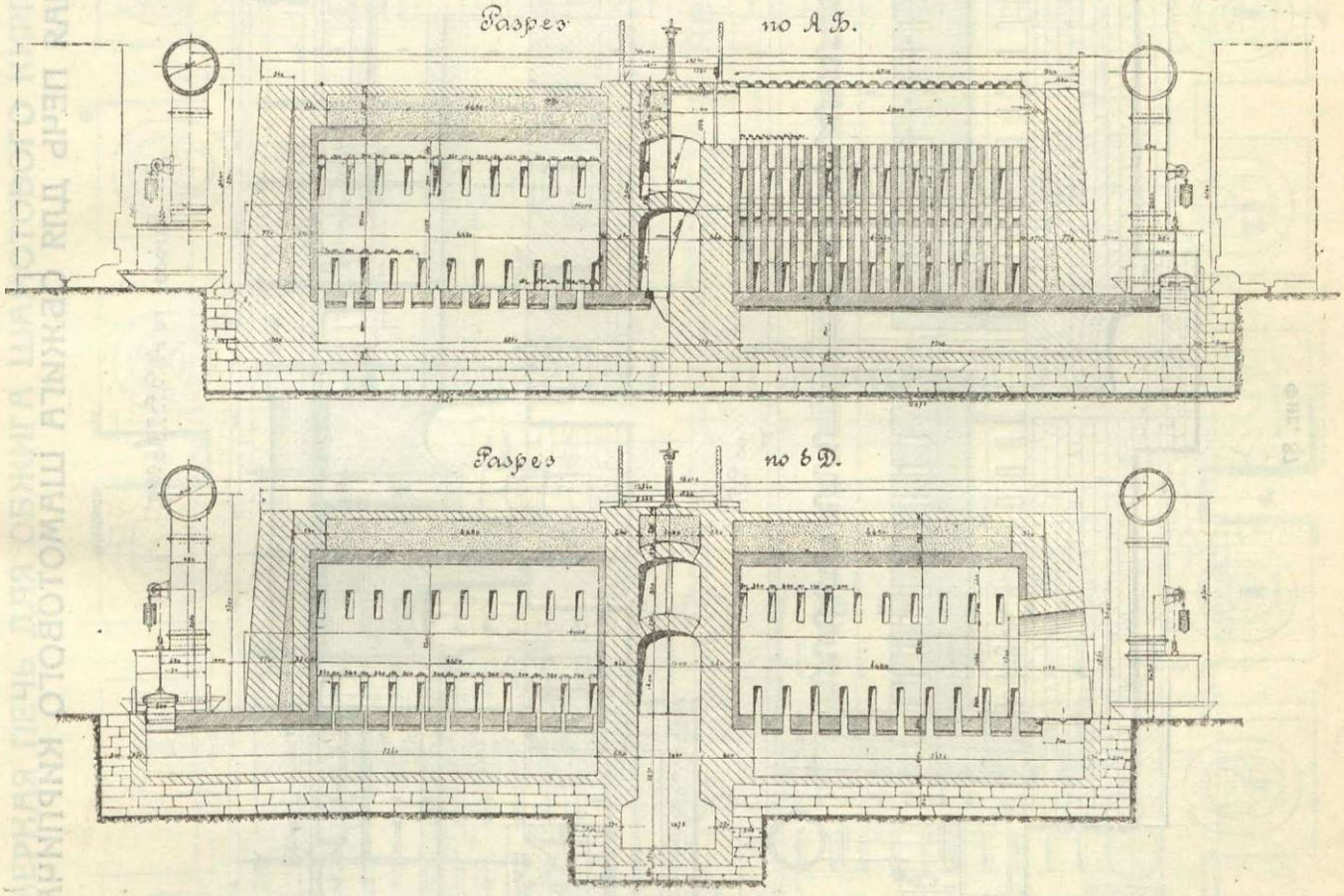
Программа обжига динаса в пятикамерной печи. Последовательная смена температуры печных газов, покидающих камеры.

Сутки	КАМЕРА					Средняя температура дыма	Средний нагрев воздуха
	I	II	III	IV	V		
	Огонь остан., камера студится воздухом.	900	Камера согревается воздухом до 500°			900	Нагрев воздуха можно в среднем принять в 600° С.
		1050				1050	
1		1200	600			900	
2		1350	700			1025	
3		1500	800			1150	
4		Огонь остан., камера студится воздухом.	900	Камера согревается воздухом до 500°		900	
5			1050			1050	
6			1200	600		900	
7			1350	700		1025	
8			1500	800		1150	
9			Огонь остан., камера студится воздухом.	900	Камера согревается воздухом до 500°	900	
10				1050	600	1050	
11				1200	700	900	
12				1350	800	1025	
13				1500	900	1150	
14	Камера согревается воздухом до 500°			Огонь остан., камера студится воздухом.	1050	900	
15					1200	1050	
16	600				1350	900	
17	700				1500	1025	
18	800				Огонь остан., камера студится воздухом.	1150	
19	900	Камера согревается воздухом до 500°				900	
20	1050					1050	
21	1200	600				900	
22	1350	700				1025	
23	1500	800				1150	
24	Огонь остан., камера студится воздухом.	900	Камера согревается воздухом до 500°.			900	
25		1050				1050	

Примечание. Полный круг печь делает в 25 дней, или каждые 5 дней выпускает посадку одной камеры 19.000 п. или 1.400.000 п. в год. На окончательное остывание, выгрузку и нагрузку остается 13 дней. На нагревание и обжиг кирпича употребляется 12 дней, из которых два на горячем воздухе и 10 дней на газе. Суточный обжиг кирпича—3.800 п. Пятикамерная печь дает возможность сократить время обжига за счет тринадцатидневного периода остывания, выгрузки и нагрузки. Можно установить такой цикл: через каждые четыре дня камера, через двадцать дней—полный круг; 8 дней на обжиге и 12 дней на остывании, выгрузке и нагрузке; чтобы сократить время простоя, необходимо перейти на систему 4 камер. Полный круг—20 дней: 12 дней обжига; 8 дней остуживания, выгрузки и нагрузки. Камеры будут на 20% большей вместимости по 24.000 п. Годичная производительность—1.750.000 п.

душный канал кирпичеобжигательных камер, сжигает генераторный газ и, пройдя камеру, в виде дыма поступает к одному или двум дымовым клапанам D_1, D_2, D_3, D_4, D_5, и через них в дымовое кольцо и перекидной клапан воздухонагревателя—$Д_л$ (дым левый) в канал—10; отсюда по дымовому колодцу 10—11—12 в регенератор 13—14, который нагревается дымом и по колодцу 14—15—16 проходит в перекидной клапан 17—2, а оттуда в дымовую трубу 18—19, через заслонку регулирующую тягу—20, в атмосферу.

16ти КАМЕРНАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ ОБЖИГА ШАМОТОВОГО КИРПИЧА



Фиг. 86.

Итак, находящийся в центре пяти кольцеобразно расположенных кирпичеобжигательных камер воздухонагреватель воспринимает дым, нагретый от 500 до 1.600° (в среднем 1050°) и дает им вторичный воздух, нагретый от 400 до 700° (в среднем 600° С).

Распределение работы между камерами показано в таблице на стр. 88.

Кольцевая многокамерная печь для обжига шамотового кирпича.

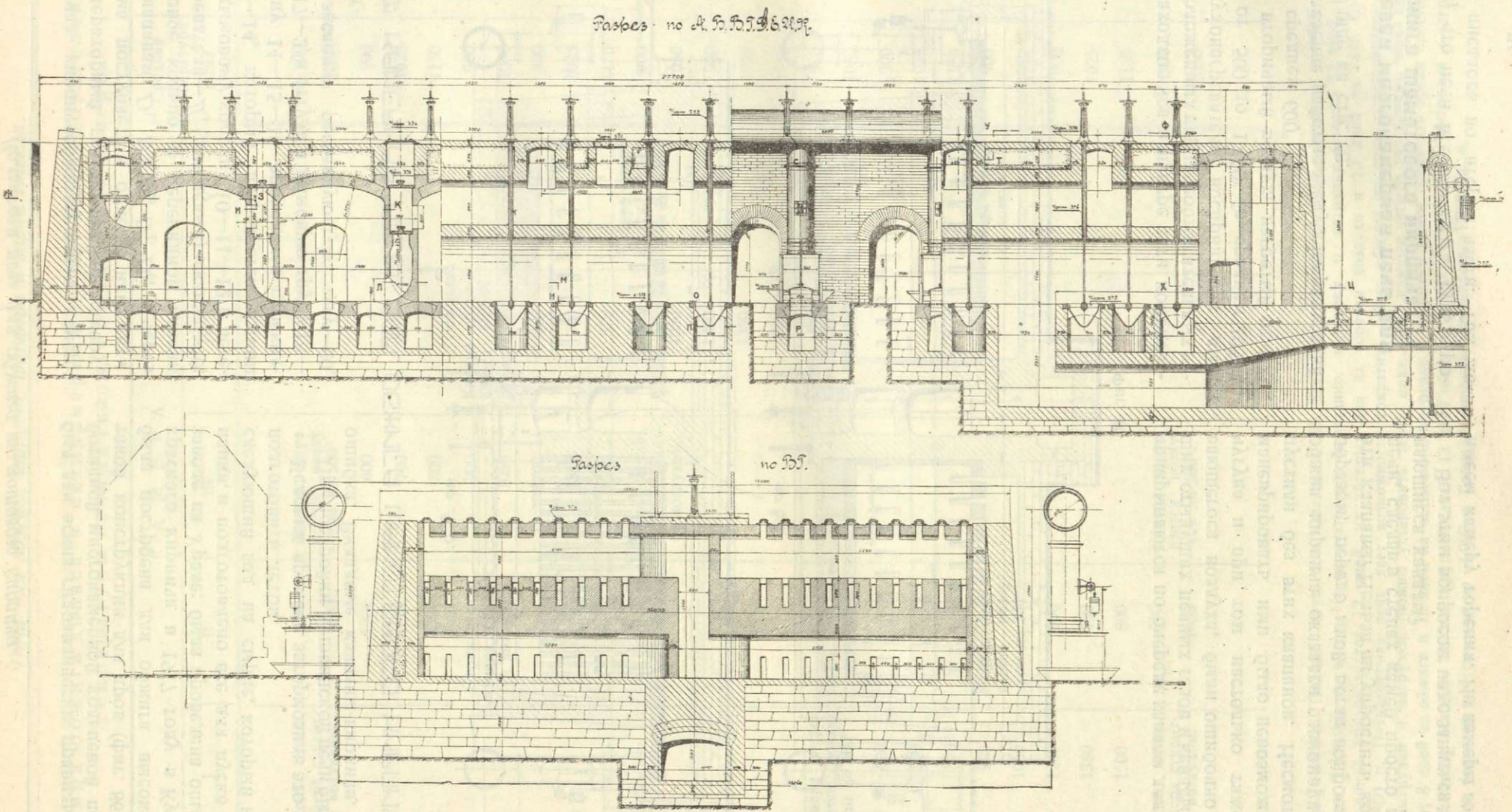
О том, что печи Мендгейма суть уроды, мною писалось во второй части. Там же был дан эскиз гидравлически правильно разработанной многокамерной кольцевой печи. Печь такой конструкции для дров (фиг. 86, 87 и 88) была построена для обжига высокосортного красного кирпича в 1917 году в Кушвинском заводе на Урале; была проведена опытная кампания, и подготовлено все для пуска завода на следующий год на сырце, который надо было подготовить летом.

Условия времени затормозили это дело.

При постройки Кушвинской печи была сделана ошибка. Вкладные клапаны-кирпичи, которыми прикрываются по очереди каналы для отработавших стынущих печных газов и каналы для нагревающегося воздуха, были ошибочно отлиты из чугуна и при том настолько тяжелыми, что маневрировать ими было невозможно, и печь пустили без этих клапанов. Несмотря на это, обжиг кирпича оказался равномерным. Таким образом, передо мной встал вопрос: нужны ли эти клапаны? Нельзя ли упростить конструкцию печи, сделав в стенах камер просто перекрещивающиеся каналы?

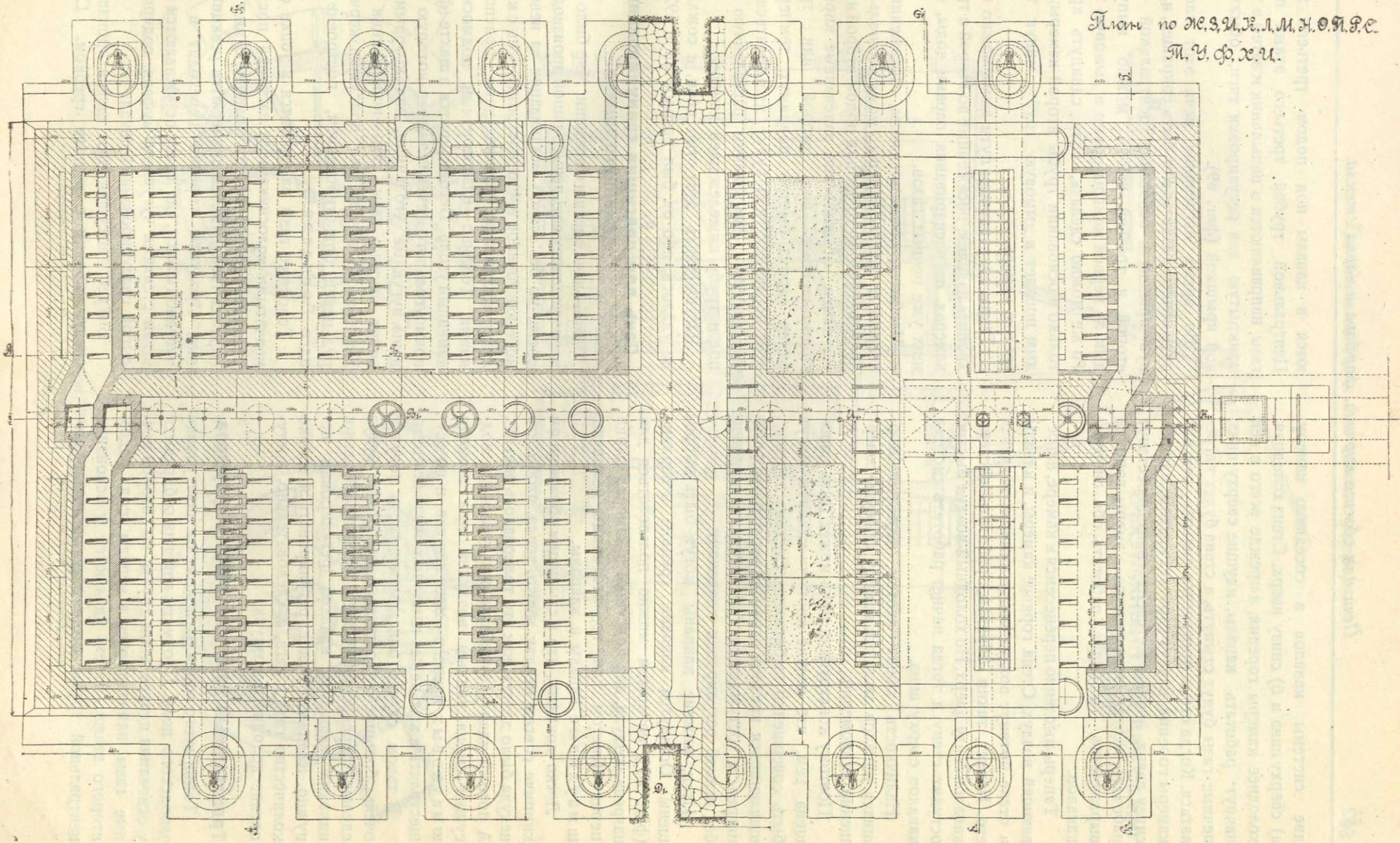
Вот этим вопросом надо заняться здесь. Итак, имеем камеру горения. Из камеры горения идут

16-КАМЕРНАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ ОБЖИГА ШАМОТОВОГО КИРПИЧА.



Фиг. 87

16-КАМЕРНАЯ ПЕЧЬ ДЛЯ ОБЖИГА ШАМОТОВОГО КИРПИЧА.



Планы по Ж.З.И.К.Л.М.Н.О.П.Р.С.
Т.У.Ф.Х.Ц.

Фиг. 88

две системы каналов в соседнюю камеру: а) сверху вниз и б) снизу вверх. Стена холодная, холоднее камеры горения, и прежде всего в ней начнут работать каналы, идущие сверху вниз; печные газы будут стынуть, а стена будет нагреваться. Когда стена прогреется сильнее, чем низ камеры горения, начнут работать каналы, идущие снизу вверх, каналы же сверху вниз перестанут работать. Когда температура камеры горения выравняется, то будут работать обе системы каналов.

Теперь мысленно перенесемся к камере, нагревающей воздух. Стена горячее камеры, и каналы в стене потянут воздух снизу камеры, нагревая его. Начнет, таким образом, работать система каналов снизу вверх. Но холодный воздух быстро остудит стену, и тогда начнет работать система каналов сверху вниз.

Наличность обеих систем перекрещивающихся каналов заставит камеру стынуть совершенно равномерно.

Поэтому конструкция печи может быть упрощена тем, что всякие кирпичи-клапаны могут быть совершенно выброшены. Система перекрещивающихся каналов гарантирует равномерный нагрев и остуживание обжигаемого кирпича без всякой регулировки клапанами.

Итак, нижние клапаны могут быть выброшены. Останутся клапаны средние и верхние (фиг. 87), которыми можно пользоваться для нагрева воздуха, для подсушки в камерах сырца перед обжигом или то, что немцы называют шмауховые каналы и клапаны.

Легко доказать, что в стынущем обожженном кирпиче совсем не так много тепла, чтобы его некуда было девать, как это толковалось раньше. А потому идея употреблять это тепло для подсушки сырца теплым воздухом при помощи шмауховых каналов—идея ложная, и ее осуществлять в кольцевых камерных печах не стоит.

В таком случае описываемая печь получит очень большое упрощение: в ее стенах будут сделаны перекрещивающиеся каналы и только; никаких клапанов, никакой регулировки ненужно. Клапаном будет регулироваться только количество газа и тяга, а, следовательно, поступление холодного воздуха

Трехэтажный горн для обжига фарфора.

Топки этого горна расположены ниже уровня заводского пола. Продукты горения собираются у основания центральной трубы, по которой печные газы направляются в каналы под подом второго этажа. Затем удаляются у основания центральной трубы второго этажа и направляются в каналы под подом третьего этажа. Центральной трубой третьего этажа печные газы направляются в напыльник и затем в трубу, прикрытую для регулировки тяги, обыкновенной крышкой (фиг. 89).

Во время нагревания печи этот сложный путь печных газов может быть сокращен, и, сдвинув крышку в основании центральной трубы второй и третьей камер, можно выпустить дым из первой камеры прямо в дымовую трубу. То же можно сделать, если сдвинуть крышку только в основании трубы второй камеры; тогда дым попадет в дымовую трубу, минуя только третью камеру.

Таким сокращением пути дыма можно предохранить изделия, посаженные во второй и третьей камерах, от распаривания парами воды, остывших уже печных газов.

Чтобы дожечь предметы, посаженные во вторую и третью камеры, можно использовать дополнительные топки под подом второй и третьей камер, обыкновенно заделанные кирпичом. Подброшенные под второй или третьей камер дрова быстро поднимут температуру этих последних, ибо будут пользоваться горячим воздухом, омывающим раскаленную топку, под и трубу нижележащей камеры.

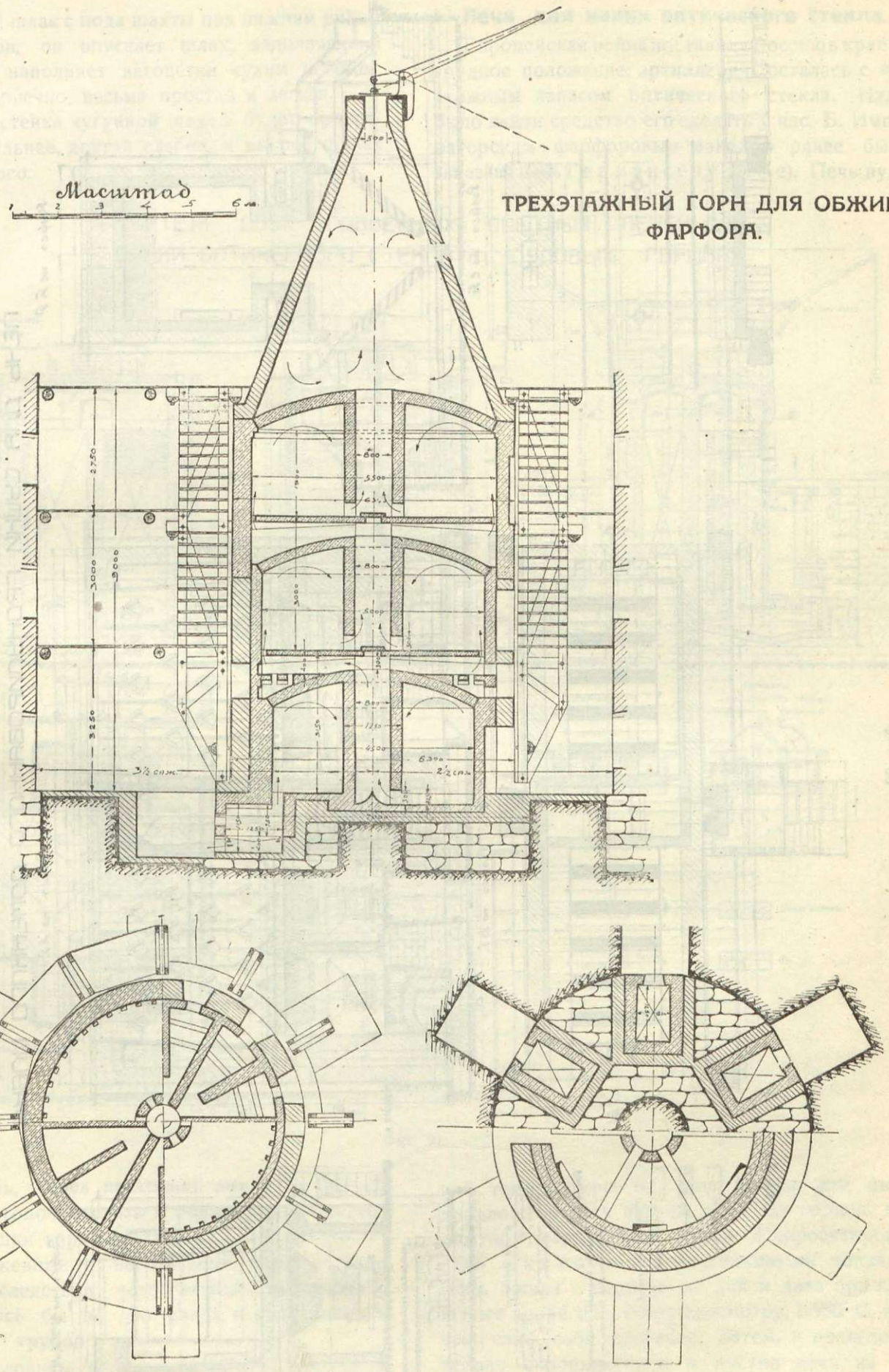
Осуществить этот тип печи, к сожалению, не удалось, ибо он был разработан в 1920 г.

Печь для подсушки гранулированного доменного шлака.

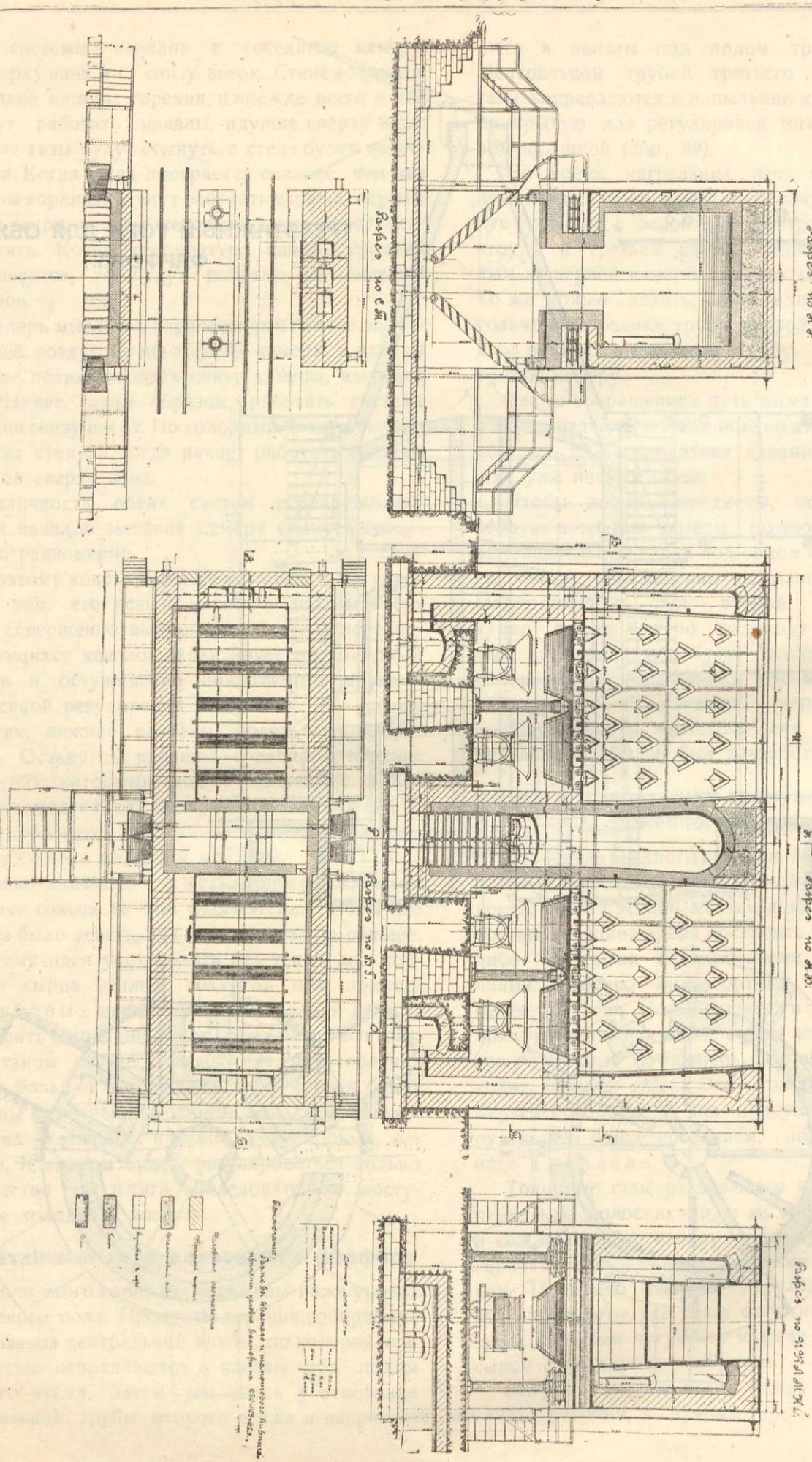
Это—печь военного времени. Мне было поставлено условием дать печь большой производительности, но без всякой механизации за невозможностью в военное время построить печь с какими-либо сложными механическими приспособлениями. Топливо—низкосортный подмосковный каменный уголь. Песок сушится в шахте (фиг. 90) прямоугольного сечения, через которую проведены чугунные угольники, под которыми проходят печные газы. Это—конструкция печей Керченского завода для подсушки керченских руд перед брикетированием, построенных по идее Грендаля.

Топочные газы развиваются в топке со ступенчатыми колосниками, а из топки поступают в сожигательную камеру, имеющую вид мешка горячих газов, где заканчиваются реакции горения. Продукты горения переходят в пазуху чугунной шахты, где сразу остуживаются холодными стенками чугунного муфеля, содержащего сырой гранулированный шкал.

Выгреб высушенного шлака производится снизу рабочим с ручным гребком. Сгребая



Фиг. 89.



Фиг. 90.

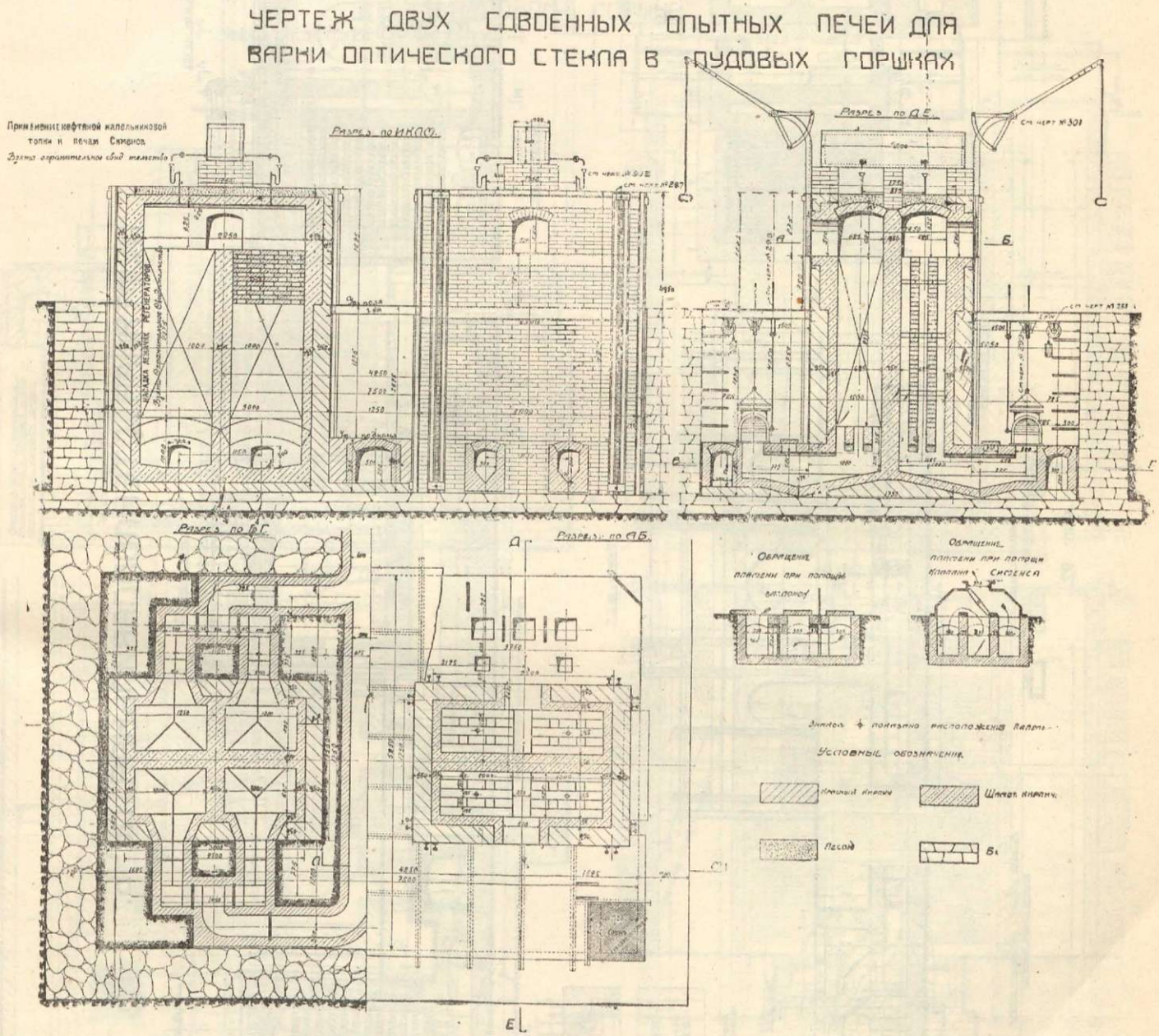
ПЕЧЬ ДЛЯ СУШКИ ГРОНУЛИРОВАННОГО ДОМЕННОГО ШЛАКА.

высохший шлак с пода шахты под нижним рядом угольников, он опускает шлак, заполняющий шахту, и наполняет вагонетки сухим шлаком Работа, конечно, весьма простая и легкая.

Одна стенка чугунной шахты будет прогреваться сильнее, другая слабее, и выгреб шлака пойдет косо.

Печи для варки оптического стекла.

Европейская война поставила Россию в крайне трудное положение: артиллерия осталась с ничтожным запасом оптического стекла. Надо было найти средство его сделать у нас. Б. Императорским фарфоровым заводом ранее была заказана печь Германсену (Ифе). Печь нуж-



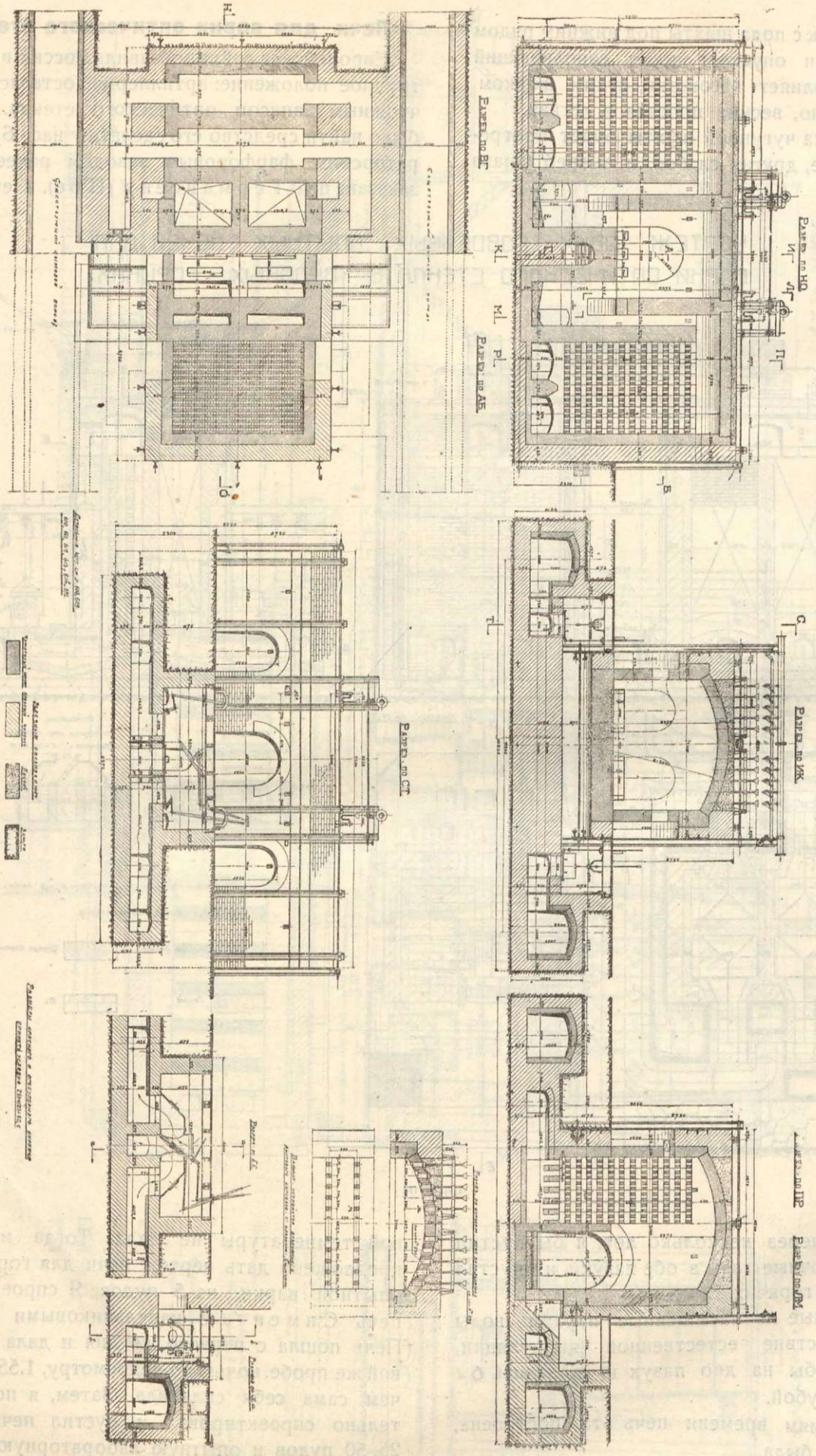
Фиг. 91.

Теперь, через несколько лет, я бы пустил горячие топочные газы в обе пазухи и опустил их в мешки горячих газов.

Остуженные и насыщенные парами воды газы, вследствие естественной циркуляции, спустились бы на дно пазух и удалялись бы дымовой трубой.

По условиям времени печь эта построена, кажется, не была.

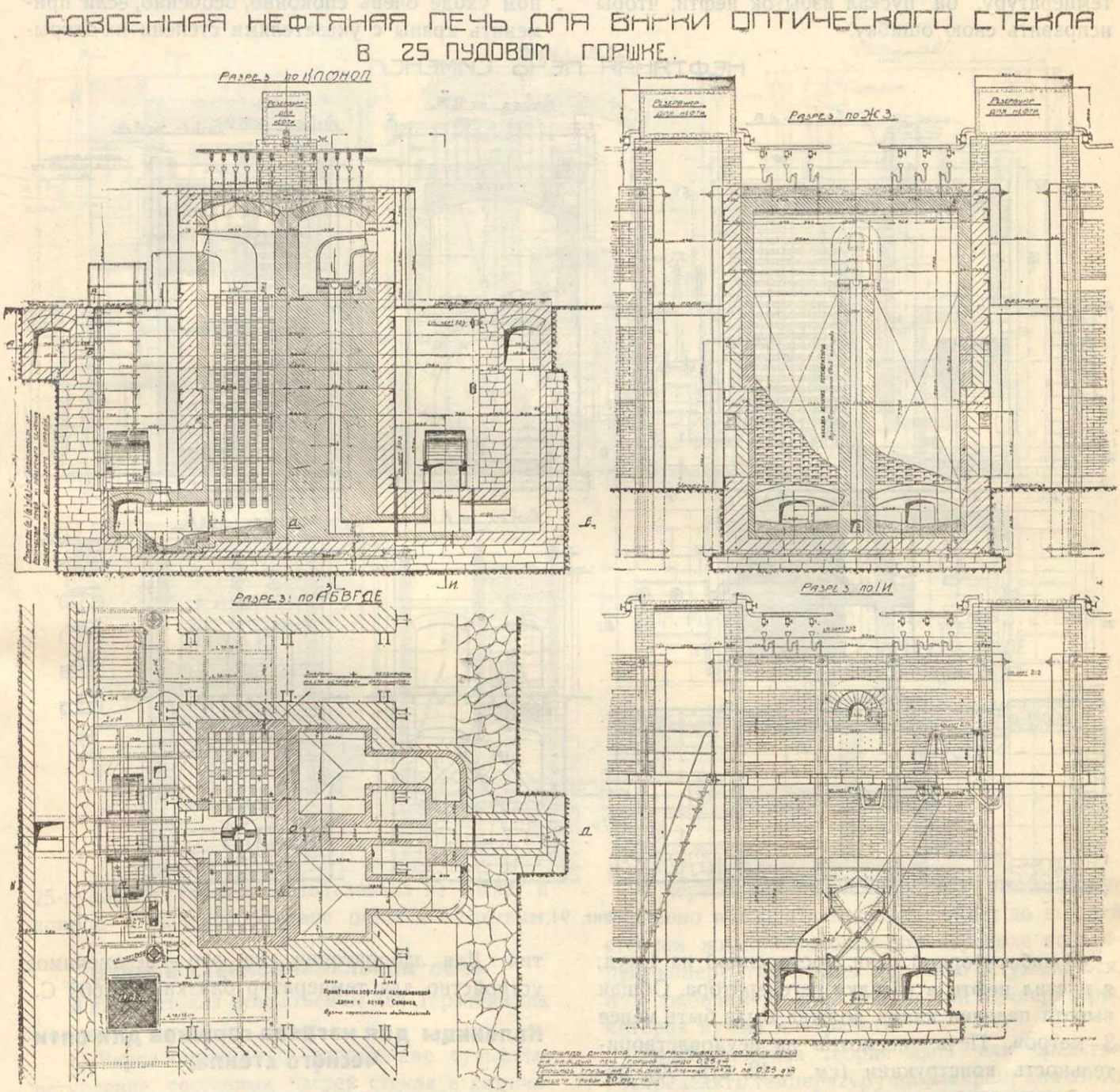
ной температуры не дала. Тогда мне было предложено дать чертеж печи для горшка, для опытной варки, на 5 пудов. Я спроектировал печь Сименса с капельниковыми топками. Печь пошла с первого же дня и дала при первой же пробе, ночью по недосмотру, 1.550° С, при чем сама себя сплавила. Затем, я последовательно спроектировал и пустил печи на 10, 25, 50 пудов и опытную лабораторную печь на



Фиг. 92.

1 пуд (фиг. 91, 92, 93 и 94). Регулирование температуры капельниками оказалось настолько совершенным, что во всех этих печах я повторил одну и ту же конструкцию, проверенную последовательно на трех типах печей. Когда в производстве оптического стекла оказались

революции продолжали работать мои печи. Система отопления металлургических печей капельниками была совершенно заброшена на русских заводах. Я вынужден был воскресить эту идею, ибо во время войны трудно было даже купить форсунку. Практика показала, что



Фиг. 93.

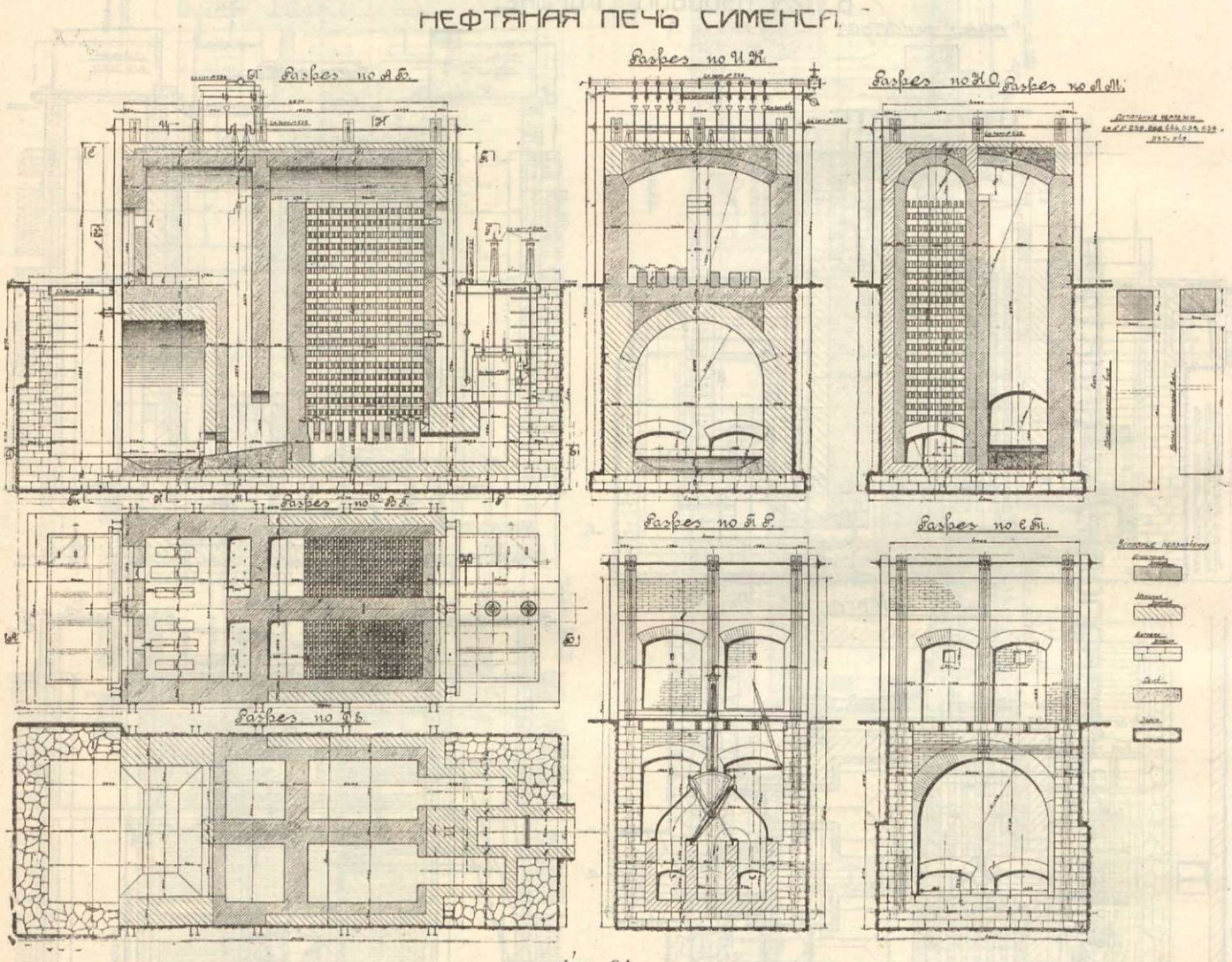
трудности и бывш. Императорский Фарфоровый завод вошел в соглашение с английским заводом Ченса, то последний прислал свои чертежи для печи Сименса на каменном угле; его печь была выстроена, но печи на нефти работали так безупречно, что печь Ченса не была пущена до революции, и во время

капельники заслуживают серьезного внимания. Капельник расходует нефти около 15 кг/час. Нефть бежит из крана струйкой около 1—2—3 мм диаметром, проходит сифон и вступает в печь. Капелька должна сгореть налету и, по возможности, не должна падать на под, где испаряясь она образует коксовый нагар, который прихо-

дится убирать. Фарфоровый завод в то время не имел канализации, и грунтовые воды были очень близки. В моем распоряжении было 2 метра для свободного падения капли нефти навстречу горячему воздуху. На поду бывал кокс только при недосмотре плавильщика, когда, опустив температуру, он пускал избыток нефти, чтобы исправить свою ошибку.

потому, что мне пришлось пускать печи Сименса без перекидного клапана Сименса, который был заменен системой пяти заслонок, показанных на фиг. 91.

В общем о печах Сименса с капельниками я скажу, что эти печи работают при внимательном уходе очень спокойно, особенно, если применить краны с указателями степени их откры-



Фиг. 94.

В лабораторной печи, построенной на 1 пуд, я пустил нефть в насадку регенератора. Общая высота падения капли должна была быть менее 3 метров. Печь, несмотря на неудовлетворительность конструкции (см. ч. III, стр. 90), пошла прекрасно и варила какое угодно стекло.

В более крупных печах на 50 пудов (фиг. 94), я предлагал капать нефть и против воздуха и по воздуху, надеясь на то, что при высоте падения 6 метров капля успеет сгореть и при движении по воздуху; удостоверться в этом мне, к сожалению, не удалось.

О степени затруднений механических мастерских Ленинграда во время войны можно судить

тия. Для лаборатории же это — незаменимое устройство для температур близких к 1.600° С.

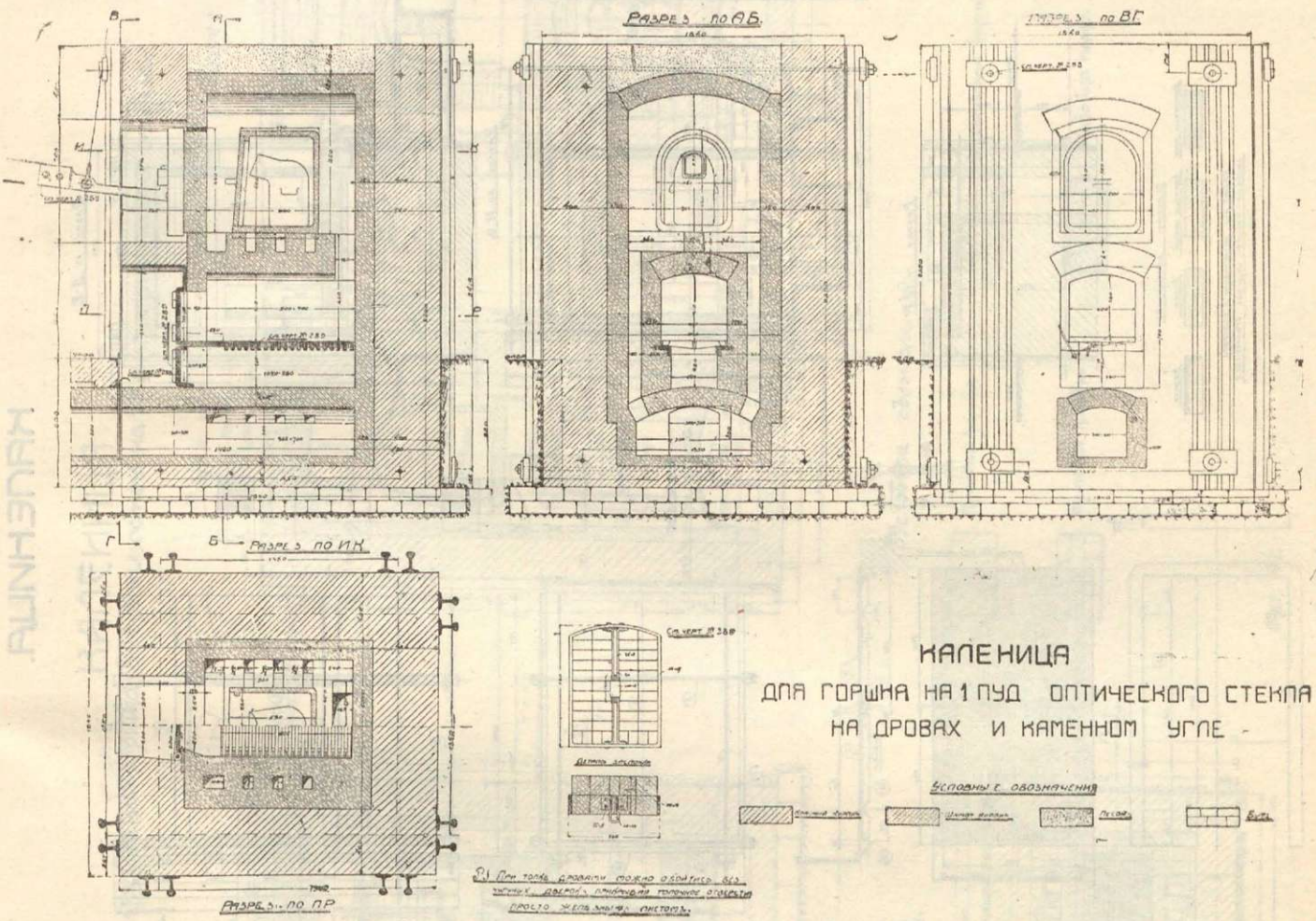
Калеиицы для нагрева горшков для оптического стекла.

Горшок из сырой глины сушится в продолжение нескольких месяцев при комнатной температуре; затем вносится в калеиицу и тут на медленном огне выкуривается, а потом нагревается до 800° С, при каковой температуре садится в стеклоплавильную печь, где доводится до температуры 1.450° С. Эта операция очень нежная. Для согрева можно применять печи муфельные (фиг. 95) и простые (фиг. 96 и 98), смотря по

тому, какой контингент рабочих мы имеем. Лопанье горшков во время варки—явление заурядное, и потому я проектировал каленицы того и другого типа. Для пудовых горшков мы успешно работали в муфельных каленицах, но обыкновенно обходились простыми. Спроектированная полумуфельная каленица (фиг. 97) для

Сообразно этой работе полость стеклоплавильной ванной печи должна быть разделена на две камеры: камеру высокой температуры и камеру низкой температуры, откуда берется стекло для работы.

Стекло медленно течет все время от окна для загрузки шихты к рабочим окнам.



Фиг. 95.

25-пудового горшка использована не была, и вопрос о наилучшем типе остался открытым.

Ванная стеклоплавильная печь.

В варке стекла существенны два термических момента:

1) Варка стекла, т.-е. разложение сульфата, вступление составных частей стекла в химические соединения, и затем осветление стекла и уничтожение свилей, т.-е. взаимное растворение струй стекла различного состава. Оба эти процесса варки стекла требуют возможно более высокой температуры печи.

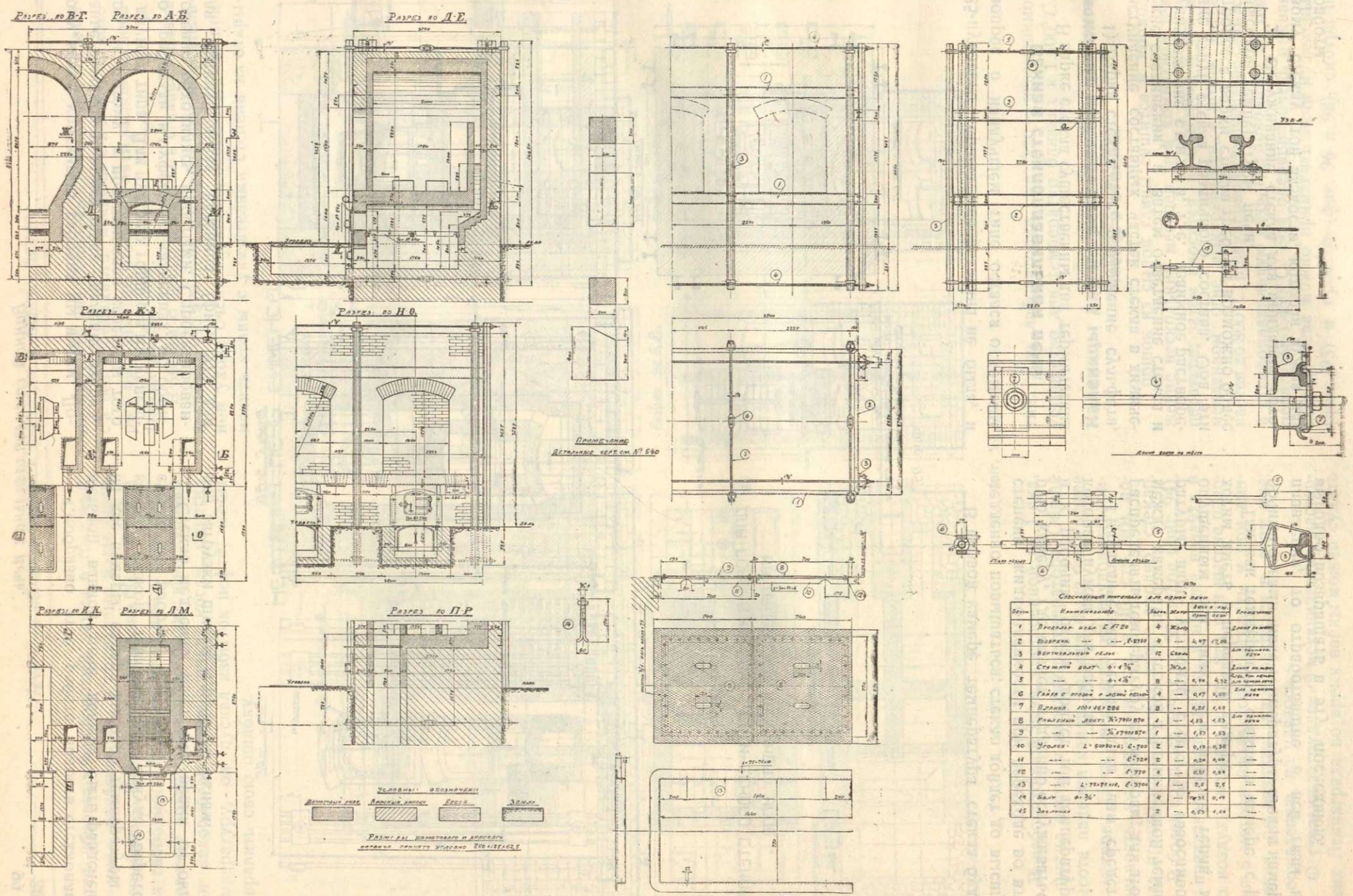
2) Остуживание стекла для придания готовому стеклу той вязкости, которая нужна для работы.

В первой камере температура стекла будет медленно повышаться; стекло дойдет до высшей степени жидкоплавкости при переходе во вторую камеру, где начнет медленно остуживаться, и к рабочим окнам дойдет той температуры, которая нужна для работы.

Гидравлическая теория дала нам средства распределять температуру по камерам; для этого между камерами высокой и пониженной температуры надо устроить стенку с газосливом, опущенным тем ниже, чем меньше тепла мы хотим иметь в передней камере.

Так как температура стекла в камере с рабочими окнами ниже температуры стекла камеры плавления, то отработавшие в ней газы невыгодно возвращать в эту последнюю.

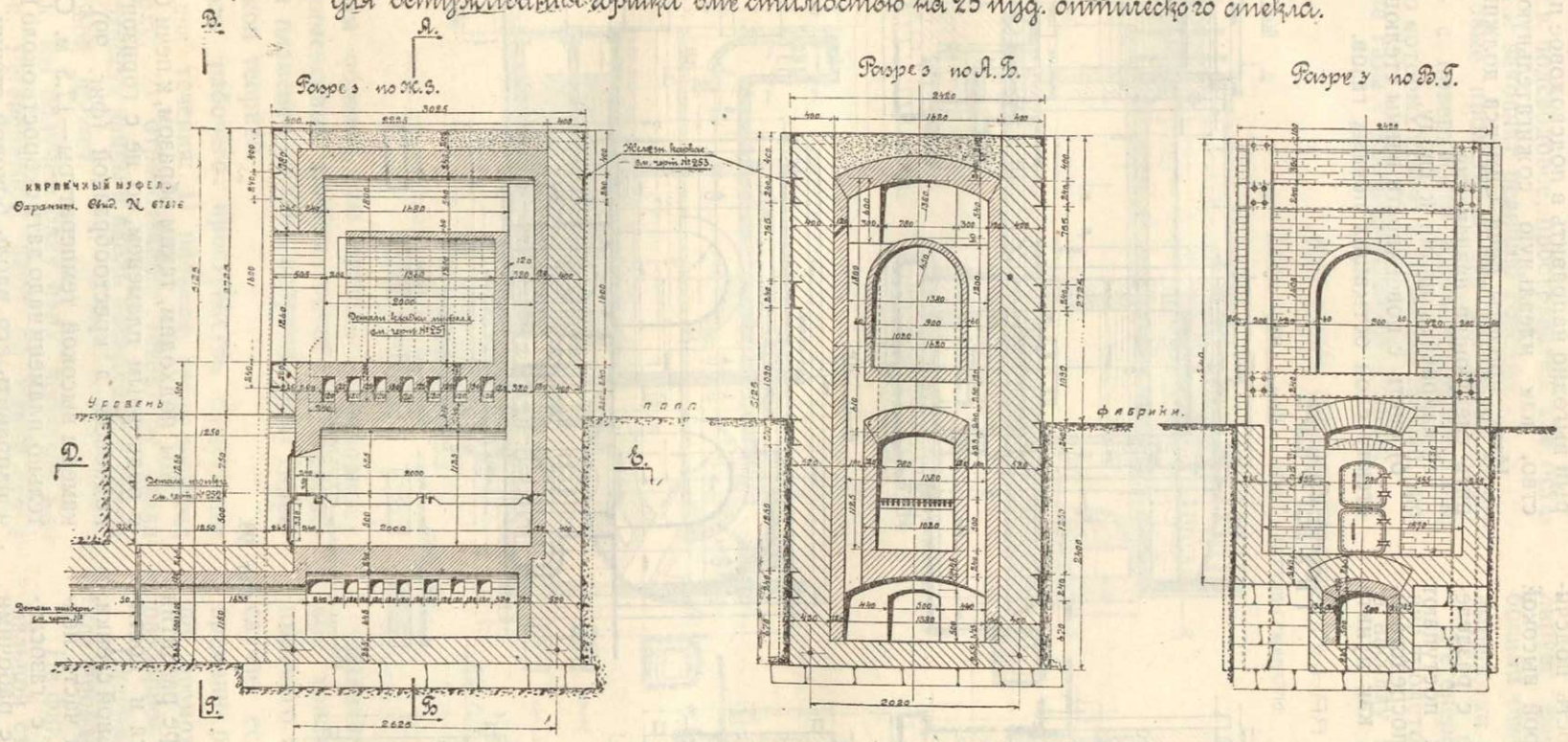
КАЛЕНИЦА.



Фиг. 96.

КАЛЕНИЦА

для остуживания горшка вместимостью на 25 пуд. оптического стекла.



Фиг. 97.

Выгоднее, если эти остывшие газы удалятся в атмосферу через рабочие окна.

Это соображение дает возможность подсчитать высоту газослива между камерой высокой и низкой температуры.

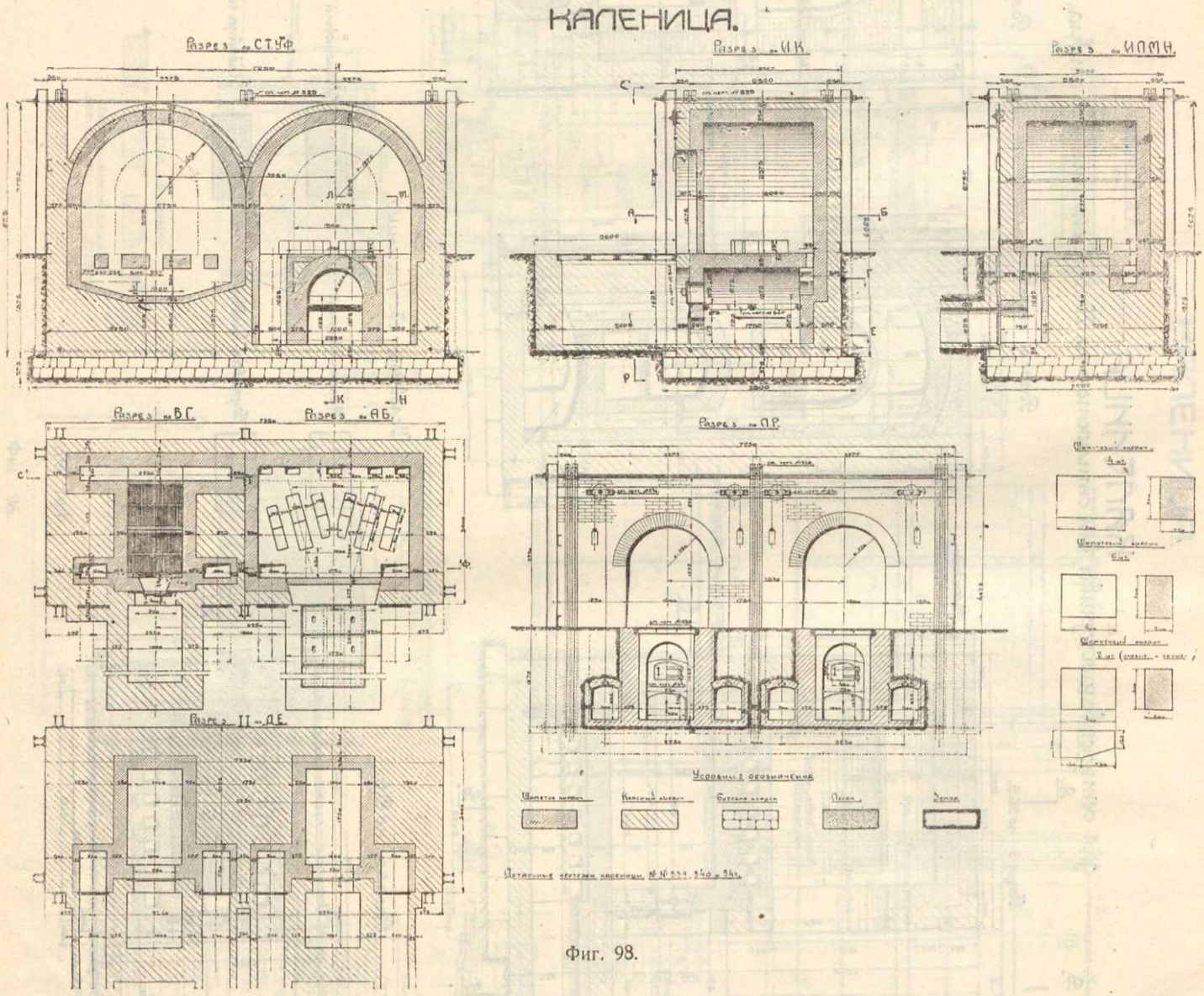
Итак, наша печь является печью с разделением пламени: весь газ и воздух поступают в камеру высокой температуры в непосредственном соседстве с завалочным окном, как пункте

ного окна. Это—донный поток остывающих газов, в отличие от пламенного потока, который выгодно направить в подсводовое пространство, как идеальную сожигательную камеру.

Итак, пролеты печи Сименса должны исполнять следующие назначения:

а) направить пламя к своду,

б) снять с поверхности ванны стелющийся по стеклу слой остывших печных газов.



Фиг. 98.

с самой низкой температурой. По мере развития пламени температура его повышается и достигает своего максимума около перевальной стенки, где делится на две ветви; небольшая часть печных газов под перевальной стенкой с газосливом поступает в переднюю часть с рабочими окнами; ее назначение—поддержать температуру этой части печи настолько, чтобы стекло не очень загустело; главная же масса печных газов течет по поверхности ванны в обратном направлении к пролетам, расположенным у завалоч-

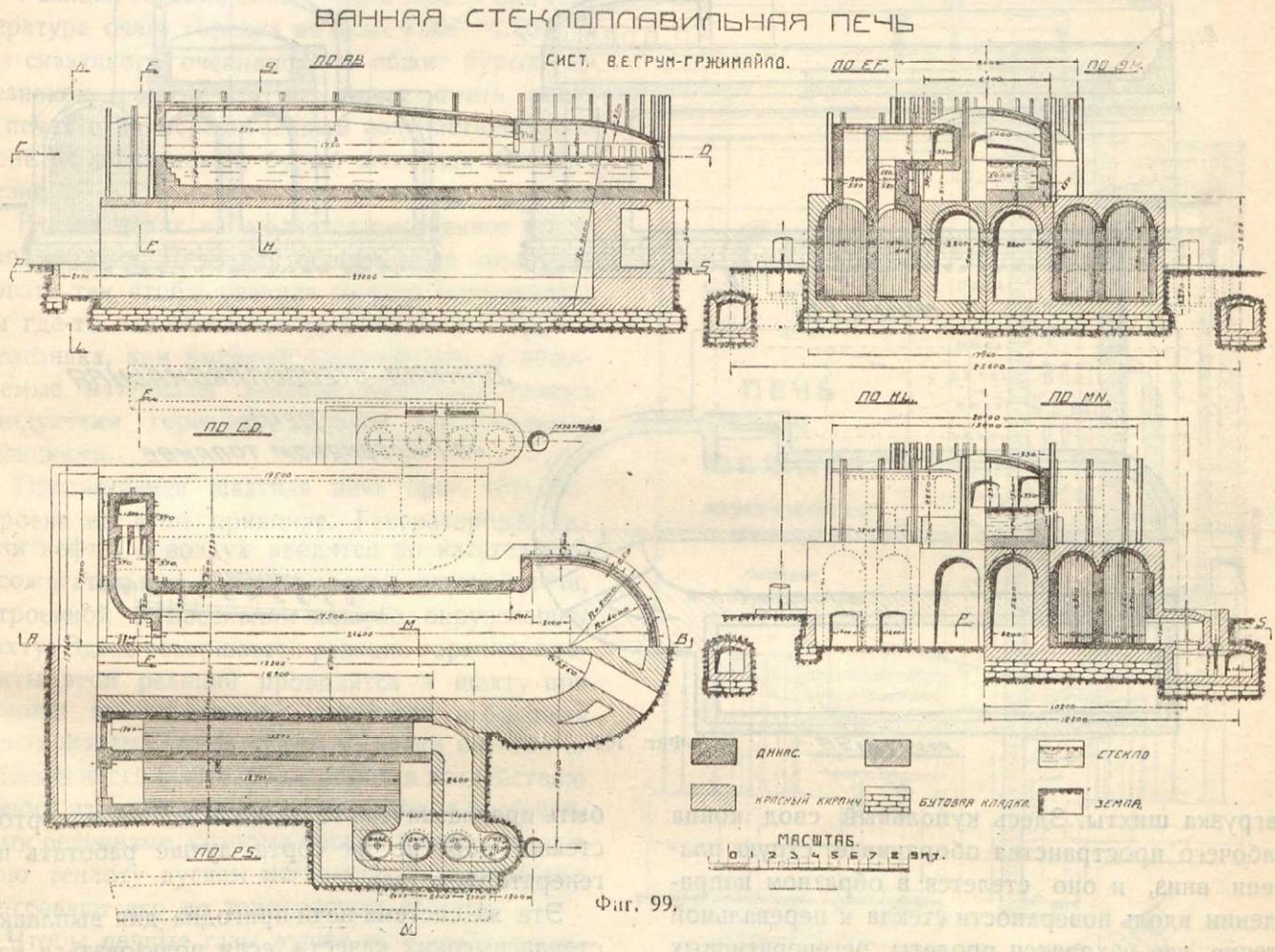
Мы подходим, таким образом, к печи Сименса с подковным пламенем, но не с горизонтальной подковой, а крестообразной (фиг. 99). Длина камеры высокой температуры—17,5 м. Следовательно, пламени надо дать скорость около 11 м/сек. и направить его вдоль боковой стенки, что, по опытам инж. Слесарева в Аэродинамической Лаборатории Политехнического Института, значительно увеличивает дальность полета газовых фонтанов. Температура языка пламени во время полета вдоль боковой стенки будет быстро по-

вышаться, удельный вес его газов будет уменьшаться, и пламя само собой поднимется в конце камеры в подсводовое пространство, где остановится и закончит реакцию горения.

Дымовые пролеты в это же время будут снимать с поверхности ванны холодные газы, на место которых станут опускаться свежие раскаленные газы с законченными реакциями.

раторы, газовый и воздушный, и нагрев в них газа и воздуха. Общая дымовая заслонка регулирует давление печных газов в камере с рабочими окнами, через которые уходит во время выработки стекла часть печных газов.

Регенераторы, при такой системе расположения пролетов, имеют вид лежачих регенераторов, и насадку их лучше сделать заборного типа.



Фиг. 99.

Таким образом, мы пришли к основному типу сименсовых ванных печей с подковообразным пламенем по типу, исправленному гидравлической теорией.

Вдоль рабочего пространства будут две реки, два течения: 1) пламени, сзади наперед и кверху; 2) отработавших газов, от свода к поверхности ванны и вдоль поверхности ванны в дымовой пролет.

Итак, мы получим одну пару пролетов или горелок. Регенераторы дают по одной струе нагретого воздуха.

Эти струи легко пропорционируются газовым и воздушным перекидными клапанами.

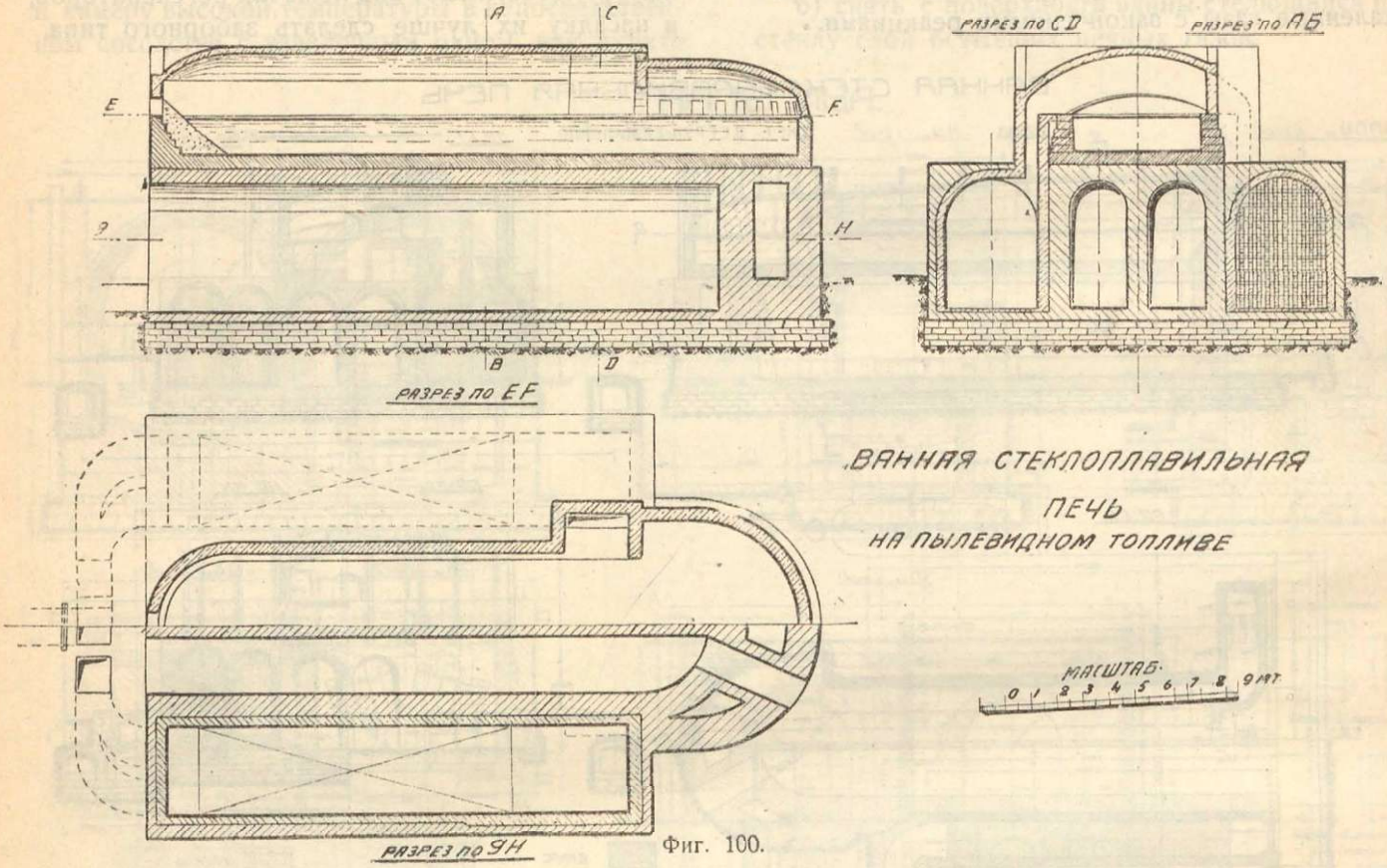
Отдельные дымовые заслонки, у пары газовых регенераторов и пары воздушных, пропорционируют поступление печных газов в регене-

Ванная стеклоплавильная печь на пылевидном топливе изображена на фиг. 100. Зола пылевого топлива будет портить стекло в том случае, если пылинки золы не будут иметь времени раствориться в ванне; поэтому надо, по возможности, обеспечить от золы пыли разборное отделение ванны.

Падение же золы пыли в области варки стекла пройдет безвредно.

На фиг. 100 показано разделение ванны перевальной стенкой на две части; при чем купольный свод поднят над уровнем краев ванн на 1.800 мм, свод же над варочным отделением поднят на 2.400 мм. В уступ, образуемый перевальной стенкой, вставлена форсунка, действующая сжатым до нескольких атмосфер воздухом, с производительностью, примерно, 72 п/час.

Эта форсунка получает нагретый до 800° С вторичный воздух то из одного, то из другого регенератора, т.-е. то с правой, то с левой стороны. Пламя форсунки направлено горизонтально вдоль свода и летит так, вдоль свода, 18 метров до поперечной стенки, где производится загрузка шихты. Здесь купольный свод конца рабочего пространства оборачивает струю пламени вниз, и оно стелется в обратном направлении вдоль поверхности стекла к перевальной стенке, где находятся пролеты регенеративных камер. Часть газов летит под перевальной стенкой в разборочное отделение, где уйдет в атмосферу через разборочные окна. Пыль пламени в главной своей массе будет осаждаться в плавильном отделении ванны и успеет раствориться в стекле, так что большого загрязнения стекла пылью ждать нельзя, но все-таки эта печь может быть предназначена только для дешевых сортов стекла, дорогие же сорта лучше работать на генераторном газе.



Фиг. 100.

Эта же система печи пригодна для выплавки стекла высоких качеств, если пользоваться как горючим нефтью.

ГЛАВА VI.

Печи различного назначения.

Печь для обжига каустического магнезита.

Температура распадения углекислой магнезии на магнезию и углекислоту определена проф. А. А. Байковым в 640° С.

При обжиге сырого магнезита при более высоких температурах, полученная окись магния теряет свойство энергично соединяться с водой в водную окись магнезии, и время схватывания так называемого каустического магнезита увеличивается. Поэтому совершенно естественно, что к обжигу каустического магнезита предъявляются весьма строгие требования: обжиг должен быть совершенно равномерен, и температура его не должна превышать 700—750 °С.

Практика существующих печей весьма плохо справляется с задачей равномерного обжига при низких температурах.

Например, для обжига бурых железняков требуется температура не выше 450—500° С. Удовлетворительного типа печи для такой работы до сих пор не создано. Почему? Потому что авторы этих печей не учитывают химической природы пламени.

Реакция горения совершается только при температуре очага горения не ниже 1.000—1.100° С. Из сказанного очевидно, что обжиг бурых железняков и магнезита не может иметь места в печах с непосредственным воздействием пламени на обжигаемый бурый железняк или магнезит.

В этих печах наблюдается постоянное угасание пламени. Печи для обжига надо конструировать так, чтобы реакция горения совершалась бы где-то вне обжигаемых магнезита и бурого железняка, при высокой температуре, и обжигаемые материалы должны омываться только продуктами горения с вполне законченными реакциями.

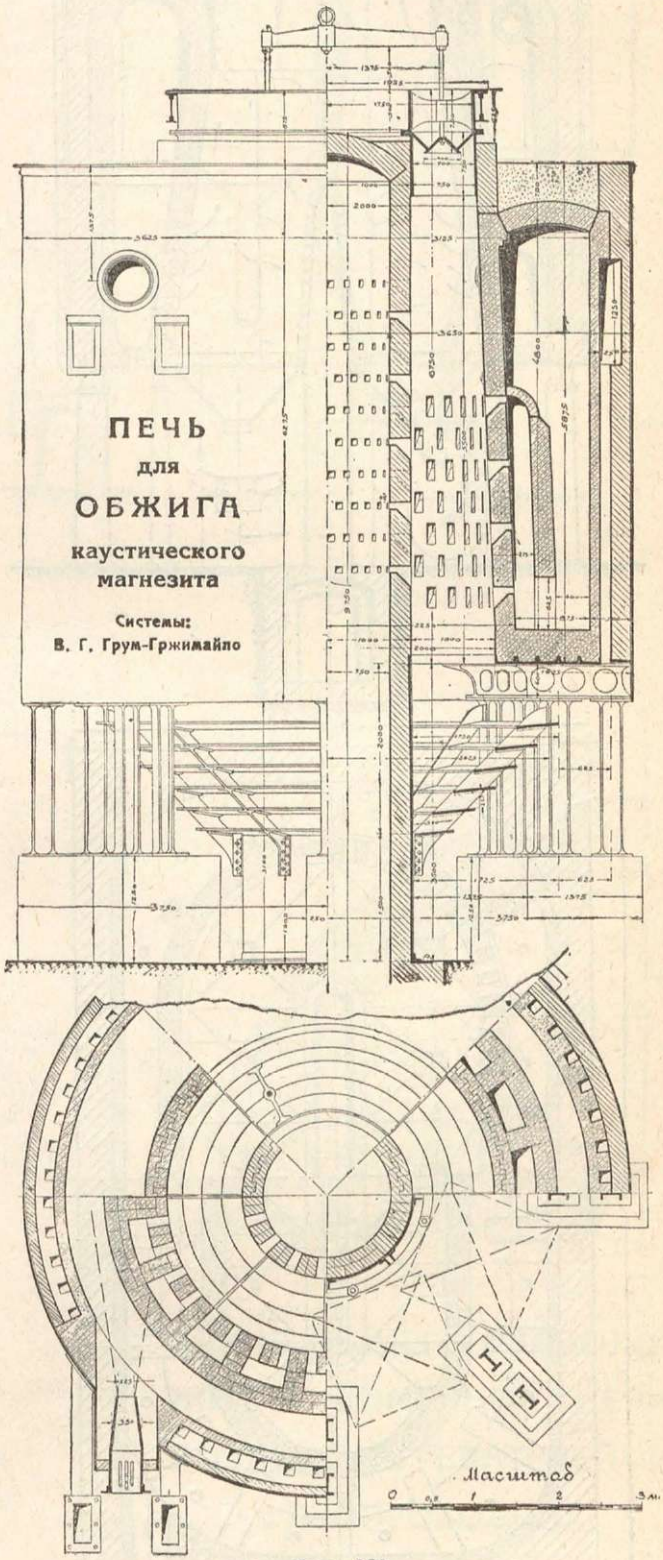
Предлагаемая шахтная печь (фиг. 101) построена на этом принципе. Генераторный газ (или нефть) и воздух вводятся по касательной в сожигательную камеру круглой шахтной печи, устроенной в массивном кожухе, окружающем шахту. Здесь совершается реакция горения; продукты этой реакции проводятся в шахту при помощи многих мелких отверстий в боковых стенах шахты. Таким образом, куски магнезита, заполняющего шахту, подвергаются воздействию мелких язычков раскаленных газов, с законченными реакциями, которые весьма быстро отдают свою теплоту кускам магнезита и равномерно прогревают его до температуры обжига.

Чтобы печные газы лучше проникали в средину печи и вся толща магнезита лучше и равномернее прогревалась бы до температуры обжига, отработавшие газы выпускаются не кверху, как это делается обыкновенно, а книзу. В центре шахты поставлена высасывающая железная труба, так что печь работает с обращенной тягой. Колошниковое устройство состоит из кольцевой засыпной воронки.

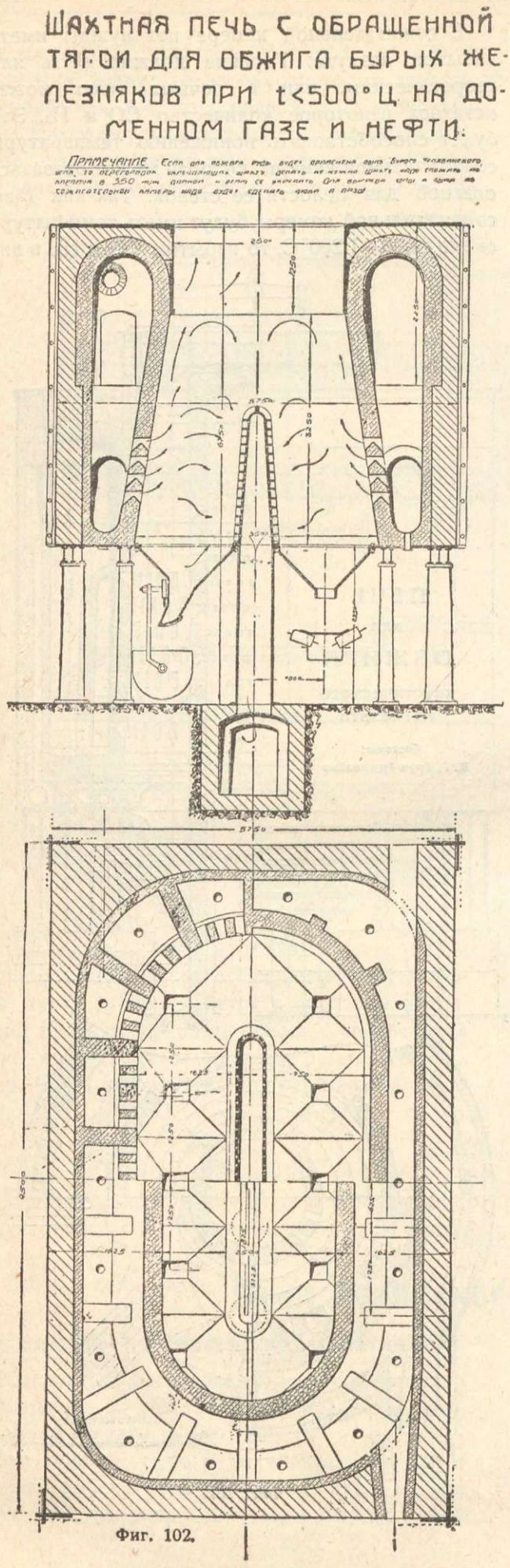
Выгрузка производится вручную со ступенчатой колосниковой решетки. При желании можно, конечно, устроить ее вращающейся от привода и тогда применить механическую выгрузку.

Ступенчатая решетка дает возможность совершенно равномерно опускать шихту обжигаемого магнезита в шахте печи.

В сожигательной камере нет нужды иметь избыток воздуха. Горение должно быть или теоретическим, или в печных газах может остаться некоторое количество CO и H_2. Это будет способствовать понижению температуры сожигательной камеры, которая может оказаться опасной для целости ее стенок. Так как газы сожигательной камеры будут иметь температуру около 1.000—1.200° С, то избыток CO и H_2, в них



Фиг. 101.



Фиг. 102.

находящийся, моментально будет ликвидирован теплым воздухом, поднимающимся по шахте печи снизу. Чтобы предохранить наружные стенки сожигательной камеры от большого лучеиспускания, в стенках сделаны каналы для нагрева вторичного воздуха. Он всасывается вентилятором и вдувается в форсунку печи.

Спроектированная печь рассчитана на производительность 5.000 пудов в 24 часа.

Шахтная печь для обжига бурых железняков при температурах меньших 500° С.

Исследования профессора И. А. Соколова установили совершенно определенно, что восстановимость Fe_2O_3 падает, если ее прокалить при температурах выше 500°. Из сказанного очевидно, что все рудообжигательные печи, в полости которых, среди кусков руды, происходит реакция горения, построены на ложном принципе, ибо реакция горения требует очага горения с температурой не ниже 1.000°, иначе горение итти не может.

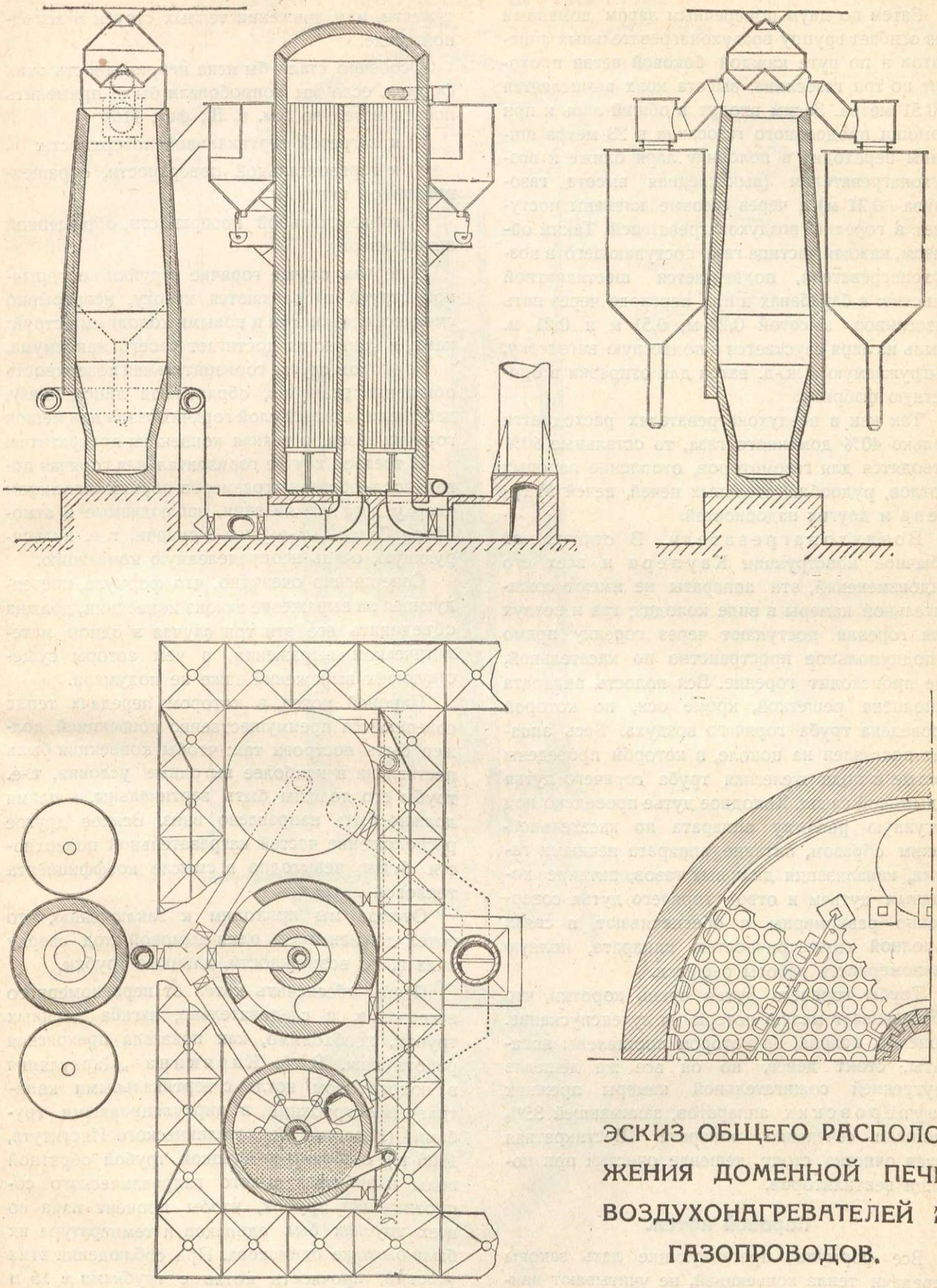
На фиг. 102 изображена шахтная печь с обращенной тягой для обжига руд при температурах меньших 500° С. В ней так же, как и в печи для обжига каустического магнезита, сделана отдельная сожигательная камера, отопляемая форсунками на доменном газе, нефти или пыли бурых углей. Удаление обожженной руды происходит при помощи воронок с затворами или в вагончик подвесной дороги, или на бесконечный ремень (см. фиг. 102).

Эскиз общего расположения доменной печи, воздухонагревателей и газопроводов.

В основу этого проекта (фиг. 103) положено: 1) правильно спроектированная сухая очистка доменного газа, 2) правильно спроектированный воздухонагреватель, 3) трубы горячего воздуха минимального протяжения.

Доменная печь спроектирована на 100 тонн в 24 часа, что для древесного угля представляет возможный максимум. Расход воздуха—около 4 м³/сек. Доменного газа—около 5 м³/сек. Доменный газ из печи поступает в два барабана, где фонтан доменного газа оставляет всю крупную колошниковую пыль. Затем доменный газ попадает в железный ларь, укрепленный к кожухам Кауперовских аппаратов, где доменный газ проходит газослив шириной в длину ларя, т.-е. по чертежу в 23 м. При температуре доменного газа в 270° высота газослива будет:

$$h = 3{,}0 \sqrt[3]{\frac{\left\{5\left(1+\frac{270}{273}\right)\right\}^2}{23^2.270}} = 3{,}0 \cdot 0{,}0888 = 0{,}27\text{ м.}$$



ЭСКИЗ ОБЩЕГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ДОМЕННОЙ ПЕЧИ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ И ГАЗОПРОВОДОВ.

Фиг. 103.

Затем по двум поперечным ларям доменный газ огибает группу воздухонагревательных аппаратов и по пути каждой боковой ветви проходит по три газослива, высота коих вычисляется в 0,51 метра. Засим входит в общий ларь и при помощи продольного газослива в 23 метра ширины переходит в половину ларя ближе к воздухонагревателям (вычисленная высота газослива—0,21 м) и через газовые клапаны поступает в горелки воздухонагревателей. Таким образом, каждая частица газа, поступающего в воздухонагреватели, подвергается шестикратной очистке: в барабанах и при переходе через пять газосливов, высотой 0,27 м, 0,51 м и 0,21 м. Пыль из ларя спускается в подвесную вагонетку, выгружаемую в ж.-д. вагон для отправки в брикетную фабрику.

Так как в воздухонагревателях расходуется только 40% доменного газа, то остальные 60% отводятся для газомоторов, отопление паровых котлов, рудообжигательных печей, печей Мартена и других надобностей.

Воздухонагреватели. В отличие от обычной конструкции Каупера и всех его видоизменений, эти аппараты не имеют сожигательной камеры в виде колодца; газ и воздух для горения поступают через горелку прямо в подкупольное пространство по касательной, где происходит горение. Вся полость аппарата заполнена решеткой, кроме оси, по которой проведена труба горячего воздуха. Весь аппарат поставлен на цоколе, в котором проведены взятые с пода железная труба горячего дутья и дымовой канал. Холодное дутье проведено под чугунную решетку аппарата по касательной. Таким образом, питание аппарата печными газами, канализация дымовых газов, питание холодным дутьем и отвод горячего дутья совершенно равномерны и обеспечивают, в связи с полной симметричностью аппарата, полную равномерность работы решетки.

Трубы горячего дутья очень коротки, что обеспечивает малую потерю на лучеиспускание. Конечно, цоколь, на котором поставлены аппараты, стоит денег, но он все же дешевле внутренней сожигательной камеры прежних Кауперовских аппаратов, занимавшей 35% площади сеченения аппарата. Шестикратная сухая очистка стоит дешевле очистки при помощи вентиляторов.

Паровой котел.

Все формулы, претендующие дать законы передачи тепла конвекцией, не учитывают движения конвекционных струек под влиянием силы тяжести, или движения теплых струек в холодной среде.

Особенно стала бы ясна непригодность этих формул, если мы попробовали бы их применить последовательно (см. ч. III, фиг. 116):

а) к нагретой вертикальной поверхности;

в) к горизонтальной поверхности, обращенной лицом книзу, и

с) горизонтальной поверхности, обращенной лицом кверху.

В первом случае горячие струйки непрерывной струей направляются кверху, непрерывно сменяясь все новыми и новыми холодными струйками, и конвекция достигает своего максимума.

Во втором случае горизонтальная поверхность обширных размеров, обращенная лицом книзу, даст неподвижный слой горячих газов или мешок горячих газов, и всякая конвекция прекратится.

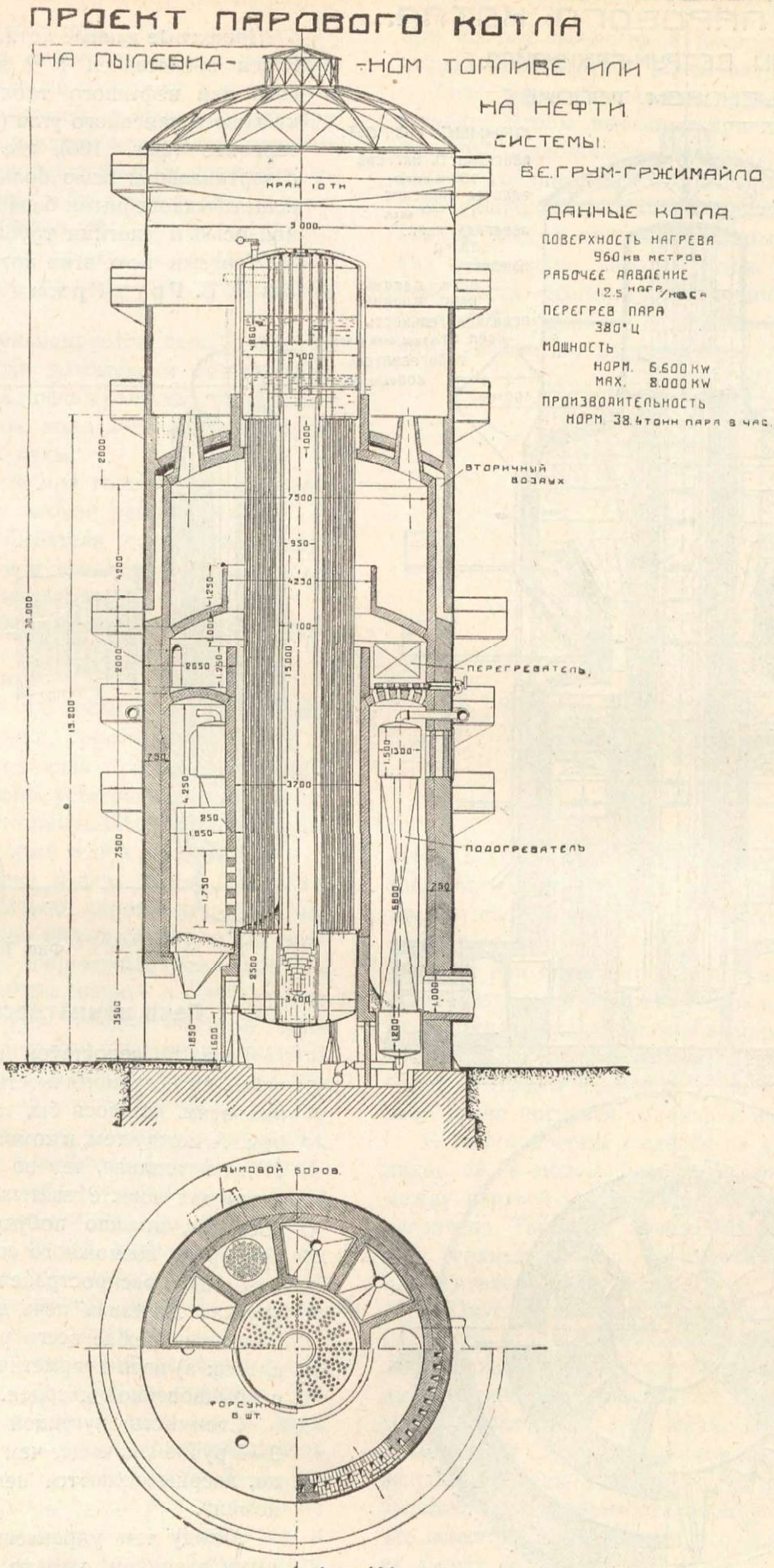
В третьем случае горизонтальная горячая поверхность обширных размеров, обращенная лицом кверху, даст все явления, наблюдаемые в атмосфере Сахары, т.-е. ямы и смерчи, т.-е. пульсирующую, очень неопределенную конвекцию.

Совершенно очевидно, что формула, претендующая на выражение закона конвекции, должна объединить все эти три случая в одном математическом выражении, о чем авторы существующих выражений даже не подумали.

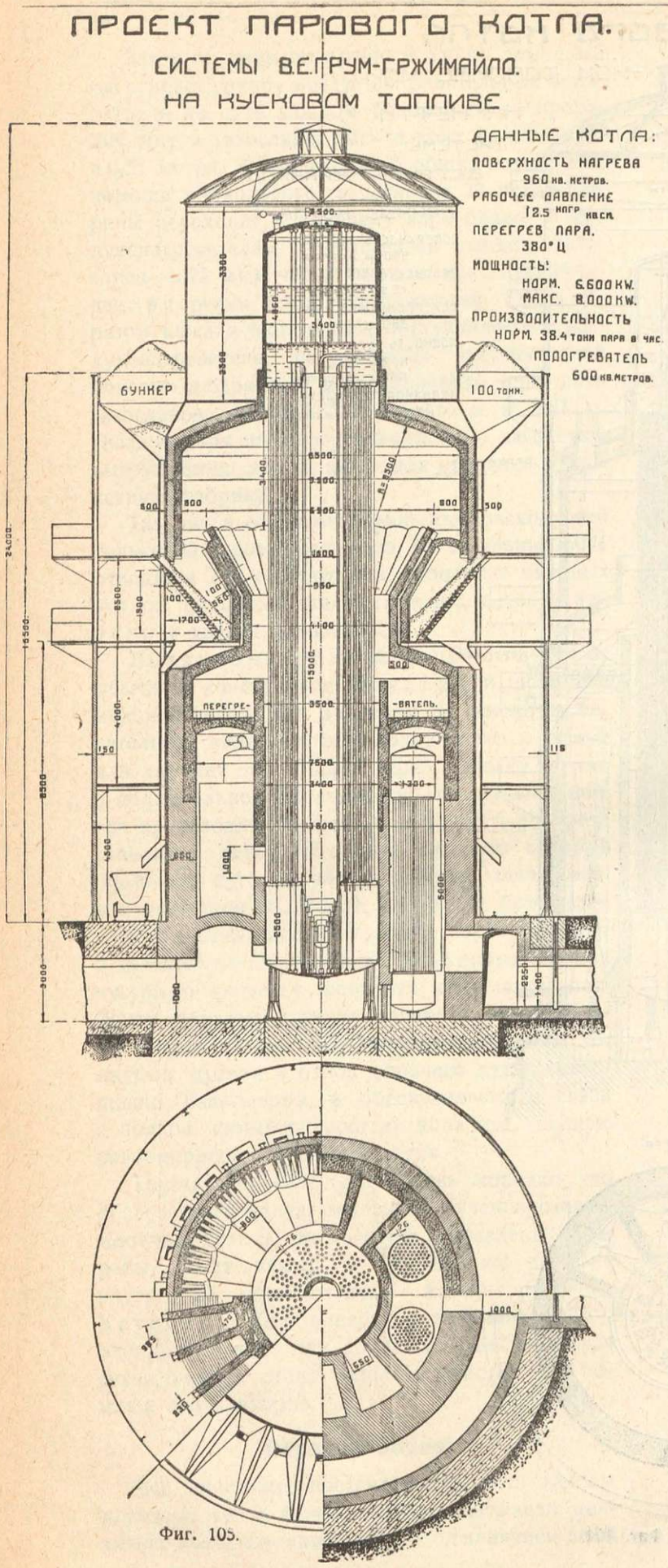
Паровой котел, в котором передача тепла совершается преимущественно конвекцией, должен быть построен так, чтобы конвекция была поставлена в наиболее выгодные условия, т.-е. трубы его должны быть вертикальны, а пламя должно быть направлено вниз. Всякое другое расположение частей нагревательной поверхности будет невыгодно в смысле коэффициента тепловой передачи.

Отсюда мы приходим к заключению, что котел должен иметь один дымовой ход сверху вниз и, по возможности, длинные трубки.

Чтобы обеспечить котел от неравномерного нагревания, а следовательно, изгиба длинных трубок, необходимо, как показала прекрасная работа инж. В. А. Карякина „Циркуляция в водотрубном котле с вертикальными кипятильными трубками и циркуляционными трубами“ (Известия Теплотехнического Института, 1925 г.), озаботиться мощной трубой обратной воды и добиться такого гидравлического сопротивления трубок, чтобы процент пара во всех трубках был одинаков и температура их была бы тоже одинакова. При соблюдении этих условий, прочность котла с трубками в 15 м длины обеспечена.


ПРОЕКТ ПАРОВОГО КОТЛА
НА ПЫЛЕВИД-
-НОМ ТОПЛИВЕ ИЛИ
НА НЕФТИ
СИСТЕМЫ
ВЕ.ГРУМ-ГРЖИМАЙЛО
ДАННЫЕ КОТЛА.
ПОВЕРХНОСТЬ НАГРЕВА
960 кв метров
РАБОЧЕЕ ДАВЛЕНИЕ
12.5 НАГР/кв см
ПЕРЕГРЕВ ПАРА
380° Ц
МОЩНОСТЬ
НОРМ. 6.600 KW
МАХ. 8.000 KW
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ
НОРМ. 38.4 тонн ПАРА В ЧАС.
КРАН 10 ТН
ВТОРИЧНЫЙ ВОЗДУХ
ПЕРЕГРЕВАТЕЛЬ
ПОДОГРЕВАТЕЛЬ
ДЫМОВОЙ БОРОВ
ФОРСУНКИ 6 ШТ

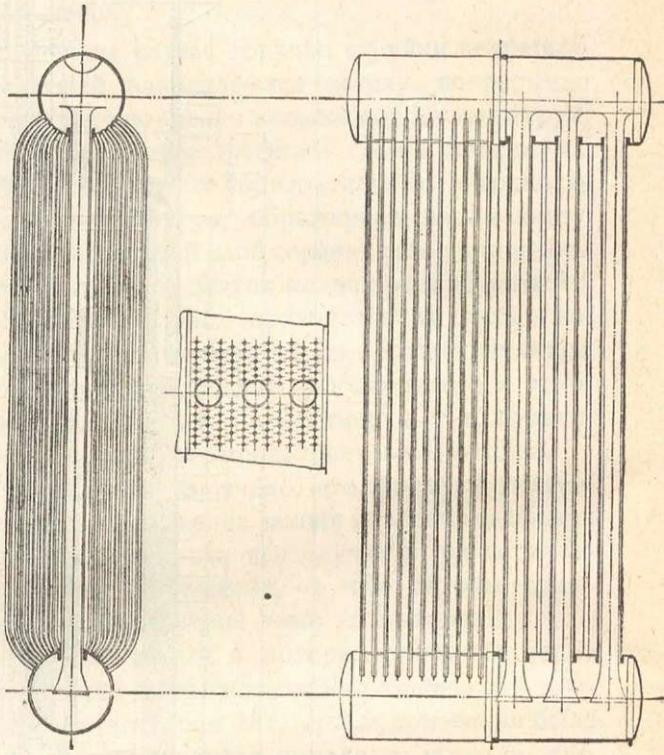
Фиг. 104.



Фиг. 105.

Проектные данные котла указаны на чертеже. Котел представлен в 2 вариантах для пылевого или нефтяного топлива (фиг. 104) и для кускового каменного угля (фиг. 105) и в третьем варианте (фиг. 106), где тяжелые барабаны с вертикальной осью большого диаметра заменены обыкновенными барабанами с горизонтальной осью и многими трубами обратной воды.

Чертежи всех этих котлов и расчет их сделан А. В. Грум-Гржимайло.



Фиг. 106.

Печи комнатного отопления.

Главный недостаток наших комнатных печей— их неэкономичность и трудность управления этим, казалось бы, таким простым прибором. А между тем, в комнатных печах сжигается больше топлива, чем во всех наших фабриках и заводах вместе взятых, что одно уже, казалось бы, должно побудить нас довести этот прибор до возможного совершенства.

Самым распространенным типом является круглая железная печь для отопления комнат. Эти печи прежде всего распределяются на два класса: а) печи с герметичной дверцей и б) печи с обыкновенной дверцей.

Стоимость чугунной герметичной дверцы 3—5 рублей, и, чаще, чем это было бы желательно, дверцы делаются негерметичными „из экономии".

Между тем управление печами с герметичными дверцами гораздо легче, чем с дверцами

простыми, что станет нам совершенно ясным, если мы обратим внимание на то, что печь с герметичной дверцей избавляет нас от очень большой заботы—дожечь в печи остатки древесного угля и не студить печь или не наделать угара. Имея печь с герметичными дверцами, мы можем, не закрывая трубу, закрыть печь, и уголь в печи очень медленно догорит за счет просасывающегося через щели воздуха. Когда в топливнике не останется раскаленного угля, трубу надо закрыть.

Этим путем ликвидируется самый трудный период топки, когда дожигаются остатки древесного угля и через печь пропускается напрасно десятерной избыток холодного воздуха, студящий нагревшуюся печь.

Избыток воздуха при горении представляет коренную причину плохой работы печей.

Между тем, обыватели совсем не отдают себе в этом отчета и топят печи с настежь открытыми дверцами.

Количество воздуха, поступающего в печь, зависит:

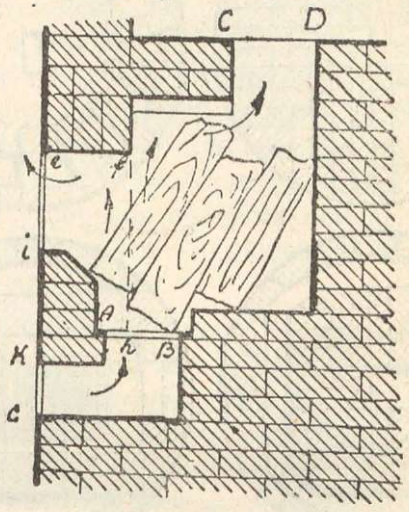
а) от силы тяги и

б) от величины той щели, которую мы оставляем во время топки, приоткрывая дверцу.

Раз только в топливнике полное горение и сильная тяга вполне установилась, то дверцу следует не только прикрывать, то надо закрывать и глазок, который в ней делается.

При такой топке в печь будет поступать минимум воздуха, и печь хорошо нагреется, ибо этот минимум всегда больше нужного для горения объема воздуха. А происходит это вследствие несовершенства работы дверцы в качестве поддувала. Действительно, скажите кочегару парового котла, чтобы он топил котел с приоткрытой дверцей. Он посмотрит на вас с изумлением. Он хорошо знает, что врывающийся через дверцу воздух, минуя топку, не только студит котел, но даже нарушает реакцию горения и способствует выделению черного дыма из дымовой трубы. Для правильности горения весь поступающий в топку воздух должен проходить через колосники и процеживаться через слой горючего. В обыкновенных комнатных печах этого именно и не делают; топки обыкновенно не имеют колосниковой решетки; дрова располагаются на поду, а воздух поступает через приоткрытую дверцу. Делают это по двум причинам. Герметическая дверца для поддувала и колосниковая решетка стоят лишних 3—5 рублей. С другой стороны, некоторые печники не справляются с задачей устроить поддувало и колосники так, чтобы печь можно было топить при плотно завинченной дверце: весьма часто дверца накаливается докрасна и даже дымит.

Мне также однажды пришлось сделать ошибку. Чтобы выяснить причину неудач, на фиг. 107 представлена ошибочная конструкция такого топливника, который прошу сравнить с топливником фиг. 108. Горящее на колосниках *AB* полено дает вертикальный поток горячих газов прямо кверху. Поток, соответствующий части решетки *Ah*, поднимаясь кверху (фиг. 107), ударится о перемычку *ef* и разделится на ветвь, направленную в хайло *CD*, и



Фиг. 107.

ветвь, которая будет стараться вырваться через заслонку в комнату; она же будет накаливать дверцу, если порог дверцы *i* высоко поднят над колосниками.

Пока при начале топки тяга не успела еще установиться при широко раскрытом поддувале *kc*, на уровне верхней кромки дверцы может получиться даже положительное давление, и печь будет не только нагреваться, но и дымить. Совсем иначе построен топливник фиг. 108:

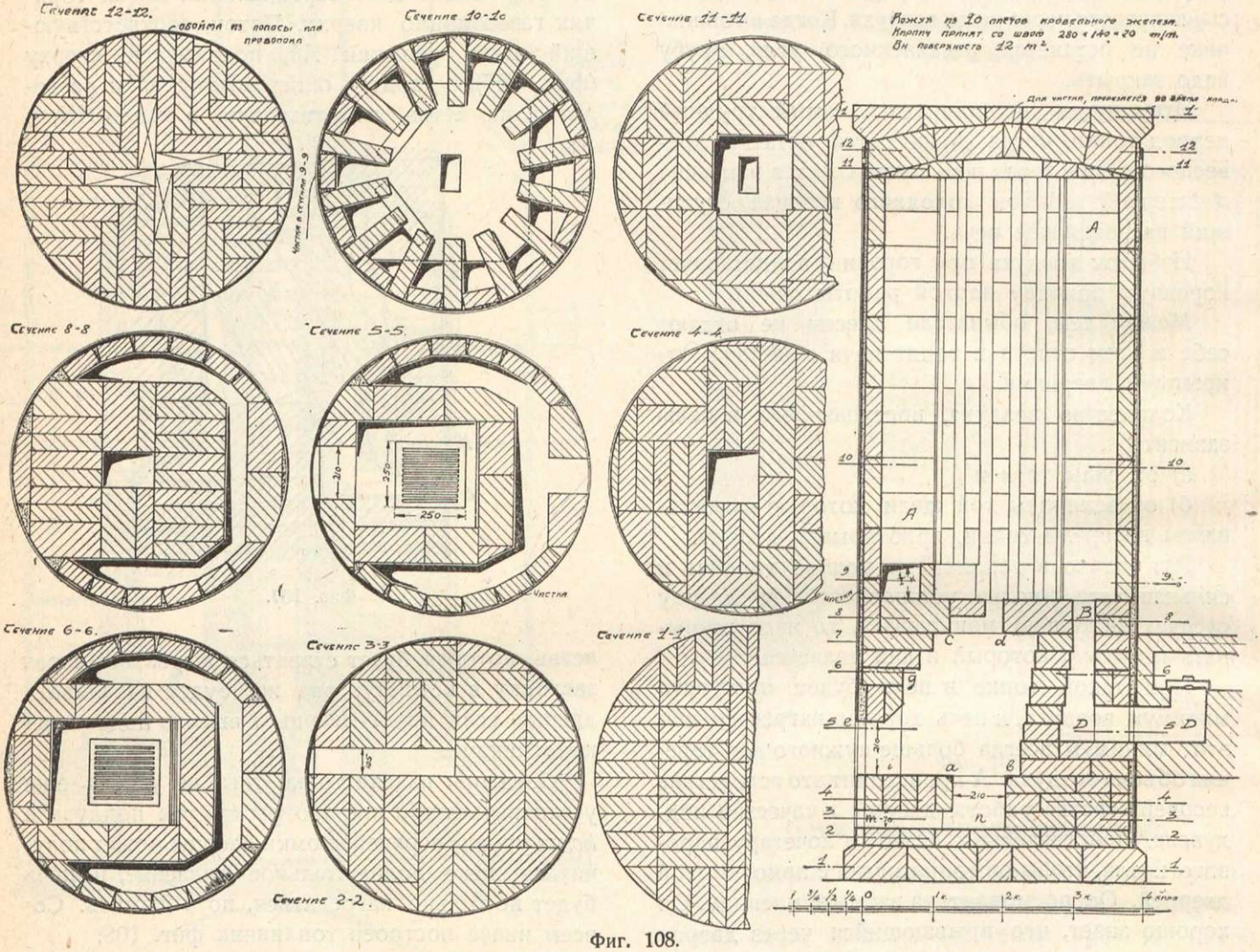
1) Порог дверцы *i* сделан на уровне колосников *ab*, а потому вертикальное расстояние между верхней кромкой дверцы *e* и хайлом *cd* увеличено. Такое расположение дверцы выводит верхний край ее из области возможного положительного давления.

2) Опустив из точки *c* перпендикуляр вниз, окажется, что колосниковая решетка расположена вправо от него; следовательно, вертикальные потоки пламени падают прямо в хайло. Что же касается струек пламени, которые получаются от передних концов дров, расположенных впереди колосников, то вертикальное расстояние *ci* и горизонтальное *gc* так велики, что можно быть уверенным, что ни одна струйка не лизнет дверец.

Итак, раз мы можем гарантировать, что печь будет исправно топиться и при завинченных дверцах, то устройство колосниковой решетки даст большие преимущества в вопросе об избытке воздуха, поступающего в топливник.

нее врывается с большой скоростью в топливник, ударяет в горящие дрова или уголь и, отражаясь от них, пролетает в хайло, будучи утилизирована в очень слабой степени. Чем дальше дрова стоят от дверцы, тем хуже утилизируется

ПЕЧЬ ДЛЯ КОМНАТНОГО ОТОПЛЕНИЯ БОЛЬШОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ.



Фиг. 108.

Другое преимущество, которое дают поддувало и колосниковая решетка печи, заключается в том, что колосники можно расположить в топливнике так, что дрова могут сгорать на том самом месте, на котором их положат или поставят при загрузке в печь. Не надо будет „мешать“ в печи, что необходимо делать при приеме воздуха для горения через дверцы.

Обыватели очень часто не отдают себе отчета, как должно „мешать“ в печи, чтобы сжечь дрова с наименьшим количеством избыточного воздуха и делают как-раз обратное тому, что следует.

Струя воздуха через глазок во второй дверце или через приоткрытую дверцу и щели вокруг

воздух, а потому дрова надо класть в печь, как можно ближе к дверцам. То же надо делать с головнями и углем. Процесс „мешания“ в печи состоит, следовательно, в непрерывном пододвигании топлива к дверцам; дверцы же надо закрывать плотно, ибо щелей вокруг второй дверцы достаточно, чтобы дать для горения нужное количество воздуха.

В продажных герметичных дверцах часто ошибочно плотно приделывают другую дверцу. Раскалившись она ходит в шарнирах так туго, что может быть закрыта только с большим трудом. При таком маневрировании со второй дверцей раскачивается вмазанная в окно рама дверцы, и герметичность дверцы нарушается.

Кстати сказать, укрепление рамы дверец при помощи проволок и глины очень несовершенно. При хорошем оборудовании печей надо отливать раму с ушками и привертывать ее к железному кожуху печи на асбестовый картон четырьмя болтиками. Это—небольшой расход, а герметичностью дверец, как увидим ниже, пренебрегать не следует.

Оставляя вокруг второй дверцы зазор в три миллиметра, а снизу в пять, мы получим площадь щелей, совершенно достаточную для топки печей без поддувала при вполне закрытой второй дверце с закрытым глазком, которого и делать, пожалуй, не стоит. Я говорил выше, что в печах с поддувалом можно совершенно избежать процесса мешания. И действительно, количество воздуха, поступающего в печь, здесь регулируется дверцей поддувала. Приоткрыв ее немного при сильной топке, мы получим струю воздуха большой скорости. Однако, эта скорость ликвидируется в канале *mn* (фиг. 108), и к колосникам воздух подойдет уже спокойно. Далее тяжелый холодный воздух вступит в топливник с высокой температурой, заполненный раскаленными легкими топочными газами. Совершенно очевидно, что вверх такой воздух не пойдет, а будет расстилаться по поду и сжигать дрова, лежащие на колосниках.

Из сказанного ясно, что условия горения в печи с поддувалом гораздо благоприятнее, чем без него.

Большим преимуществом этих печей является возможность топить их каким угодно топливом: дровами, каменным углем и торфом. Надо делать только колосниковую решетку с прорезами не шире 5—6 миллиметров, чтобы не терять мелочь каменного угля и торфа. Топочные газы из топливника через хайло проводятся обыкновенно в „обороты“ или „колодцы“, которых делается три, пять, семь, смотря по диаметру печи. Это—вертикально поставленный зигзагообразный ход, отдельные ветви которого разделяются стенками в $^1/_2$ кирпича. Наружные стенки печи делаются тоже в $^1/_2$ кирпича. Получается печь с очень большим количеством кирпича и очень малой поверхностью, омываемой печными газами. Притом первые колодцы прогреваются топочными газами высокой температуры; в последних—топочные газы нормально должны иметь температуру 125—150° С. Вступление пламени из хайла в лабиринт колодцев из совершенно холодного кирпича нарушает реакцию горения, и пламя делается, несмотря на избыток воздуха, сажистым и копотливым.

Под конец топки сажа эта в первых оборотах успевает сгореть. Последние же обороты никогда не прогреваются до степени горения сажи, и их забивает сажей настолько, что печи приходится чистить. Тление сажи в хорошо прогревшейся печи, когда труба уже закрыта, может быть причиной угара.

Неравномерность в прогреве колодцев вызывает однобокое расширение кладки печи и ее растрескивание. Растрескивание делает устройство воздушных ходов для душников непрочным, ибо в растрескавшейся печи душники начинают выносить в комнату угар. В спроектированной мною печи (фиг. 108) нагревание печи идет от верха к низу по всему сечению совершенно равномерно, печь трескаться не будет, но я все же отказался от устройства душников и предпочел для ускорения процесса остывания печи сделать стенки почти в $^1/_4$ кирпича без уменьшения их прочности.

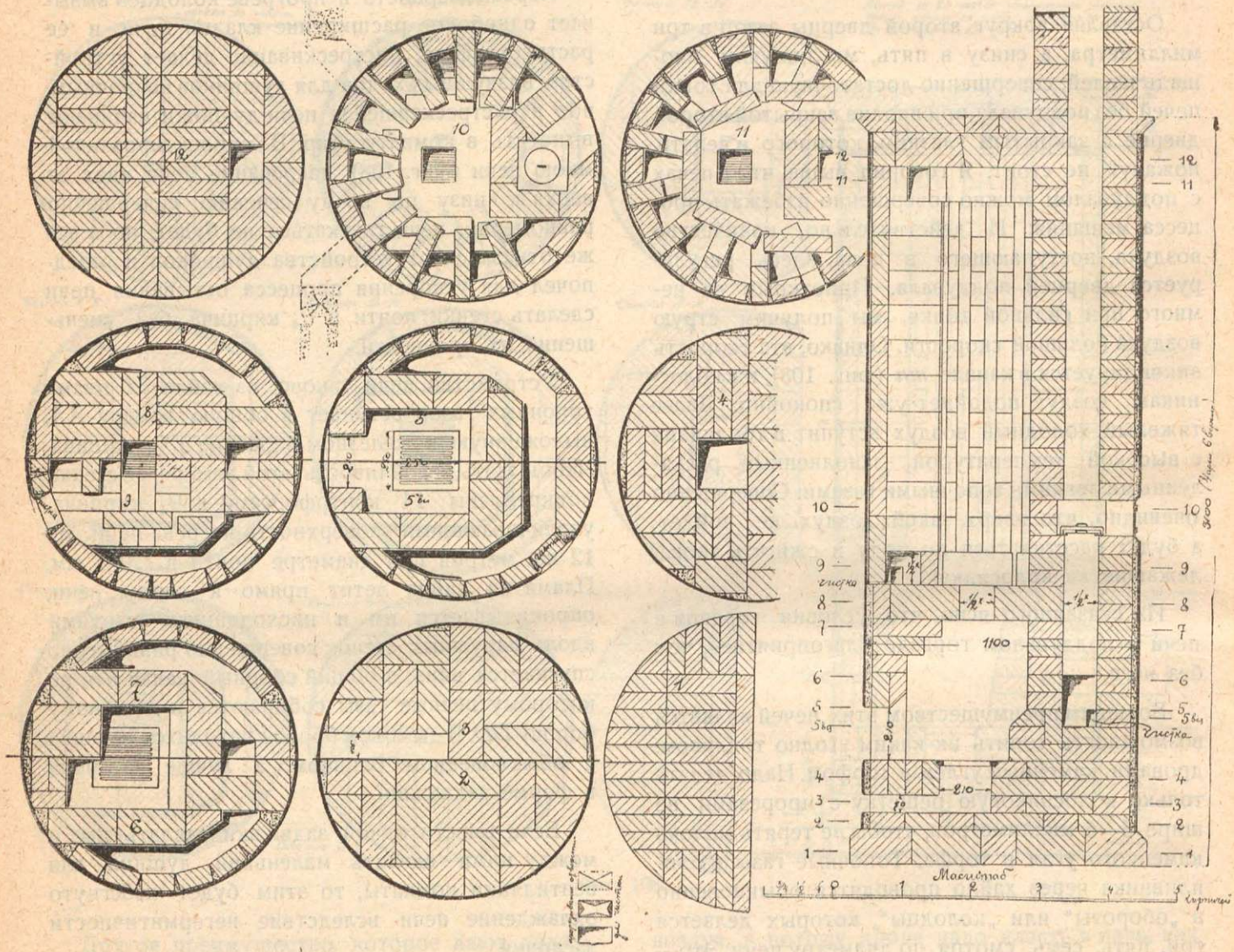
Устройство печи таково: из хайла *cd* пламя топочных газов вступает в общую камеру *AA*, выложенную в железном барабане в $^1/_4$ кирпича. Чтобы дать устойчивость этой камере, ее стенки подкреплены 14 контрфорсами в $^1/_4$ кирпича, увеличивающими поверхность нагрева печи до 12 кв. метров при диаметре почти в 1.100 мм. Пламя из хайла летит прямо к своду печи, опрокидывается им и нисходящими струями вдоль наружных стенок совершенно равномерно спускается вниз в общий сборный канал *BB*, по которому печные газы собираются к дымовому борову *DD*. В дымовом борове находится вьюшка с обыкновенном блинком, а лучше заслонка в форме задвижки.

Если вместо одной задвижки сделать две и между ними сделать маленький душник для вентиляции комнаты, то этим будет избегнуто охлаждение печи вследствие негермитичности заслонки.

Такое устройство печи гарантирует очень быстрый и равномерный ее прогрев, полное отсутствие копоти и сажи и прочность, несмотря на тонкие стенки. Направленные внутрь контрфорсы в $^1/_4$ кирпича толщиной представляют большой запас тепла и поддерживают температуру печи во время ее остывания, сообщая ей характер печи большой теплоемкости. Единственный недостаток печи тот, что верхняя часть камеры будет прогреваться сильнее нижней. Было бы приятнее, если бы было наоборот, но совершенно холодных частей в печи не будет, ибо дымовой канал *BB* опущен почти до уровня пода печи.

Приборов для уединения комнатной печи от дымовой трубы применяется четыре: 1) поворотная на шарнирах заслонка; 2) вкладная вьюшка с блинком; 3) задвижка и 4) полное отделение печи от трубы при помощи сдвигаемого патрубка и двух крышек для печи и дымового хода. Из этих четырех приборов только задвижка является одновременно и регулирующим тягу прибором. Регулировать же тягу чрезвычайно важно, ибо чем спокойнее воздух будет входить в печь, тем выше будет его утилизация; но задвижки делаются обыкновенно нестроганными и потому негерметичными. Вред от неплотности дымовой заслонки в печах с оборотами очень велик. Через такую печь в дымовую трубу круглые сутки тянет комнатный воздух. Печь студится не лучеиспусканием в комнату, а просачивающимся в печь и трубу воздухом, выносящим тепло печи на улицу

Вышеописанная печь (фиг. 108)—печь для отопления крупных помещений, диаметром около 1.100 мм, каждый пояс который склепан из $2^1/_2$ листов кровельного железа размером 1400×700 мм. Число употребленных листов—10 шт. Размер дров—10 верш. Печь примыкает к стене с дымоходом.



Фиг. 109.

Фиг. 109—печь того же типа для одноэтажных казарм для рабочих с дымовой трубой, основанной на печи. Эти печи пользуются большой популярностью на Челябинских буроугольных копях и в г. Челябинске, ибо очень хорошо работают на буром угле.

Употребляя на кожух два листа кровельного железа, получим диаметр печи около 880 мм (фиг. 110).

Из полутора листов получится диаметр в 660 мм (фиг. 111); из одного листа—440 мм (фиг. 112).

Все эти печи представляют вариации на одну тему. На чертежах показана кладка из обыкновенного красного кирпича 265 × 130 × × 65 мм, условно принятого со швом 280 × × 140 × 70 мм.

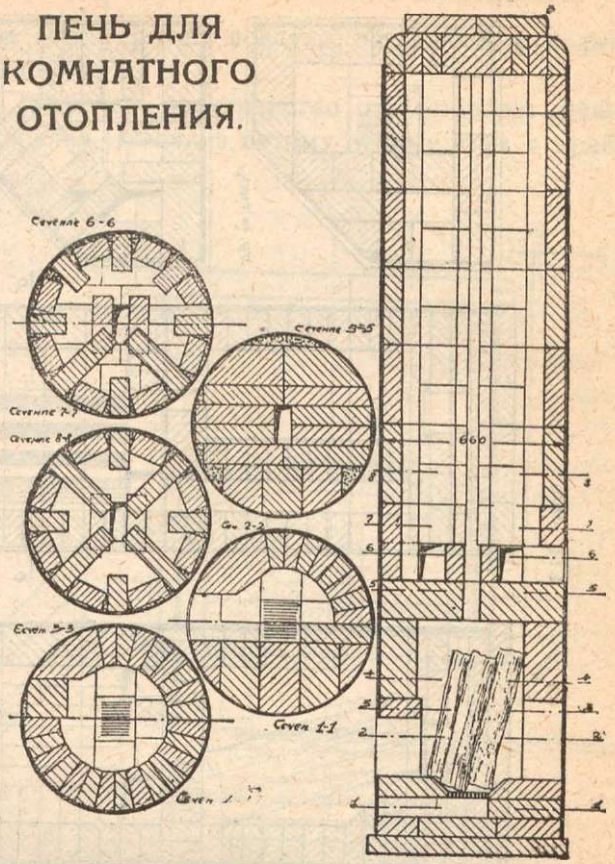
Таким образом, печь может быть сложена всяким человеком, умеющим держать кианок в руках, и никаких познаний от него не требует.

Высота топливника делается в зависимости от размера дров от 8 вершков до 1 аршина.

Фиг. 113 представляет печь большой теплоемкости со стенками в $^1/_2$ кирпича в железном кожухе трапецеидального сечения, что при известном расположении комнат очень выгодно. Число листов в одном поясе в 1 аршин высотой (700 мм) равно $2^1/_2$ шт., а всего десять листов. Дрова аршинные.

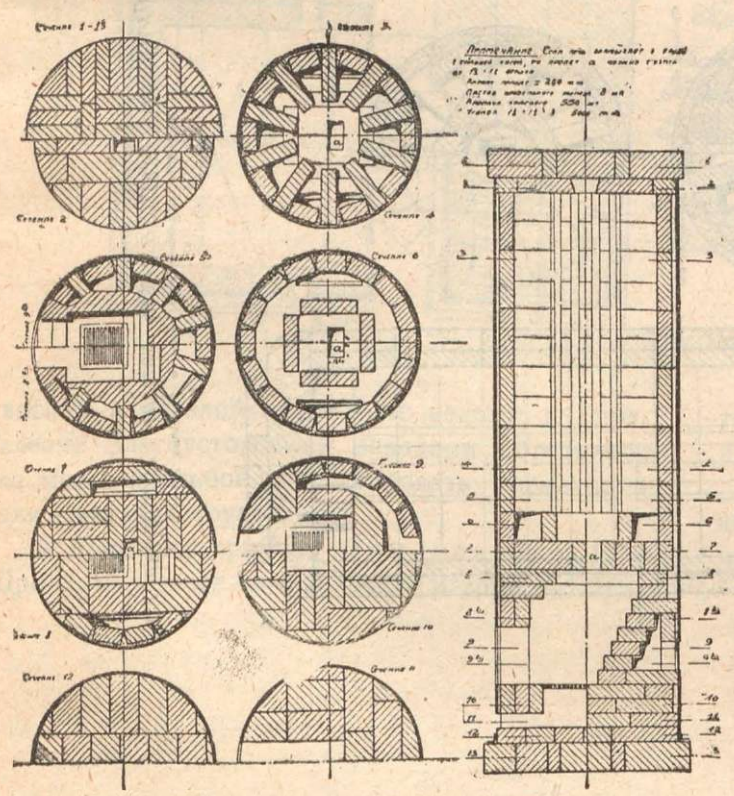
Фиг. 114—кафельная печь большой теплоемкости круглого сечения; кафли с боковыми выступами связываются между собой проволоками и подкрепляются специального сечения кирпичом по типу кладки тонких дымовых труб. Заслонка сделана в виде двух задвижек и душника между ними.

ПЕЧЬ ДЛЯ КОМНАТНОГО ОТОПЛЕНИЯ.



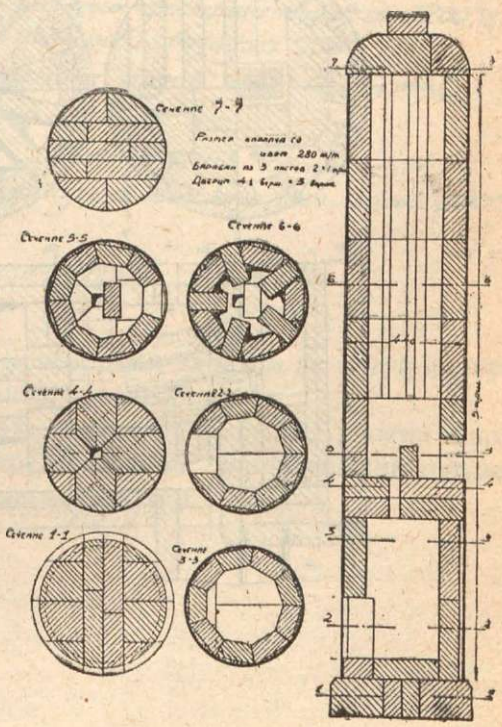
Фиг. 111.

ПЕЧЬ ДЛЯ КОМНАТНОГО ОТОПЛЕНИЯ.



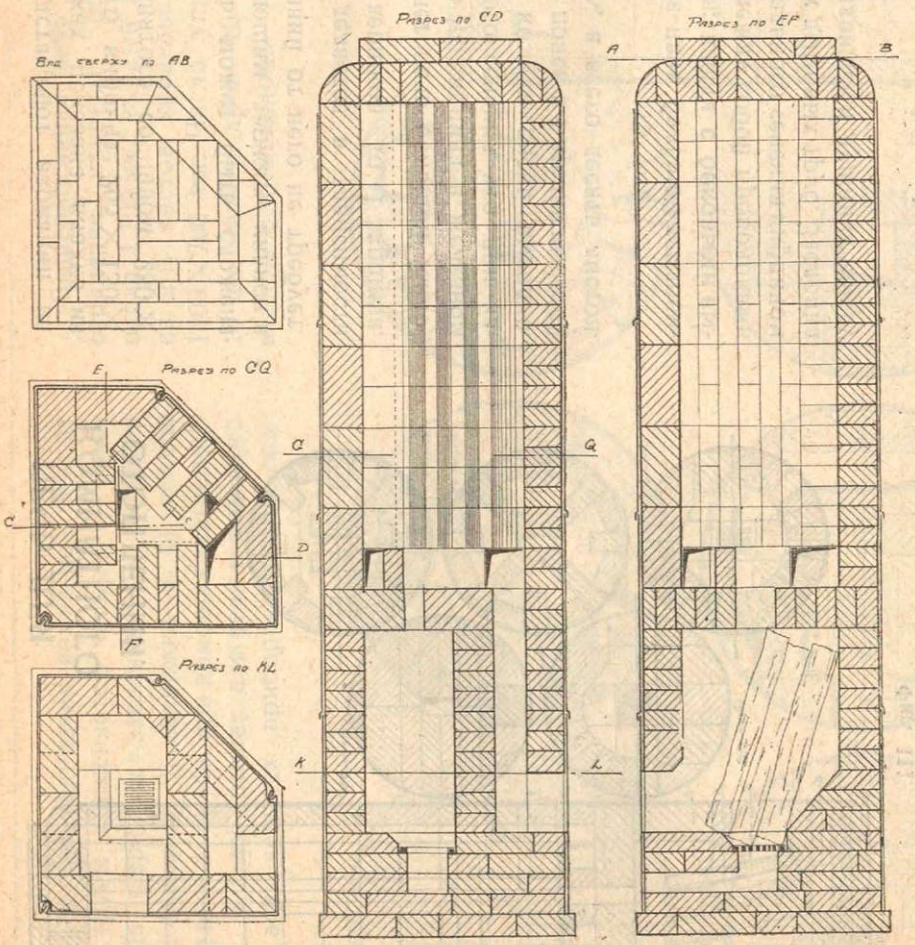
Фиг. 110.

МАЛЕНЬКАЯ ПЕЧЬ КОМНАТНОГО ОТОПЛЕНИЯ.



Фиг. 112.

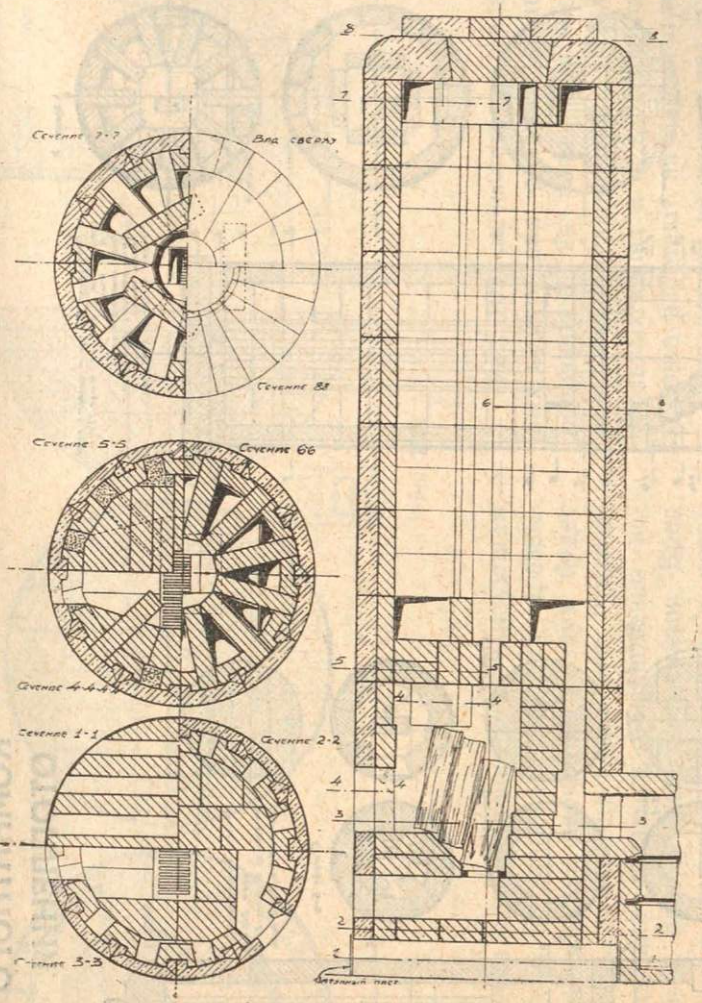
Печь для комнатного отопления большой теплоемкости для аршинных дров.



Фиг. 113

Изразцовая круглая печь большой теплоемкости

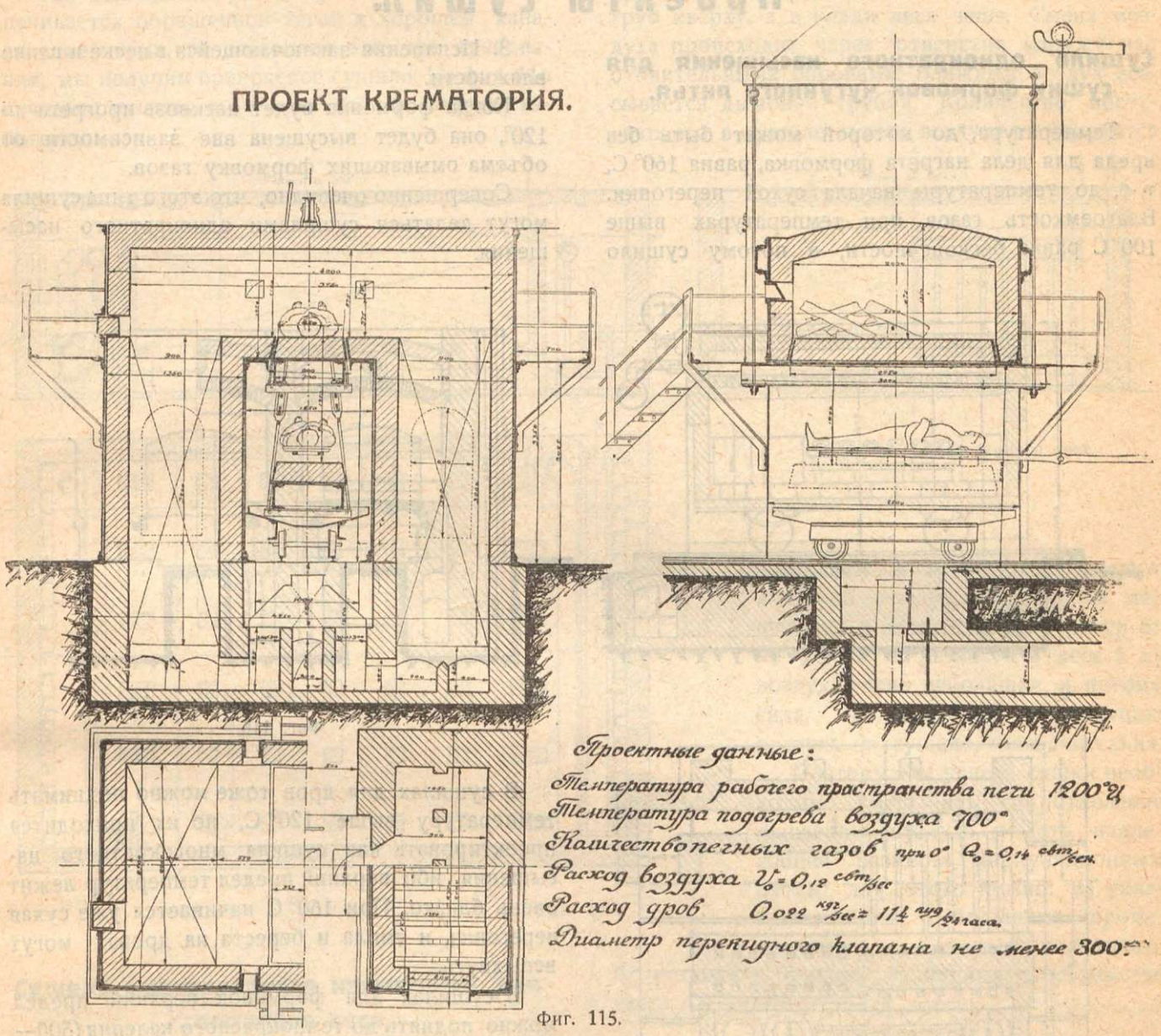
для ком. и бурого угля, торфа и 3 вершк. дров



Фиг. 114.

Крематорий для сжигания трупов.

Во время голода 1921/22 года в южном Урале было такое количество трупов, что копать



Фиг. 115.

могилы в мерзлой почве было некому, и Управление Златоустовскими заводами обратилось ко мне с просьбой спроектировать крематорий для сжигания трупов.

Я применил принцип Сименса (фиг. 115). Дрова, кидаемые на под рядом с трупом, горят за счет горячего воздуха, нагреваемого в регенераторах.

Рабочее пространство представляет мешок горячих газов, а потому печные газы с крайне тяжелым пригорелым запахом не могут попасть в помещение крематория.

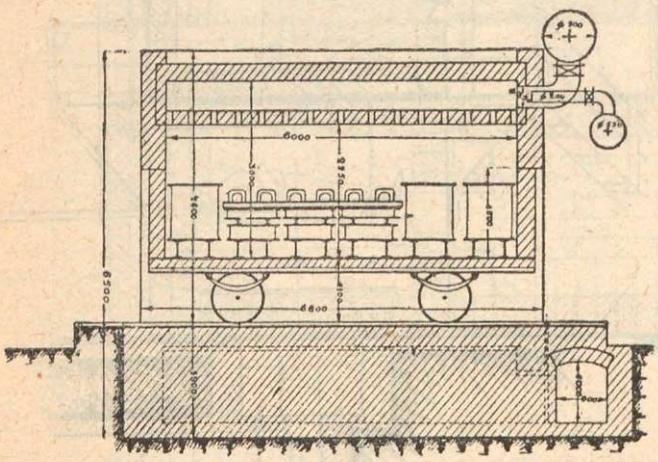
Печь эта построена не была. Трупами заполняли камеру кольцевой кирпичеобжигательной печи и сжигали их там.

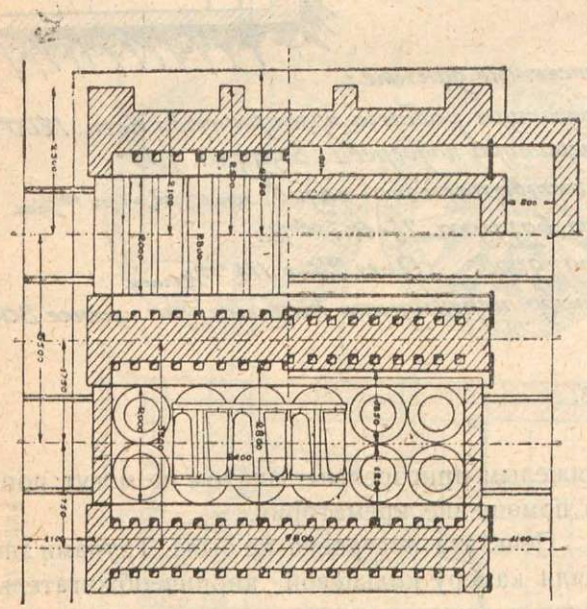
ГЛАВА VI.

Проекты сушил.

Сушило однократного насыщения для сушки формовок чугунного литья.

Температура, до которой может быть без вреда для дела нагрета формовка, равна 160° С, т.-е. до температуры начала сухой перегонки. Влагоемкость газов при температурах выше 100° С равна бесконечности, а потому сушило





для формовок строится как печь, способная нагреть формовку в определенное время до нужной температуры, исходя из требующейся полезной работы, а именно:

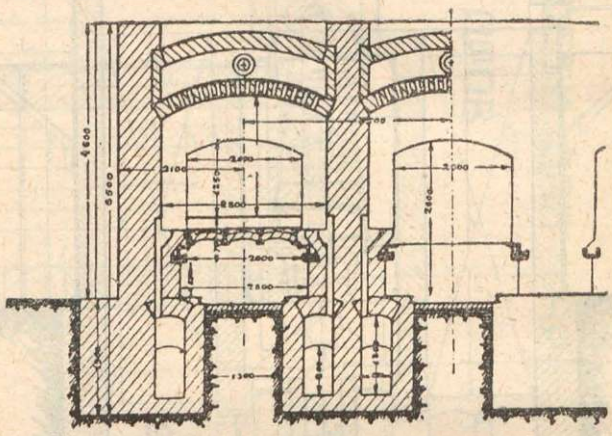
1. Нагревания до 120° С кладки стен печи и вагона.

2. То же, материалов формовки и опок.

3. Испарения заключающейся в песке и глине влажности.

Когда формовка будет насквозь прогрета до 120°, она будет высушена вне зависимости от объема омывающих формовку газов.

Совершенно очевидно, что этого типа сушила могут делаться сушилами однократного насыщения.



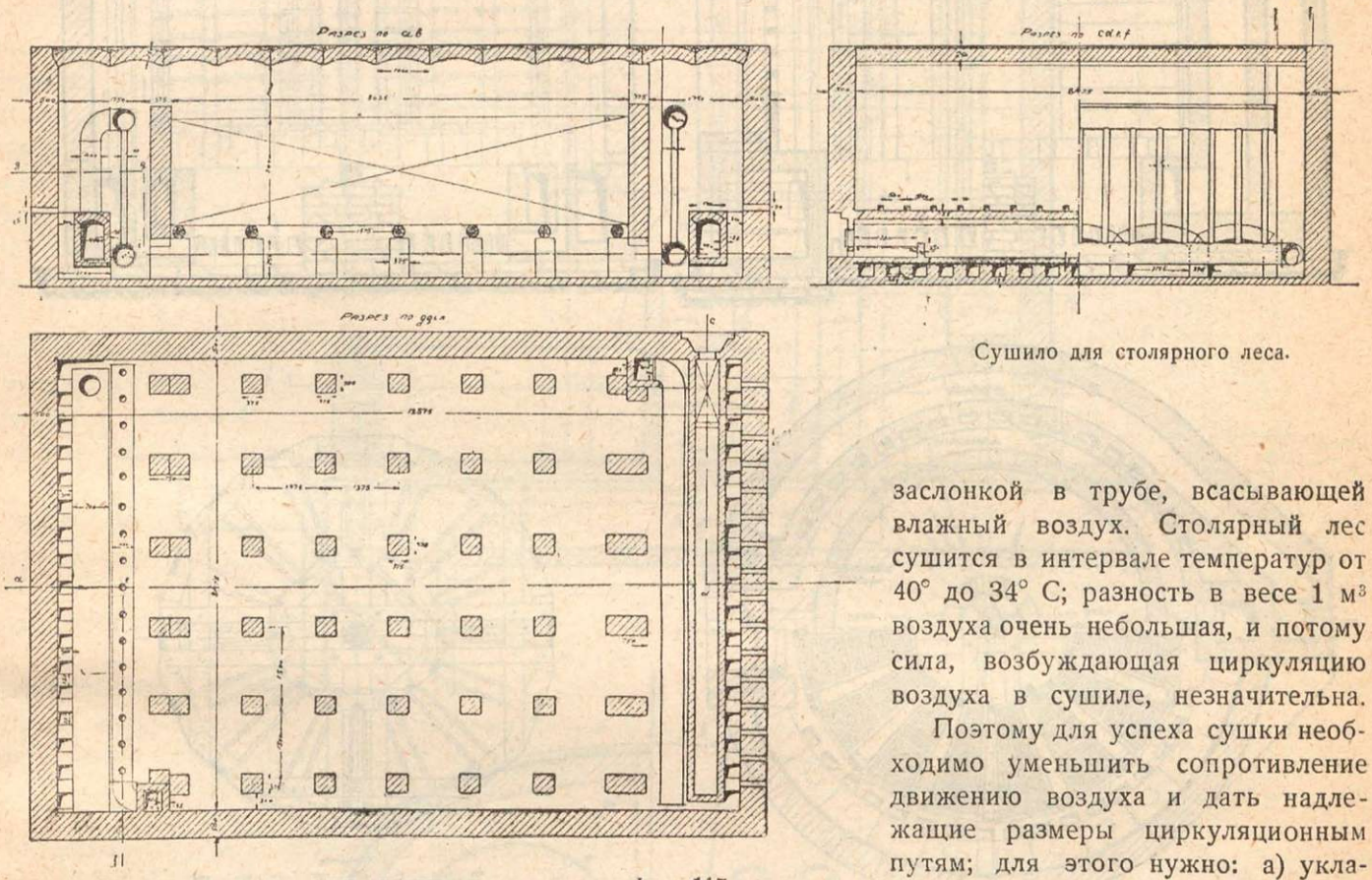
Фиг. 116.

В сушилах для дров тоже можно поднимать температуру выше 120° С, но их приходится проектировать как сушила многократного насыщения, ибо верхний предел температур лежит очень близко. При 160° С начинается уже сухая перегонка, и смола и береста на дровах могут вспыхнуть.

В сушилах для формовок верхний предел можно поднять до темнокрасного каления (500—600°) без опасения обуглить те органические примеси, которые находятся в формовке (шерсть, навоз, мука и пр.) и защищены глиной от непосредственного соприкосновения с газами высокой температуры. Единственное требование, которое предъявляется к этим сушилам, это равномерность нагрева. Что касается скорости, резкости нагревания, то литейщики не только не жалуются, и напротив того, одобряют быструю сушку формовки. Глиняная формовка, высушиваясь быстро, покрывается частой сетью мелких трещин. При медленной сушке на формовке, намазанной на твердом скелете из кирпича, чугуна и т. п., получается несколько

широких и глубоких трещин с искривлением поверхности формовки, заделать которые гораздо труднее и хлопотливее, чем сеть мелких трещин, затираемых иногда просто чернилами.

Так как полная равномерность сушки обеспечивается обращенной тягой и хорошей канализацией пода, то, выполнив эти два требования, мы получим прекрасное сушило. На фиг. 116 показано сушило с вагоном для формовки изложниц.



Сушило для столярного леса.

Фиг. 117.

Сушило многократного насыщения для столярного леса.

Если искусственная сушка леса не пользуется хорошей репутацией, то это происходит от ее резкости, благодаря чему лес сечется трещинами. Столярный лес надо сушить пропусканием громадного объема сушильных газов, температура коих весьма мало отличается от температуры леса.

Здесь идея сушила многократного насыщения дает максимальный результат. Штабель столярного леса (фиг. 117) укладывается на ряд лежней на кирпичных столбах в клетку так, что расстояние между досками равно их ширине. Таким образом, кладь в свету имеет $^1/_4$ занимаемой площади; высота кирпичных столбов равна 750 мм; расстояние между лежнями—1.375 мм.

Таким образом, воздух, подогреваемый батареей вертикальных труб из кровельного железа, приобретает циркуляционное движение: около труб кверху, а в клади леса вниз. Смена воздуха происходит через отверстия наружу над отопительными боровами. Влажный воздух всасывается дымовой трубой. Количество поступающего в сушило сухого воздуха регулируется заслонкой в трубе, всасывающей влажный воздух. Столярный лес сушится в интервале температур от 40° до 34° С; разность в весе 1 м³ воздуха очень небольшая, и потому сила, возбуждающая циркуляцию воздуха в сушиле, незначительна.

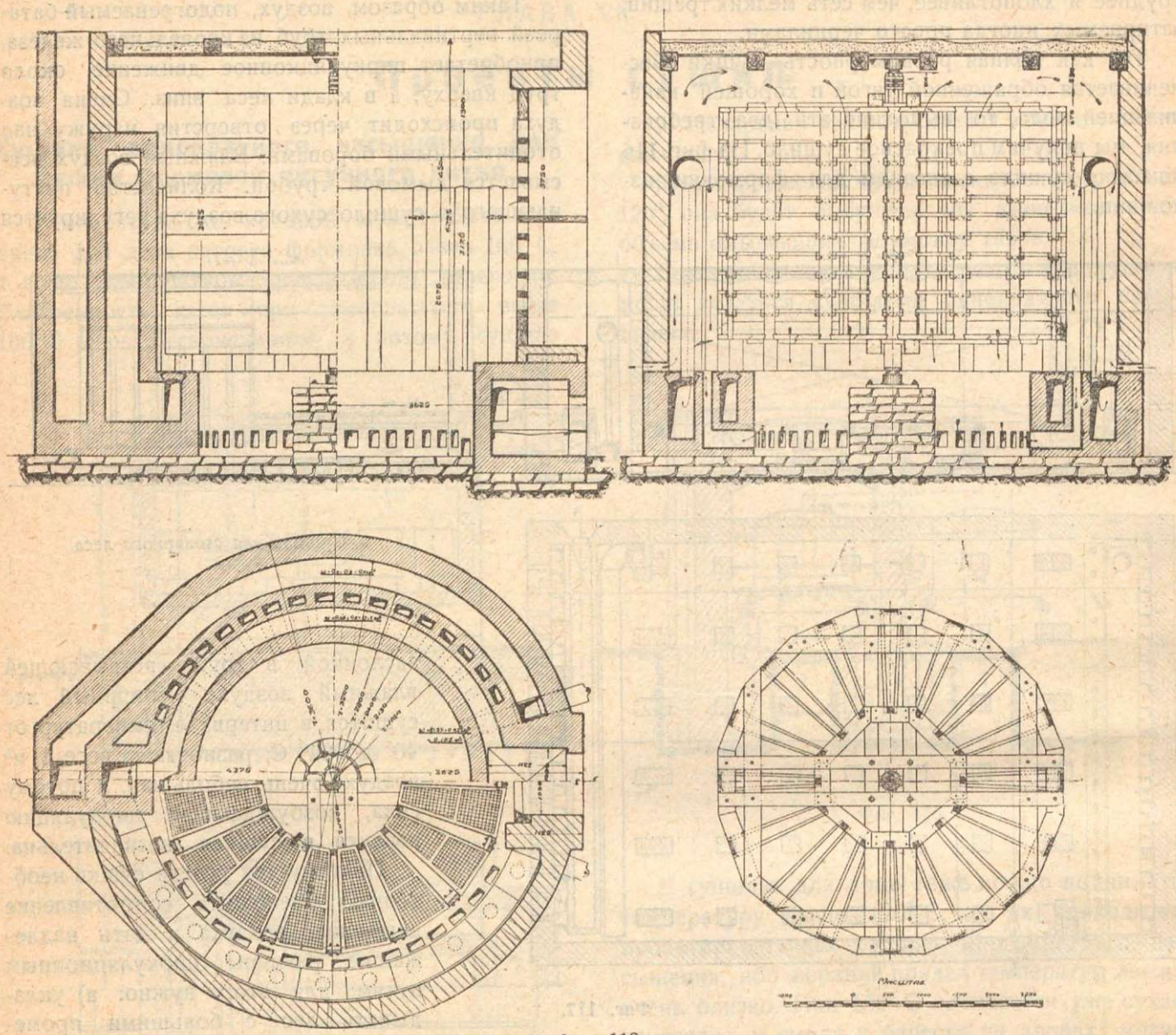
Поэтому для успеха сушки необходимо уменьшить сопротивление движению воздуха и дать надлежащие размеры циркуляционным путям; для этого нужно: а) укладывать лес с большими промежутками и прямыми колодцами; б) оставлять большие свободные пространства сверху и снизу штабеля досок.

Карусельное сушило для сушки картофеля.

Это сушило (фиг. 118) построено по принципу сушил многократного насыщения. Воздух обогревается около вертикальных труб из кровельного железа и поступает в барабан с ситами, заполненными картофелем; опускается вниз и снова нагревается у железных труб.

Выгоды этой конструкции заключаются в том, что нагрузка и выгрузка всего сушила ведется через одну дверь. Вращения сушила для равномерности сушки не требуется.

КАРУСЕЛЬНАЯ СУШИЛКА
ДЛЯ СУШКИ КАРТОФЕЛЯ.



Фиг. 118.

Циркуляционная шахтная сушильная печь для дров.

Трудность проектирования шахтной печи для сушки дров заключается в самовозгорании дров. В Надеждинском заводе пустили доменные печи на дровах. Это дело пришлось бросить, ибо заводоуправление не справилось с задачей сушки дров в шахтной печи: дрова горели, а сохли плохо.

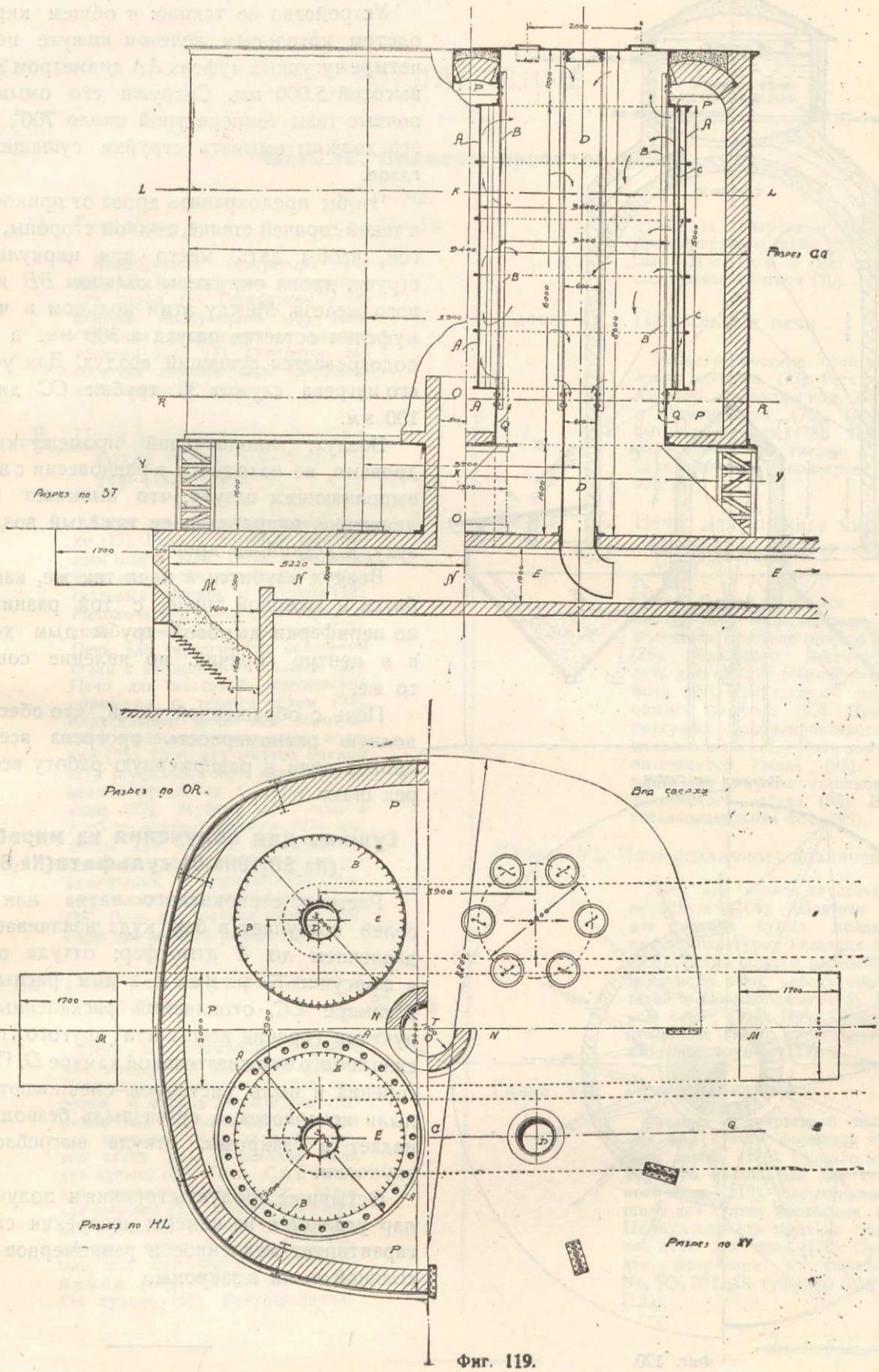
Вышецитированная теория сушки (см. часть II) дает нам ключ к пониманию неудач Надеждинского завода.

Они пускали теплый воздух только один раз и, согласно теории, должны были, для успешности сушки пропускать колоссальное количество теплого воздуха, довольствуясь ничтожной его влажностью. При слабости вентиляторов они переохлаждали отработавший воздух, влажность его поднималась до 100%, и дрова в сушиле прели, а не сохли.

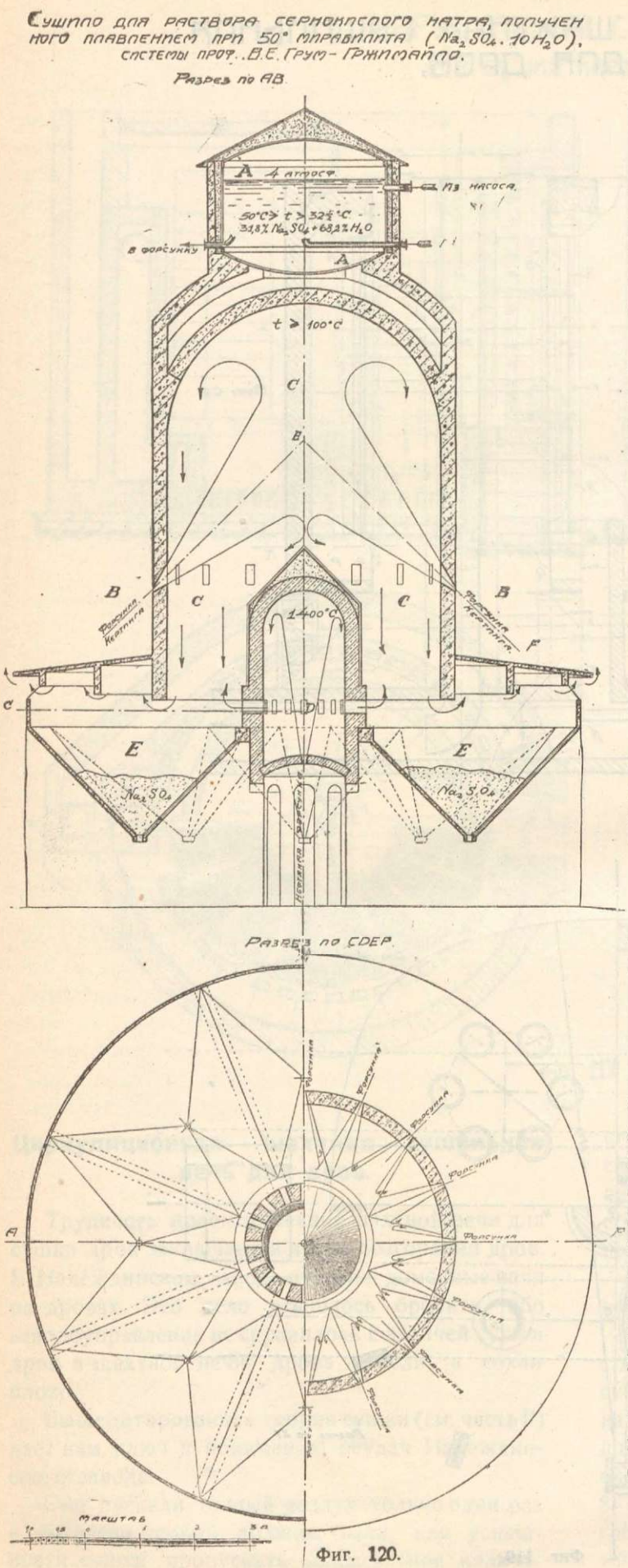
Поднимая температуру вступающего в сушило воздуха, они зажигали дрова.

Решение задачи сушки заключается в устройстве печи так, чтобы воздух, находящийся в сушиле, мог бы все время подогреваться. Его надо обратить в переносчика тепла. Подогревшись у горячей стенки, он должен омыть полено, опять подогреться, омыть полено и т. д. до 8 раз. Только после восьмикратного подогрева влажность его будет равна 75%, и его можно опустить в дымовой боров.

Циркуляционная шахтная сушильная печь для дров.



Фиг. 119.



Фиг. 120.

Предлагаемая циркуляционная печь (фиг. 119) имеет целью сушить дрова циркулирующими между поленьями и горячей металлической стенкой струйками печных газов.

Устройство ее таково: в общем кирпичном, одетом котельным железом кожухе помещены четыре чугунных муфеля *AA* диаметром 3.600 мм, высотой 5.000 мм. Снаружи его омывают топочные газы температурой около 700°. Изнутри его должны омывать струйки сушащих дрова газов.

Чтобы предохранить дрова от прикосновения к такой горячей стенке, с одной стороны, а с другой, чтобы дать место для циркулирующих струек, дрова окружены кольцом *BB* из таврового железа. Между этим кольцом и чугунным муфелем остается пазуха в 300 мм, в которой подогревается сушащий воздух. Для ускорения его нагрева служат 32 трубки *CC* диаметром 100 мм.

Воздух, заполняющий промежутки между дровами, не находится в равновесии с воздухом, выполняющим пазуху, что вызывает вихревое движение, направляющее тяжелый воздух в пазуху, а легкий—в дрова.

Воздух клубится в печи так же, как он клубится в дымовой трубе, с той разницей, что по периферии дымовой трубы дым холодный, а в центре горячий, но явление совершенно то же.

Печь с обращенной тягой, что обеспечивает полную равномерность прогрева всей массы дров в печи и равномерную работу всех четырех шахт.

Сушило для получения из мирабилита ($Na_2SO_4 10Ha_2O$) сульфата(Na_2SO_4).

Раствор сернокислого натра или других солей поступает в бак, куда накачивается под давлением до 4 атмосфер; оттуда поступает в форсунки Кертинга, а ими распыливается в камере *CC*, отопляемой раскаленными продуктами горения нефти или другого горючего, сжигаемого в сожигательной камере *D*. Продукты горения и пыль растворов смешиваются, вода пыли испаряется, а сухая пыль безводной соли падает в закромы, откуда выгребается для укупорки.

Остывшие продукты горения и получившийся пар удаляется из камеры испарения снизу, что гарантирует медленное и равномерное падение соляной пыли в закромы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Часть IV, Примеры проектов печей.

Стр.

Глава I. Генераторы . . . . . 3—12

Конструкция генератора для дров (3). Конструкция генератора для торфа (5). Генераторы с водяными поддувалами (6). Конструкция генератора с расплавлением золы (7). Генератор для горючих сланцев (11). Обращенный генератор (11).

Глава II. Печи для термической обработки стали для температур 600—1.000° С . . . 12—36

Печь для отжига сортовой стали (13). Печь с двойным выдвижным подом (14). Печь с выдвижным на вагоне подом для отжига стальных отливок и слитков (15). Методические печи для термической обработки снарядов (15). Печь для термической обработки стали с автономными подами (21). Печи для массовой термической обработки с теплым подом (24). Карусельные печи для термической обработки однородных изделий (25). Печь для закалки орудий (27). Муфельная печь для закалки мелких предметов с двумя муфелями (27). Муфель для отжига труб во время протяжки (27). Колодцы для отжига проволоки в стальных горшках (28). Печи для цементации и децементации мелких машинных принадлежностей (28). Печь для закалки резцов (28). Горн дал закалки резцов (33).

Глава III. Печи для нагрева слитков и заготовок . . . . . 37—73

Печи для штамповки снарядов для температур до 1.300° С (37). Печи для штамповки донцев снарядов и мелких 3-дюймовых снарядов (46). Четырехкамерная печь для прокатки очень твердых сортов стали (46). Маленькие печи для кузниц (46). Печь Сименса для отковки коленчатых валов для дизелей (50). Печь Сименса для прокатки тонкого котельного железа в стане Лаута (52). Новые или методические печи Сименса (60). Многооконная печь для кузниц (63). Рекуперативная печь для нагрева слитков для среднесортного стана (64). Колодцы Сименса с методическим подогревом слитков (70).

Стр.

Глава IV. Плавильные печи . . . . . 73—82

Металлургические печи на пылевом топливе (73). Регенеративная печь с топками инж. Лебедева и Померанцева (76). Печь для вытопки свинца (78). Печь для плавки стали в тиглях с двумя каминами для подогрева тиглей (82).

Глава V. Печи для обжига кирпича, фарфора, варки стекла и пр. . . . . 82—104

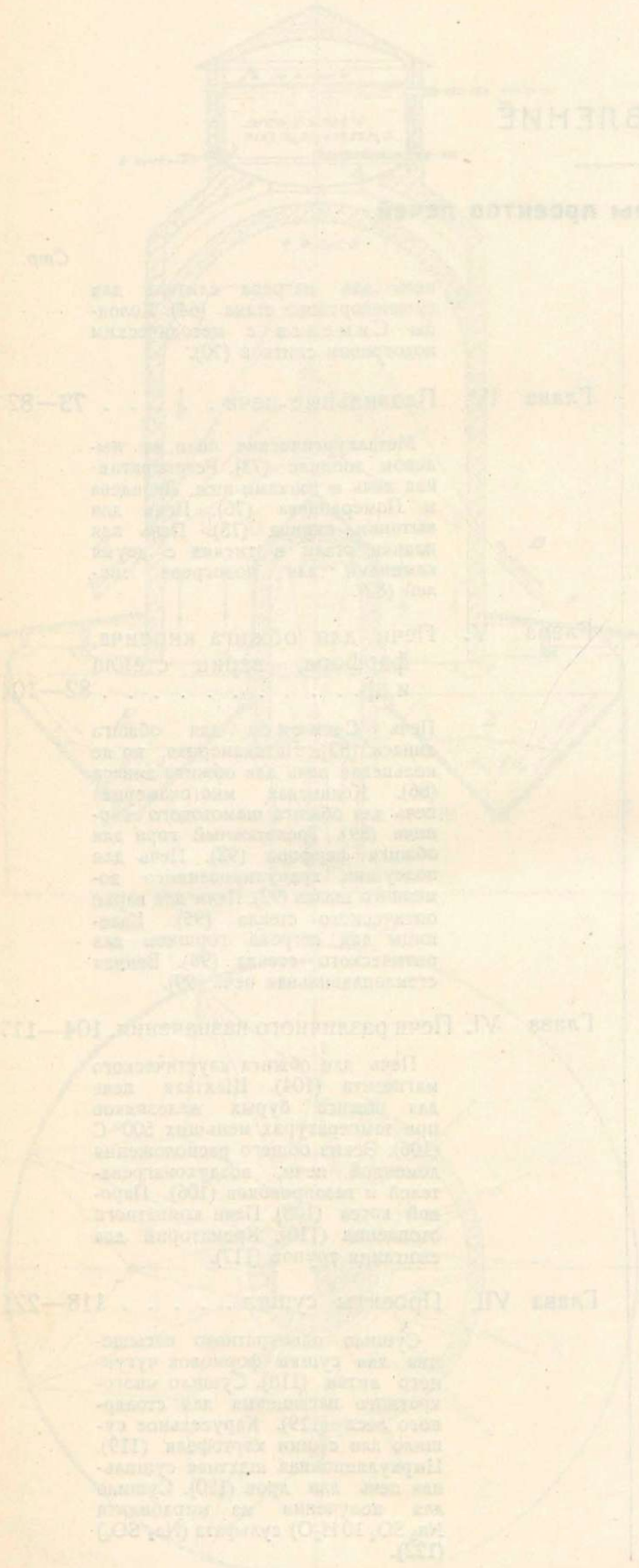
Печь Сименса для обжига динаса (82). Пятикамерная, но не кольцевая печь для обжига динаса (86). Кольцевая многокамерная печь для обжига шамотового кирпича (89). Трехэтажный горн для обжига фарфора (92). Печь для подсушки гранулированного доменного шлака (92). Печи для варки оптического стекла (95). Калеиицы для согрева горшков для оптического стекла (98). Ванная стеклоплавильная печь (99).

Глава VI. Печи различного назначения. 104—117

Печь для обжига каустического магнезита (104). Шахтная печь для обжига бурых железняков при температурах меньших 500° С (106). Эскиз общего расположения доменной печи, воздухонагревателей и газопроводов (106). Паровой котел (108). Печи комнатного отопления (110). Крематорий для сжигания трупов (117).

Глава VII. Проекты сушил . . . . . 118—221

Сушило однократного насыщения для сушки формовок чугунного литья (118). Сушило многократного насыщения для столярного леса (119). Карусельное сушило для сушки картофеля (119). Циркуляционная шахтная сушильная печь для дров (120). Сушило для получения из мирабилита $Na_2SO_4 10H_2O$) сульфата (Na_2SO_4) (122).



ЧАСТЬ V.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ПЕЧЕЙ.

ЧАСТЬ V.

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ДЕРЕВЯННЫХ

ГЛАВА I.

Расчет кирпичеобжигательной печи[1]).

По относительной сложности расчета все пламенные печи можно разделить на три типа:

1) печи с простыми топками,
2) печи с рекуператорами
и 3) регенеративные печи.

Одной из наиболее простых печей первого типа является однокамерная, обычно круглая, печь для обжига кирпича.

Главное требование к этой печи то, что она должна постепенно и равномерно нагревать насадку обжигаемого кирпича. В противном случае кирпич потрескается или выйдет оплавленным снаружи и сырым внутри, т.-е. никуда не годным.

Температура обжига зависит от рода кирпича: динас и магнезит обжигаются при 1450° и выше, шамотовый кирпич при 1200° и обыкновенный при 900°—1000°. Высота кладки обжигаемого кирпича допускается для динаса, шамота и обыкновенного красного кирпича не более 3 м, а для магнезита не свыше 1,5 м, т. к. последний размягчается при обжиге.

Кирпичеобжигательная печь расчитывается на горение с теоретическим количеством воздуха, благодаря чему избегается возможность образования острого пламени, — получается пламя большого об'ема требуемой равномерной температуры.

Печь эта периодически действующая. Холодная камера печи сначала заполняется сырцом, затем двери ее закладываются и топки начинают шуровать. Таким образом, кирпич очень медленно нагревается пока не доведется до требуемой температуры обжига, на что в общем затрачивается обыкновенно от 4 до 5 суток. На большом огне печь выдерживается не более суток. После этого топка прекращается, печь медленно остуживается и разгружается.

[1]) Расчет сделан К. Ф. Оленевым, как пример расчета для студентов Хим.-Металлургического факультета У.П.И.

Задание.

Круглая кирпичеобжигательная печь для обжига шамотового кирпича на 30 000[1]) штук вместимости.

Топливо каменный уголь состава:

C	84,75%
H_2	4,80
O_2	4,83
N_2	1,44
S	1,48
H_2O	0,90
Зола	1,80
	100,00%

Расчет топлива[2]).

Теоретически необходимое количество воздуха . . . . . 8,715 м³/кг к. у.
Количество продуктов горения . 9,038 м³/кг к. у.
Вес 1 м³ продуктов горения . . . 1,35 кг/м³.
Теплотворная способность . . . . 8 110 кал/кг.
Теоретическая температура горения без избытка воздуха . . . . 2285°C.

Определение размеров печи.

Об'ем одного кирпича 225 × 112 × 56 мм равен 0,0014112 м³ (или около 700 штук в 1 м³).

Об'ем всей насадки из 30 000 кирпичей:

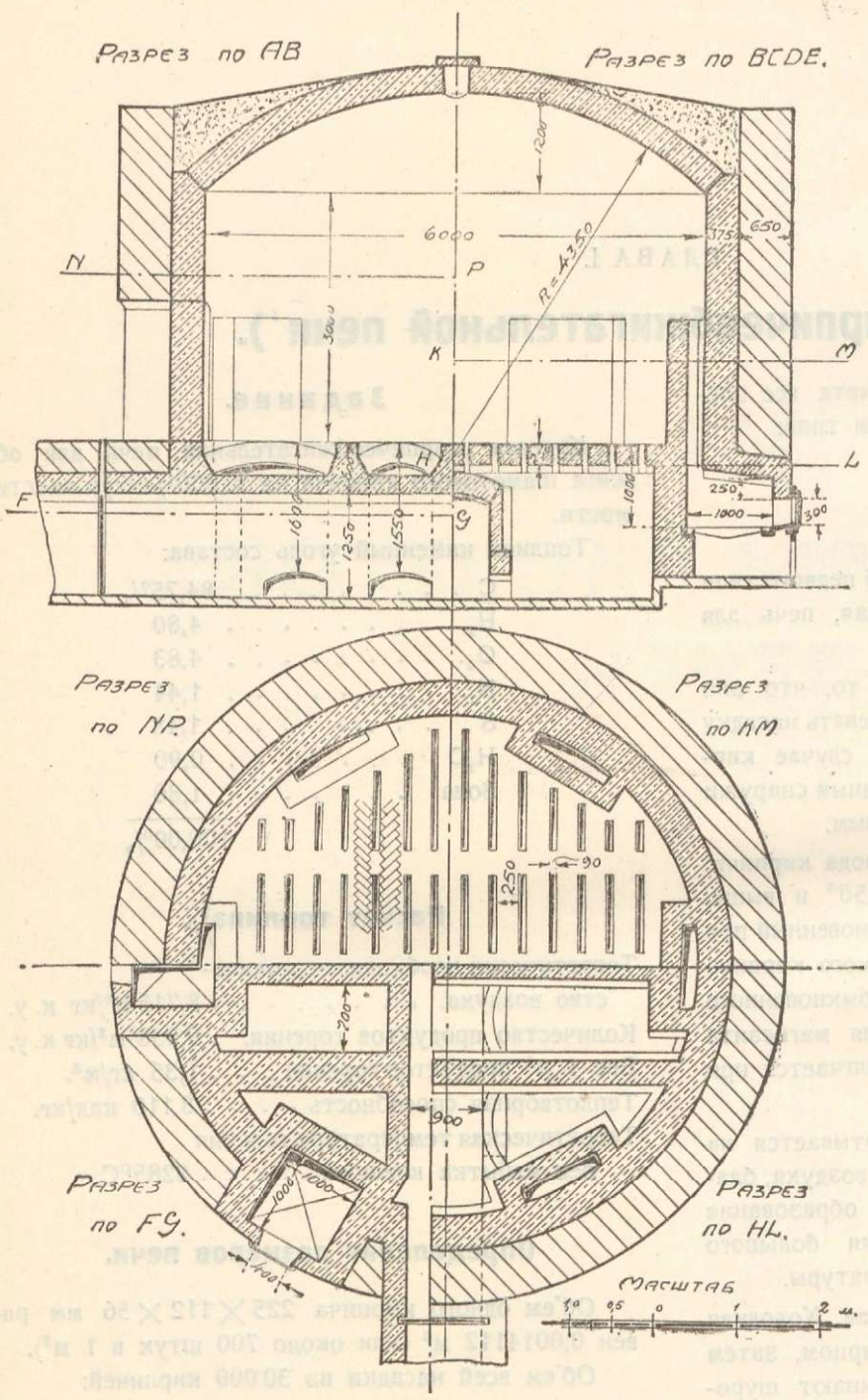
$$v_1 = 0{,}0014112 \times 30\,000 = 42{,}336 \text{ м}^3.$$

Кирпичи укладываются в печи так, чтобы между ними были достаточные промежутки и обычно об'ем промежутков равен об'ему кирпича, а потому об'ем цилиндрической части печи

$$v_2 = 2\,v_1 = 2 \times 42{,}336 = 84{,}672 \text{ м}^3 = \sim 85 \text{ м}^3.$$

[1]) В настоящее время строятся печи до 175 000 шт. кирпича вместимостью.

[2]) См. часть I.



Фиг. 1.

Примем высоту цилиндрической части печи, занятой насадкой, в 3 м. Тогда диаметр печи определится из формулы

$$v_2 = \frac{1}{4}\pi D^2 H,$$

откуда

$$D = \sqrt{\frac{4\,v_2}{\pi \cdot H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 85}{\pi \cdot 3}} = \sim 6 \text{ м}.$$

Высота купола h, берется равной $^1/_4$ или $^1/_5$ диаметра, т.-е.

$$h_1 = \frac{1}{5} \cdot 6{,}0 = 1{,}2 \text{ м}.$$

Об'ем подкупольного пространства

$$v_3 = \frac{1}{6}\pi h_1 \left[3\left(\frac{D}{2}\right)^2 + h_1^2 \right] =$$

$$= \frac{1}{6}\pi \cdot 1{,}2 \left[3\left(\frac{6}{2}\right)^2 + 1{,}2^2 \right] =$$

$$= 17{,}860 \text{ м}^3 = \sim 18 \text{ м}^3.$$

Об'ем свободного от кирпича пространства печи

$$v = v_1 + v_3 = 42{,}336 + 17{,}860 =$$

$$= 60{,}196 \text{ м}^3 = \sim 60 \text{ м}^3.$$

Определение расхода топлива и количества газов.

Температура обжига шамота 1200°С; с этой температурой газы должны покидать печь.

Запас температуры:

$$2285 - 1200 = 1085°\text{C}.$$

Примем, на основании практических данных, падение температуры в секунду 70°.

Время пребывания газов в печи:

$$1085 : 70 = 15{,}5 \text{ сек}.$$

Секундный об'ем газов покидающих печь при температуре 1200°С

$$60{,}0 : 15{,}5 = 3{,}87 \text{ м}^3,$$

т.-е. топки должны давать соответствующий, при 0° об'ем продуктов горения:

$$3{,}87 \times 0{,}185 = 0{,}716 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

1 кг данного топлива дает 9,038 м. продуктов горения, а следовательно, для получения 0,716 м³ газов в секунду нужно будет затратить

$$0{,}716 : 9{,}038 = 0{,}0792 \text{ кг/сек},$$

или

$$0{,}0792 \times 3600 = 286 \text{ кг/час угля}.$$

Соответствующее количество воздуха поступающего в топки для сжигания 0,0792 кг угля в секунду

$$8{,}715 \times 0{,}0792 = 0{,}690 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Расчет топок.

Количество топлива сжигаемого в час на 1м² поверхности колосниковой решетки бывает на практике от 50 до 150 кг угля. Горение с теоретическим количеством воздуха легко осуществляется при напряжении топки в 50 кг/м² час. Это дает возможность спокойно вести горение на шлаковой подушке, что существенно при употреблении порошкообразного к. у. или угля с легкоплавкой золой.

Общая необходимая площадь колосниковой решетки в рассматриваемом случае:

$$286 : 50 = \sim 6 \text{ м}^2.$$

Сделаем 6 топок с решетками размерами 1×1 м²;

В общем

$$1 \times 1 \times 6 = \sim 6 \text{ м}^2.$$

Дверцы размерами 300×400 мм.

Необходимо расчитать еще высоту передней стенки топки, ибо для того, чтобы топка не коптила эта высота должна быть не менее глубины газослива топочных газов, текущих из топки в пламенный пролет (см. фиг. 1).

Расчет ведем по формуле И. Есьмана:

$$h = A\sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 t}},$$

где Q—есть об'ем газов при 1000°C (приблизительно) текущих из топки

$$Q = 0{,}716 \times 4{,}66 \times \frac{1}{6} = 0{,}556 \text{ м}^3,$$

B—ширина топки $= 1$ м,

$t = 1000°$C и A—коэффициент $= 3{,}41$.

$$h = 3{,}41\sqrt[3]{\frac{(0{,}556)^2}{1{,}0^2 \times 1000}} = 0{,}230 \text{ м}.$$

Примем с запасом

$$h = 0{,}250 \text{ м}.$$

Общая высота топки $0{,}300 + 0{,}250 = 0{,}550$ м. Кроме того, с целью обеспечения достаточного запаса положительного давления для движения газов, уровень колосниковой решетки следует опустить на 1 м ниже пода печи.

Расчет движения рабочих газов.

Печь следует расчитать так, чтобы на поду печи было давление рабочих газов ± 0. Таким образом, топка должна дать напор для доставления газов до уровня пода; это будет область положительного давления. Дымовая труба должна отвести газы с уровня пода; это будет область отрицательного давления, ниже пода печи.

Движение газов обуславливается разницей давлений и скорость их определяется из формулы $v = \sqrt{2gh}$, где величину h мы будем называть скоростным напором.

Таким образом, скоростной напор равен:

$$h = \frac{v^2}{2g}.$$

Произведение скоростного напора на вес газа даст то давление δ, которое расходуется на рождение данной скорости v.

Запас положительного давления.

Столб топочных газов, продуктов еще незаконченной реакции горения, имеет температуру, вероятно, около 1000°C; считая высоту его H от уровня колосников до уровня пода печи, мы будем иметь запас положительного давления:

$$\Delta_1 = H\left(1{,}29 - 1{,}35\,\frac{1}{1+\alpha t}\right)^{1)} =$$

$$= 1{,}00 \,.\, (1{,}29 - 1{,}35 \,.\, 0{,}214)^{2)} = 1{,}00 \text{ мм вод. ст.}$$

Расход давления для рождения скоростей газов.

Найденный запас положительного давления частью израсходуется на необходимое рождение скоростей газов в топке, а остаток его должен быть ликвидирован уменьшенной площадью поддувала.

Задаваясь конструктивно подходящими размерами сечения каждого канала и определяя по об'ему газа скорость его в канале, мы вычислим то давление, которое расходуется для рождения каждой отдельной скорости.

Для поддувала проделаем обратную задачу и найдем ту площадь его, при которой рождение скорости в поддувале поглотит весь излишек положительного давления.

Вычисления удобно расположить в следующую таблицу:

Путь топочных газов.	Температура.	Об'ем газов при 0°C.	Об'ем газов при t°C.	Площадь сечения ω.	Скорость v м/сек.	Скоростной напор h м.	Вес 1 м³ газов при 0°C.	Вес 1 м³ газов при t°C.	δ
Колосниковая решетка	0°	0,115	0,115	0,25	0,46	0,011	1,29	1,29	0,014
Пламенный пролет. . .	1000°	0,119	0,555	0,18	3,08	0,48	1,35	0,29	0,140
Сопротивление слоя угля [3]. .	—	—	—	—	—	—	—	—	0,090
									$\Sigma\delta = 0{,}244$

[1]) 1,29 и 1,35 веса 1 м³ воздуха и дыма.

[2]) См. приложения.

[3]) Сопротивление слоя угля зависит от толщины слоя, крупности кусков и других свойств угля. Величина этого сопротивления в различных случаях будет крайне разнообразна и должна определяться на опыте. В данном случае взято одно из средних значений.

где $\frac{0{,}690}{6} = 0{,}115$ м³/сек — количество воздуха поступающего в 1 топку;

$\frac{1 \times 1}{4} = 0{,}25$ — площадь живого сечения колосников, которая в каменноугольных топках делается от $^1/_4$ до $^1/_5$ всей площади;

$0{,}716 : 6 = 0{,}119$ м³/сек — количество газов, уходящих из одной топки;

$1{,}0 \times 0{,}18 = 0{,}18$ м²—площадь сечения пламенного пролета (из чертежа). Эту площадь можно выбрать допуская скорость в пролете 3 и более м/сек.

Остаток положительного давления

$$\Delta_1 - \Sigma\delta = 1{,}000 - 0{,}244 = 0{,}756 \text{ мм в. с.}$$

ликвидируется соответствующей площадью поддувала, которую найдем обратно из имеющегося давления.

Путь воздуха.	Температура.	Количество воздуха при 0°С.	Количество воздуха при t°С.	Запас гидрост. давления δ.	Вес 1 м³ возд. при 0°С.	Вес 1 м³ воздуха при t°С.	Скоростной напор h м.	Скорость в м/сек.	Площадь сечения поддувала.
Поддувало . .	0°	0,115	0,115	0,756	1,29	1,29	0,59	3,4	0,034

Откуда размеры поддувала примем

$$0{,}30 \times 0{,}11 = 0{,}033 \text{ м}^2.$$

Расчет движения отработавших газов [1].

Путь их начинается от уровня пода печи и идет через: подовые отверстия, малые дымовые боровки, общий дымовой боров и дымовую трубу.

Системы собирательных дымовых отверстий в поду печи и боров под подом могут быть очень разнообразны для одной и той же, уже расчитанной, в основных размерах, печи.

Примем такую конструкцию:

Основываем под печи на трех промежуточных стенках перекрытых четырьмя сводами. Составляем каждый свод из ряда арок шириной в 0,250 м (1 кирпич) и промежутком между арками шириною по 0,09 м.

Вообще, подовые отверстия нужно поместить так, чтобы между ними можно было уложить обжигаемые кирпичи. Для этого расстояние между рядами отверстий должно быть кратным длине кирпича.

Сумма длин всех подовых щелей у нас, по чертежу, составит 50 м, что при ширине их в 0,09 м даст площадь дымовых отверстий:

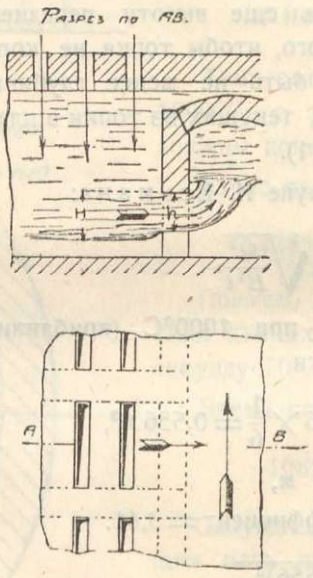
$$50 \times 0{,}09 = 4{,}5 \text{ м}^2.$$

Скорость дыма в отверстиях при 1200°С:

$$\frac{3{,}87}{4{,}5} = 0{,}86 \text{ м/сек.}$$

Чем меньше будет эта скорость, тем более будет обеспечена равномерная работа всех отверстий, поэтому, вообще, не следует допускать эту скорость более 1,5—2 м/сек.

Промежутки между опорными стенками будут играть у нас роль боковых собирательных боровков. Дымовые газы, идущие с пода, образуют в каждом боровке газовый поток. Уровень этого потока следует опустить по возможности ниже. Тогда вертикальные струи газов, идущие через подовые отверстия, будут попадать в область относительно неподвижного газа и благодаря этому не будут перебивать и мешать одна другой.



Фиг. 2.

Перпендикулярно боковым боровкам, по диаметру печи, сделаем дымовой боров. В стенках борова сделаем окна выходящие в каждый боковой боровок. Окна расположим так, чтобы вся площадь каждого окна лежала ниже уровня газового потока в общем борове. При таком расположении мы получим в каждом окне свободный газослив, глубина которого определяется формулой И. Есьмана, и то существенное преимущество, что отдельные потоки, сливаясь снизу вверх, не будут перебиваться общим потоком (см. фиг. 2).

Количество газов, идущих по боровку, будем считать пропорциональным площади входящих в него подовых отверстий.

Ширину всех окон из боровков сделаем одинаковой и равной ширине их, т.-е. 0,7 м.

Площадь подовых щелей входящих в каждый из 4 равных средних боровков (по чертежу):

$$1 \times 7 \times 0{,}09 = 0{,}63 \text{ м}^2.$$

[1]) Приводимый ниже расчет сделан К. Ф. Оленевым, как пример расчета «до конца». На практике, при постройке печей, таких расчетов не делают, ограничиваясь простой гидравлической поверкой (см. расчет мартеновской печи).

Об'ем дымовых газов, идущих по боровку

$$\frac{3{,}87 \times 0{,}63}{4{,}5} = 0{,}54 \text{ м}^3.$$

Глубина свободного газослива по формуле И. Есьмана:

$$h = 3{,}20 \sqrt[3]{\frac{0{,}54^2}{0{,}7^2 \cdot 1200}} = 0{,}253 \text{ м}.$$

Сделаем высоту окон из четырех средних боровков с запасом по 0,300 м.

Площадь подовых щелей, входящих в каждый из 4 равных крайних боровков (по чертежу):

$$5{,}5 \times 0{,}09 = 0{,}50 \text{ м}^2.$$

Об'ем дымовых газов, идущих по боровку:

$$\frac{0{,}50 \times 3{,}87}{4{,}5} = 0{,}43 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Глубина свободного газослива:

$$h = 3{,}20 \sqrt[3]{\frac{0{,}43}{0{,}7^2 \cdot 1200}} = 0{,}218 \text{ м}.$$

Сделаем высоту окон из 4 крайних боровков с запасом по 0,250 м.

Общий дымовой боров расчитывается как газослив квадратного сечения. Полагая в общей формуле Есьмана $B = h$, мы получим следующую частную формулу:

$$h = \sqrt[5]{\frac{A^3 Q_t^2}{t}}.$$

Откуда глубина газового потока в нашем борове:

$$h = \sqrt[5]{\frac{3.70^3 \times 3{,}87^2}{1200}} = 0{,}912 \text{ м}.$$

Делаем ширину борова 0,900 м.

Необходимая высота общего борова определится суммой: глубины потока в борове и высоты лежащего ниже уровня потока наибольшего бокового окна, т.-е.

$$0{,}912 + 0{,}253 = 1{,}165 \text{ м}.$$

Сделаем высоту борова с запасом 1,250 м.

Для дымовой трубы зададимся обычной скоростью газов в трубе 4 м/сек и отсюда определим площадь поперечного сечения и внутренний диаметр трубы. Температура газов в трубе зависит от длины борова: чем длиннее боров, тем более остынут газы. Примем для короткого борова температуру газов в трубе 1000°.

$$Q_{1000} = 0{,}716 \times 4{,}66 = 3{,}336 \text{ м}^3$$

$$\omega = 3{,}336 : 4 = 0{,}83 \text{ м}^2$$

$$D = \sqrt{\frac{4\,\omega}{\pi}} = 1{,}00 \text{ м}.$$

Расход давления для рождения скоростей.

Первой скоростью, которую нам надо будет создать, явится скорость движения газа в подовых отвертстиях. При выходе струи в полость малого боровка эта скорость будет потеряна.

Второй—явится скорость свободного газослива в боковых окнах. При впадении потока в общий боров скорость его снова потеряется.

Третьей—будет скорость потока в общем борове. Эта скорость создается за счет имеющейся уже разности уровней в боковых и общем потоках и расхода давления на нее не потребуется.

Наконец, скорость в дымовой трубе вызовет при своем образовании еще некоторый расход давления.

Смотря на чертеж, мы видим, что в системе нашей печи будет ряд параллельно соединенных газовых путей, идущих через различные боковые боровки. При работе всякого параллельного соединения разность потенциалов в конце и начале каждого пути установится одна и та же. При движении газа одинаковой будет разность давлений. Слеловательно, и сопротивление для прохождения через каждый канал расчитанного количества газа должно быть одно и то же.

В нашей печи имеются всего восемь путей для газов. Их можно разделить на 2 группы: четыре одинаковых между собой пути через средние боровки и четыре одинаковых же пути через крайние боровки. Сопротивление в одной группе будет отличным от другой группы.

Подсчет этих сопротивлений, по предыдущему, располагаем в таблицы, при чем неизвестную пока высоту опускания газов от уровня пода печи до уровня газослива в окне мы обозначаем через a—для среднего боровка и через b—для крайнего боровка. (См. табл. стр. 8).

Согласно вышеизложенного, суммы сопротивлений на всех путях должны быть равны:

$$0{,}379 + 1{,}040\,a = 0{,}361 + 1{,}040\,b,$$

откуда

$$a + 0{,}017 = b.$$

По нашему заданию газосливы из боковых окон должны быть опущены ниже уровня потока в общем борове. Следовательно, наименьшей величиной a должна быть сумма расстояний: от уровня пода до свода общего борова и глубины газослива в боковом окне, т.-е.

$$a = 0{,}600 + 0{,}912 + 0{,}253 = 1{,}765 \text{ м}.$$

Примем 1,803 м, тогда b будет равно:

$$b = 1{,}803 + 0{,}017 = 1{,}820.$$

На чертеже должны быть расстояния:

от пода до среднего окна $1{,}803 - 0{,}253 = 1{,}550$ м;

до крайнего окна $1{,}820 - 0{,}218 = \sim 1{,}600$ м.

Путь дымовых газов через средний боровок.	Температура.	Об'ем газов при 0° С.	Об'ем газов при t °С.	Площадь сечения потока ω м²	Скорость v м/сек.	Скоростной напор h м.	Вес 1 м³ газ при 0° С.	Вес 1 м³ газ при t ° С.	δ.
Подовые отверстия . .	1200	0,716	3,87	4,50	0,86	0,04	1,35	0,25	0,010
Опускание газа от уровня пода до уровня газослива в окне	$a\left(1{,}29-\frac{1{,}35}{1+\frac{1200}{273}}\right)=a\,(1{,}29-0{,}25)=$ $=1{,}040a$								
Опускание газов на половину высоты газослива в окне [1]	$\frac{0{,}253}{2}\left(1{,}29-\frac{1{,}35}{1+\frac{1200}{273}}\right)=$ $=0{,}126\,(1{,}29-0{,}25)=0{,}131$								
Общий боров	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Дымовая труба . . .	1000	0,716	3,336	0,83	4,00	0,82	1,35	0,29	0,238
	$\Sigma\,\delta=0{,}379+1{,}040a$								

Путь дымовых газов через крайний боровок	Температура t^0 С.	Об'ем газов при 0° С.	Об'ем газов при t° С.	Площадь сечения потока ω м².	Скорость v м/сек.	Скоростной напор h м.	Вес 1 м³ при 0° С	Вес 1 м³ при t° С.	δ
Подовые отверстия .	1200	0,716	3,87	4,50	0,86	0,04	1,35	0,25	0,010
Опускание газов от уровня пода до уровня газослива в окне . . .	$b\,(1{,}29-1{,}35\times0{,}185)=1{,}040\,b$								
Опускание газов на половину высоты газослива в окне	$\frac{0{,}218}{2}\left(1{,}29-1{,}35\times0{,}185\right)=0{,}113$								
Общий боров	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Дымовая труба . . .	1000	0,716	3,336	0,83	4,00	0,82	1,35	0,29	0,238
	$\Sigma\,\delta=0{,}361+1{,}040$								

[1]) Скорость в газосливе создается за счет понижения уровня на $^1/_2$ высоты газослива. Глубина газослива = $^2/_3$ расстояния от уровня зеркала в сосуде до площадки газослива.

Сумма сопротивлений на пути газа будет:

1. $0{,}379+1{,}040\,.\,1{,}803=2{,}254$ мм в. ст.
2. $0{,}361+1{,}040\,.\,1{,}820=2{,}254$ „ „ „

Соответствующее этому разрежение в 2,254 мм в с. должна дать дымовая труба.

Расчет дымовой трубы.

Подсчитаем сначала минимальную высоту трубы. Это задача обратная той, которую мы уже решали для топки.

$$h=\frac{\Sigma\,\delta}{1{,}29-1{,}35\,\frac{1}{1+\alpha t}}=\frac{2{,}254}{1{,}29-0{,}29}=2{,}254\text{ м},$$

или от уровня пода печи

$$2{,}254-(0{,}912+0{,}600)=0{,}742\text{ м}.$$

Но, так как ниже известного предела в заводах строить трубы нельзя, то придется сделать трубу выше, а избыток разрежения, даваемого ею, ликвидировать дымовою заслонкой борова.

Примем высоту трубы $H=16$ м ,тог. а избыток разрежения даваемого ею будет:

$$\Delta=(H-h)\;(1{,}29-1{,}35\,.\,0{,}21)=$$
$$=15{,}26\,.\,1{,}01=15{,}41\text{ мм в. с.}$$

Рабочую площадь дымового пролета определим аналогично поддувалу.

	Температура.	Об'ем газов при 0° С.	Об'ем газов при t° С.	Запас гидростатич. давления.	Вес 1 м³ газа при 0° С.	Вес 1 м³ газа при t° С.	Скоростной напор h м.	Скорость v м/сек.	Площадь сечения пролета.
Дымовой пролет . .	1200	0,716	3,87	15,41	1,35	0,29	53,1	32,3	0,12

Из полученной площади дымового пролета и ширины борова находим нормальную высоту поднятия дымовой заслонки.

$$h=\frac{0{,}12}{0{,}9}=0{,}13\text{ м}.$$

Обыкновенно печными газами кирпичеобжигательных печей отапливаются помещения фабрик и тогда часть неиспользованной тяги трубы полезно расходуется на преодоление сопротивлений отопительных боровов.

Приведенный расчет дымовой трубы указывает на полную возможность строить печи для обжига кирпича с очень невысокой центральной трубой, Такие печи делают в Америке, устанавливая их во дворе кирпичных заводов.

ГЛАВА II.

Расчет печи с рекуператором для производства кровельного железа [1]).

Требованиями производства являются: совершенно равномерный нагрев сутунки и недопустимость окисления нагреваемого металла, т.-е. безкислородная атмосфера на поду печи.

Поэтому для правильной работы печь должна быть рассчитана на

1) горение с теоретическим количеством воздуха, и

2) постоянный избыток на поду печи положительного давления, чтобы недопустить засасывания в печь холодного воздуха во время открывания рабочих окон.

По типу это печи камерные, т. к. требуемая на поду температура 1000°С относительно невысока, а горение без избытка воздуха, обусловливает необходимость иметь хорошую сожигательную камеру. Такой камерой служит подсводовое пространство высотой не менее 1 — 1,5 м.

Размеры пода определяются величиной нагреваемых листов железа и производительностью печи, которая принимается около 200 кг на м² поверхности пода в час.

Работа производится с двух нагревов, т.-е. сутунка нагревается первый раз до 1000° и прокатывается в полулисты, затем эти полулисты, остывшие, примерно, до 600°, снова садятся в печь, подогреваются до 900° и прокатываются в листы.

Прежде чем приступить к расчету печи установим понятия полной и полезной теплоотдачи.

Полной теплоотдачей в рабочем пространстве печи мы будем называть все то количество тепла, которое печные газы, охлаждаясь от некоторой максимальной температуры до температуры у пода, отдадут рабочему пространству в течение одной секунды.

Полезной теплоотдачей в рабочем пространстве печи мы будем называть то количество тепла, которое усвоивается нагреваемыми в печи материалами в течение одной секунды.

Очевидно разность между первой и второй величинами представит потери тепла на теплопроводность стенок печи, лучеиспускание и т. п. Величина полезной теплоотдачи может быть получена из полной при умножении последней на некоторый коэффициент. Этот коэффициент будет зависеть как от рода рабочего процесса совершаемого в печи, так и от конструкции рабочего пространства, т.-е. его размеров, толщины стенок печи и т. п. Ввиду невозможности учесть все эти обстоятельства, мы пока будем брать величину коэффициента полезной теплоотдачи из наблюдений и подсчетов данного процесса в работающих на практике печах подобной конструкции.

[1]) Расчет сделан К. Ф. Оленевым.

Задание.

Рекуперативная печь для прокатки кровельного железа с двух нагревов производительностью 13 тн (800 пудов) в сутки. Топка полугазовая; количество вторичного воздуха $^1/_3$; температура подогрева его 300°С; топливо—Богословский бурый уголь состава:

C	45,40%
H_2	2,86
O_2	20,93
$_2$	0,30
H_2O	18,37
Зола	12,54
	100,40%

Расчет топлива.

Теоретически необходимое количество воздуха 18,305 мо на 100,4 гр б. у., или . . . 4,08 м³/кг.

Количество продуктов горения . . 4,62 м³/кг.

Вес 1 м³ продуктов горения . . . 1,33 кг/м³.

Состав продуктов горения из 100,4 гр б. угля:

CO_2	3,783 мо
H_2O	2,451 „
$_2$	14,472 „

Теплотворная способность б. у. 3519 Кал/кг.

Определение расхода топлива и количества газов.

А. Подсчет полезной теплоотдачи (T_p) по нагреву металла. Нагревается железа в секунду:

$$\frac{13\,000}{24 \times 60 \times 60} = 0{,}15 \text{ кг/сек.}$$

Тратится на первый нагрев, от 0° до 1000°С, тепла:

$0{,}15 \times 0{,}168$ [1]) $\times 1000 \times 1000 = 25.200$ кал/сек.

[1]) См. приложения.

Тратится на второй подогрев, от 600° до 900°С, тепла:

$$\{0{,}170 \times 900 - 0{,}142 \times 600\}\ 0{,}15 \times 1000 = 10.170 \text{ кал/сек.}$$

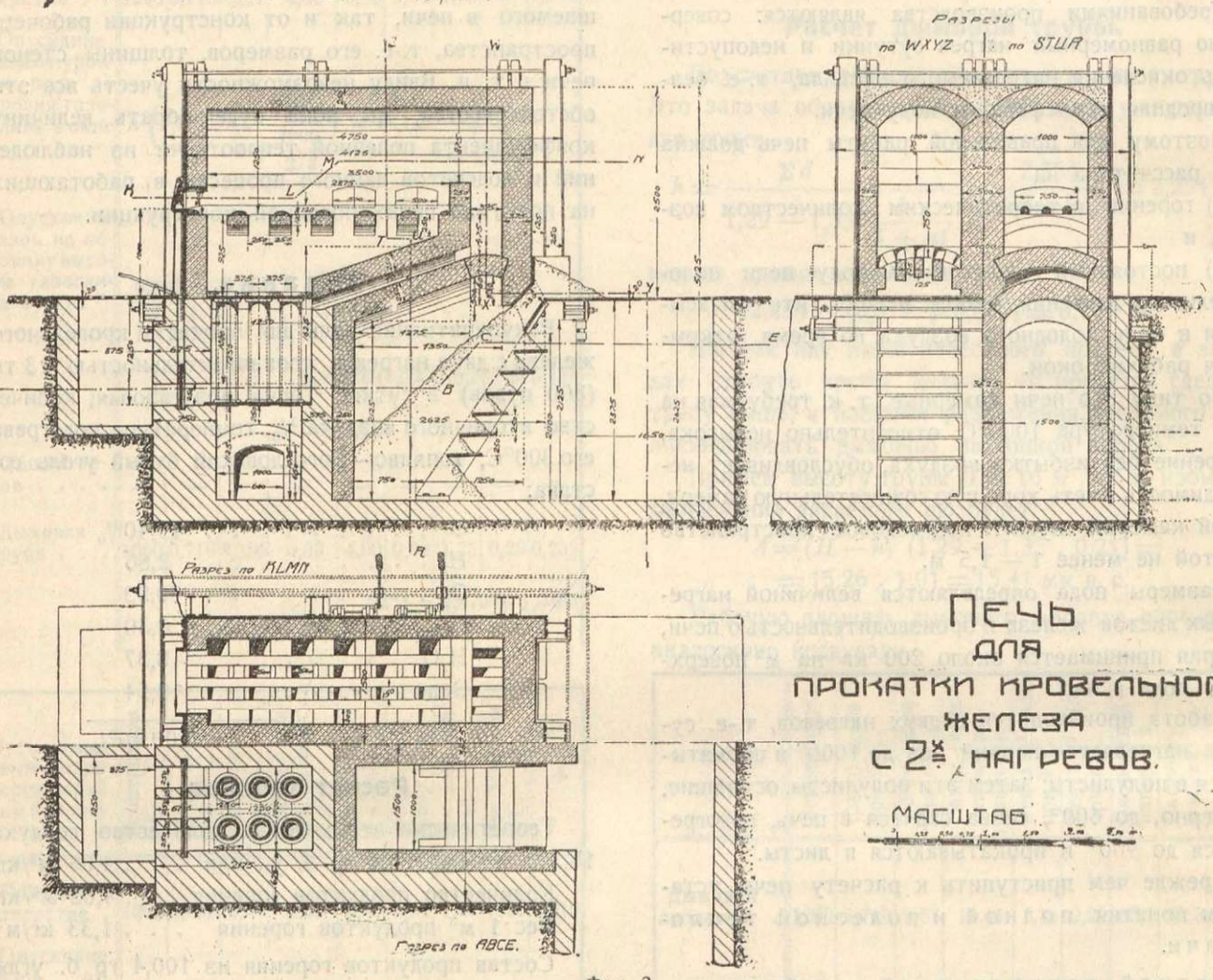
Полезная теплоотдача:

$T_p = 25.200 + 10.170 = 35.370$ кал/сек.

Полная теплоотдача рабочих газов будет:

$$3.519.000\,x + 125.000\,x - 1.668.000\,x = 1.976.000\,x \text{ кал/сек.}$$

На основании опытных данных мы можем принять коэффициент полезной теплоотдачи в 0,3.



Фиг. 3.

В. Подсчет полезной теплоотдачи (T_p) по полной теплоотдаче (T). Обозначим количество топлива, в кг, расходуемое в 1 секунду через x.

Тогда:

Горение угля вносит: $3.519.000\,x$ кал/сек.

Вторичный воздух нагретый до 300° вносит:

$$\tfrac{1}{3} \times 18{,}305 \times 2.059 \times \frac{1000}{100{,}4} \times x \times 1000 = \sim 125.000\,x \text{ кал/сек.}$$

Продукты горения нагретые до 1000°С уносят тепла:

CO_2 . . .	$3{,}783 \times 11.317 =$	42.812	кал
H_2O . . .	$2{,}451 \times 8.750 =$	21.446	„
N_2 . . .	$14{,}472 \times 7.135 =$	103.258	„
		167.516	кал

$$\frac{167.516 \times 1000}{100{,}40} \times x = 1.668.000\,x \text{ кал/сек.}$$

Тогда полезная теплоотдача определяется

$T_p = 0{,}3 \times 1.976.000 \times x = 592.800\,x$ кал/сек.

Теперь из сравнения найденных T_p определим x

$$592.800\,x = 35.370;$$

отсюда $x = 0{,}060$ кг/сек $= 216$ кг/час.

Расход топлива в % веса нагреваемого металла:

$$\frac{216 \times 24 \times 100}{13\,000} = \sim 40\%.$$

Первичного воздуха будет поступать в топку, при 0°:

$$\tfrac{2}{3} \times 4{,}08 \times 0{,}060 = 0{,}163 \text{ м}^3\text{/сек.}$$

Вторичного воздуха поступит в печь, при 0°:

$$\tfrac{1}{3} \times 4{,}08 \times 0{,}060 = 0{,}082 \text{ м}^3\text{/сек.}$$

Продуктов горения получится в печи, при 0°:

$$4{,}62 \times 0{,}060 = 0{,}277 \text{ м}^3\text{/сек}$$

Расчет топки.

Для определения количества газов покидающих топку, нужно принять в расчет то, что из полугазовой топки уходят продукты незаконченных реакций горения, содержащие CO и H_2. При смешении их со вторичным воздухом происходит реакция полного горения, причем кислород вторичного воздуха, сжигая CO в CO_2 и H_2 в H_2O, не увеличивает об'ема продуктов горения. Увеличение об'ема происходит только за счет азота. Поэтому об'ем газов покидающих топку M_{01} получим, если из полного секундного об'ема печных газов вычтем азот вторичного воздуха

$$0{,}277 - 0{,}082 \cdot 0{,}79\ ^{1}) = 0{,}212 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Для многозольного бурого угля самое удобное будет устроить топку с наклонной, ступенчатой колосниковой решеткой.

Примем конструктивно подходящие для нашей печи (фиг. 3) размеры решетки по вертикальной проекции:

высота 2 м и ширина 1 м.

Поверхность решетки будет: $2 \times 1 = 2$ м^2.

Напряжение решетки $\frac{216}{2} = 108$ кг/м^2 час.

Высота передней стенки топки определится глубиной газослива по формуле И. Есьмана (см. ч. II)

$$h_1 = A\sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 t}},$$

где B — ширина топки $= 1$ м,

t — предположительно около 800°C,

$Q = 0{,}212 \times 3{,}93 = 0{,}833$ м^3.

$$h_1 = 3{,}42\sqrt[3]{\frac{0{,}833^2}{1^2 \times 800}} = 325 \text{ мм}.$$

На чертеже эта высота сделана в 330 мм.

Расчет рекуператора.

Для определения поверхности рекуператора воспользуемся таблицей проф. И. А. Тиме (см. приложения), согласно которой для нагрева 1 м^3 воздуха до 300°, проходящего через рекуператор в 1 минуту, необходимо 1,0 м^2 поверхности труб.

Количество вторичного воздуха проходящего через рекуператор в 1 минуту:

$$0{,}082 \times 60 = 4{,}92 \text{ м}^3/\text{мин}.$$

Поверхность рекуператора

$$4{,}92 \times 1{,}0 = 4{,}92 \text{ м}^2.$$

Из эскиза печи (фиг. 3) видно, что можно сделать рекуператор из 6 чугунных труб внутреннего диаметра 210 мм и толщиной стенок в 20 мм.

Нужная длина труб определится из расчета поверхности.

$$\pi \cdot 0{,}250 \cdot 6 \cdot l = 4{,}92$$

$$l = 1{,}044 \text{ м}.$$

На чертеже эта высота сделана в 1,25 м.

Подсчитаем работу рекуператора, температуру дыма и количество тепла уносимое дымом, выходящим из рекуператора. Эти цифры будут нужны при составлении баланса печи.

Количество тепла уносимое из рекуператора воздухом при 300°C:

$$\frac{0{,}082}{0{,}0224} \times 2.059 = 7.536 \text{ кал/сек}.$$

Принимая, что 30% тепла отдаваемого дымом в рекуператоре идут на лучеиспускание стенок рекуператора, а остальные 70% идут на нагрев воздуха, мы получим, что дым должен оставить в рекуператоре

$$7.536 : 0{,}7 = 10.765 \text{ кал/сек}.$$

Продукты горения поступающие в рекуператор при 1000°C приносят тепла

CO_2 . . .	$3{,}783 \times 11.317 =$	42.812	кал
H_2O . . .	$2{,}451 \times 8.750 =$	21.446	„
N_2 . . .	$14{,}472 \times 7.135 =$	103.258	„
		167.516	кал

$$167.516 \times \frac{60}{100{,}4} = 100.109 \text{ кал/сек}.$$

Выходя из рекуператора, они уносят тепла:

$$100.109 - 10.765 = 89.344 \text{ кал/сек}.$$

или на 100,4 гр б. у.

$$89.344 \times \frac{100{,}4}{60} = 149.502 \text{ кал}.$$

Продукты горения нагретые до 900° содержат тепла:

CO_2 . . .	$3{,}783 \times 10.027 =$	37.932	кал
H_2O . . .	$2{,}451 \times 7.781 =$	19.071	„
N_2	$14{,}472 \times 6.381 =$	92.346	„
		149.349	кал.

Теперь, интерполированием в пределах от 900° до 1000°, мы можем найти температуру дыма:

167.516 кал	149.502 кал
149.349 „	149.349 „
18.167 кал	153 кал

$$\frac{x}{100} = \frac{153}{18.167}; \quad x = 1°.$$

Температура дыма при выходе из рекуператора равна $900 + 1 = 901$°C.

---

[1]) Состав воздуха принимаем: O_2—21%, N_2—79% (по об'ему).

Тепловой баланс печи.

Приход:

Горение бурого угля дает
3.519.000 × 0,060 = 211.140 кал.
Вторичным воздухом нагретым
до 300° приносится 7.536 „
218.676 кал.

Расход:

На подогрев нагреваемых материалов 35.370 кал.
На подогрев вторичного воздуха 7.536 „
На лучеиспускание рабочего пространства и топки:
$T - T_p = 1.976.000 \times 0{,}060 - 35.370 = 83.190$ „
На лучеиспускание рекуператора:
10.765 — 7.536 = 3.229 „
Уносится дымом . . . . . 89.344 „
218.669 кал.

Определение основных размеров рабочего пространства.

Площадь и линейные размеры пода мы определим сообразуясь с опытной нормой производительности подобных печей с единицы площади пода около 200 кг/м² час и размером нагреваемых листов железа.

Площадь пода:

$$\frac{13\,000}{24 \times 200} = 2{,}7 \text{ м}^2.$$

Удобно будет сделать ширину пода 1,000 м
длину „ 2,875 м,
тогда площадь пода будет:

$$1{,}000 \times 2{,}875 = 2{,}875 \text{ м}^2.$$

Об'ем и высоту рабочего пространства мы определим исходя из размеров пода и необходимого времени пребывания топочных газов в камере печи. В условиях нашей печи, т.-е. горения с теоретическим количеством воздуха, на слабо подогретом вторичном воздухе и энергичной теплоотдаче, реакция горения требует для своего завершения не менее 3 секунд времени, и наблюдаемая в печи температура не поднимается выше 1100°С. Следовательно, мы должны принять такой об'ем рабочего пространства печи, чтобы в нем газы могли пробыть 3 секунды, иначе говоря, сделать об'ем рабочего пространства равным тройному секундному об'ему продуктов горения при 1100°С, т.-е.:

$$3 \times 0{,}277 \times 5{,}03 = 4{,}180 \text{ м}^3.$$

Ширина рабочего пространства равна ширине пода = 1,000 м.

Длина рабочего пространства = длине пода + + ширина порога + ширина пламенного окна = = 2,875 + 0,250 + 0,375 = 3,500 м.

Высота камеры:

$$\frac{4{,}180}{3{,}500 \times 1{,}000} = 1{,}200 \text{ м}.$$

На эскизе высота высшей точки свода над подом сделана 1,250 м.

Расчет движения рабочих газов.

Первый путь.

Топка — газовые пролеты — пламенный канал (до уровня пода печи).

А. Запас положительного давления

1) от нижнего края передней стенки в топке до конца газовых пролетов:

$h = 0{,}6$ м (см. фиг. 3),

$t = 800°$C (приблизительно).

$\Delta_1 = 0{,}6\ (1{,}29 - 1{,}33 \cdot 0{,}254) = 0{,}57$ мм вод. ст.

2) в пламенном канале:

$h = 0{,}475$ м,

$t = \sim 1000°$C.

$\Delta_2 = 0{,}475\ (1{,}29 - 1{,}33 \cdot 0{,}214) = 0{,}48$ мм в. с.

Всего запас на первом пути:

$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = 0{,}57 + 0{,}48 = 1{,}05$ мм в. с.

Б. Расход положительного давления:

Нам необходимо будет затратить давление для рождения скорости в газовых пролетах, площадь коих по эскизу (фиг. 3) равна:

$$0{,}375 \times 0{,}125 \times 4 = 0{,}187 \text{ м}^2.$$

Дополнительного расхода давления для рождения скорости в пламенном канале не будет, так как при переходе из газовых пролетов в пламенный канал изменений в направлении движения газа нет и площадь сечения пламенного канала больше, т.-е. новая скорость газа будет меньше прежней.

Так, расход давления будет:

Путь печных газов.	Температура в °С.	Об'ем печных газов при $t°$.	Площадь сечения м².	Скорость, v м/сек.	Скоростной напор h м.	Вес 1 м³ газов при 0° С.	Вес 1 м³ газов при t°С.	δ
Газовые пролеты. . . .	800°	0,833	0,187	4,5	0,987	1,33	0,34	0,34
							$\Sigma\delta = 0{,}34$	

Остаток положительного давления

$\Delta - \Sigma\delta = 1{,}05 - 0{,}34 = 0{,}71$ мм в. с.

регулируем открывая и прикрывая поддувало.

Второй путь вторичного воздуха.

Рекуператор—воздушный канал под подом.

А. Запас положительного давления

1) в рекуператоре:

$$h = 1{,}525 \text{ м}$$

(от уровня верхнего края поддувала до уровня отверстий в пламенный канал) и

$$t = \sim 200°\text{C}.$$

$$\Delta_1 = 1{,}525\ (1{,}29 - 1{,}29.0{,}578) = 0{,}82 \text{ мм в. с.}$$

2) в пламенном канале при

$$h = 0{,}475 \text{ м},$$

$$t = \sim 1000°\text{C}.$$

$$\Delta_2 = 0{,}475\ (1{,}29 - 1{,}33 \,.\, 0{,}214) = 0{,}48 \text{ мм в. с.}$$

Всего запаса на втором пути:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = 0{,}82 + 0{,}48 = 1{,}30 \text{ мм в. с.}$$

Б. Расход положительного давления.

В камере рекуператора скорость очень невелика ($\sim$ 0,13 м/сек), сопротивление ничтожно и потому им можно пренебречь.

Сечение воздушного канала под подом печи:

$$0{,}125 \times 1{,}000 = 0{,}125 \text{ м}^2.$$

Расход давления:

Путь воздуха.	Температура в °C.	Количество воздуха при t °C в м³.	Площадь сечения в м².	Скорость воздуха в м/сек.	Скоростной напор h в м.	Вес 1 м³ воздуха при 0°C.	Вес 1 м³ воздуха при t°C.	δ
Воздушный канал под подом. . . .	300	0,172	0,125	1,4	0,10	1,29	0,61	0,06
							$\Sigma\delta =$	0,06

Сопротивление в пламенном пролете не принимаем во внимание (см. выше).

Остаток положительного давления:

$$\Delta - \Sigma\delta = 1{,}30 - 0{,}06 = 1{,}24 \text{ мм в. с.}$$

ликвидируем, прикрывая площадь впускных отверстий для вторичного воздуха.

Определим эту площадь:

Путь воздуха.	Температура в °C.	Количество воздуха в м³.	Вес 1 м³ воздуха при 0°C.	Вес 1 м³ воздуха при t°C.	Избыток гидростатич. давл. в мм в. с.	Избыток скоростного напора в м.	Скорость воздуха в м/сек.	Площадь впускных отверстий.
Отверстие для впуска вторичного воздуха. .	0°	0,082	1,29	1,29	1,24	1,00	4,35	0,019

Таким образом размер отверстий для впуска воздуха примем:

$$3 \times 0{,}250 \times 0{,}025 = 0{,}019 \text{ м}^2.$$

Расчет движения отработавших газов.

Сечение каналов.

1) Рабочие окна:

Примем ширину большего окна 0,750 м, малых окон по 0,500 м. Наибольшая допустимая высота окон определится из формулы высоты газослива в открытом окне:

$$h = 2{,}94 \sqrt[3]{\frac{(0{,}277 \,.\, 4{,}66)^2}{(0{,}75)^2 \,.\, 1000}} = 0{,}423 \text{ м}.$$

Для работы достаточно взять высоту окон в 0,200 м.

2) Отверстия в поду печи:

Общая площадь их:

$$250 \times 150 \times 12 + 250 \times 200 \times 12 = 1{,}05 \text{ м}^2.$$

Считаем, что $^2/_3$ площади пода покрыты нагреваемыми предметами, тогда свободная площадь отверстий

$$1{,}05 \times {}^1/_3 = 0{,}35 \text{ м}^2.$$

3) Трубы рекуператора, их сечение:

$$6\,\frac{\pi\ 0{,}21^2}{4} = 0{,}208 \text{ м}^2.$$

4) Дымовой боров:

Примем ширину его 0,600 м. Высоту определим из формулы И. Есьмана.

$$h = 3{,}69 \sqrt[3]{\frac{(0{,}277 \,.\, 4{,}30)^2}{(0{,}6)^2 \,.\, 900}} = 0{,}600 \text{ м}.$$

Сделаем высоту борова с запасом = 0,650 м.

Расход давления на рождение скоростей.

Путь дымовых газов.	Температура в °C.	Количество дымовых газов при t°C в м³.	Сечение канала в м².	Скорость в канале м/сек.	Скоростной напор в м.	Вес 1 м³ дымовых газов при 0°C	Вес 1 м³ дымовых газов при t°C.	
Отверстия пода .	1000	1,291	0,350	3,7	0,698	1,33	0,285	0,20
Трубы рекуператора . . .	1000	1,291	0,208	6,2	1,96	1,33	0,285	0,56
Дымовой боров . .	900	1,190	0,360	3,3	0,555	1,33	0,310	0,17
								$\Sigma\delta = 0{,}93$

Противодавление столба газов от уровня пода печи до зеркала потока в дымовом борове:

$$3{,}250\ (1{,}29 - 1{,}33 \times 0{,}223) = 3{,}22 \text{ мм в. с.}$$

$$\Sigma\delta = 0{,}93 + 3{,}22 = 4{,}15 \text{ мм в. с.}$$

Высота дымовой трубы расчитывается аналогично остальным примерам.

ГЛАВА III.

Расчет методической печи Сименса с разделением пламени для нагрева слитков [1]).

Эта печь на ряду с преимуществами методического подогрева слитков соединяет в себе еще экономичность и легкость управления, свойственные регенеративным печам. Идея устройства печи состоит в том, что пламя или раскаленные продукты горения в печи разделяются на две ветви. Одна из них, пройдя камеру высокой температуры, идет в регенератор, а другая ветвь из камеры высокой температуры направляется в длинную камеру низкой температуры, где постепенно нагревает подвигающиеся ей навстречу слитки. Печь имеет только воздушные регенераторы.

Подробности устройства таких печей и примеры конструкций приведены в четвертой части (глава III). Здесь мы остановились только на расчете основных размеров.

Задание.

Методическая газовая регенеративная печь с разделением пламени на производительность 100 тн (6000 пуд) слитков в сутки. Размер слитка: вверху 130 × 130 мм внизу 150 × 150 мм, высота слитка 0,9 метра. Генераторная установка рядом с печью.

Топливо—бурый уголь, состава:

C	42,36%
H_2	2,94
O_2	11,92
N_2	2,00
S	0,78
H_2O	18,00
Зола	22,00
	100,00%

Данные расчета генераторного газа.

Состав газа:

CH_4 . . .	2,01%	0,235 мо
CO_2	6,38	0,746
CO_2	21,80	2,549
H_2	13,79	1,495
S_6	0,02	0,002
SO_2	0,10	0,012
N_2	46,23	5,406
HO_2	10,67	1,247
	100,00%	

Температура газа на колошнике . . . 446° C

Расход вторичного воздуха при 50% избытка . . . 17,866 мо/100 гр = 4,006 м³/кг б. у

Состав и количество продуктов горения:

CO_2	3,530 мо
SO_2	0,024
H_2O	3,212
N_2	19,536
O_2	1,252
	27,554 мо/100 гр = 6,172 м³/кг.

Вес 1 м³ продуктов горения. . . . 1,30 кг/м³.

Теплопроизводительная способность газа: 306.371 кал/100 гр б.у. = 1170 Кал/м³ газа.

Количество газа из 1 кг угля = 2,619 м³/кг. При 446°, он содержит тепла 38.364 кал/100 гр б. у.

Вес 1 м³ газа при 0° C . . . . . 1,09 кг/м³.

Расчет рабочего пространства печи.

Примем падение температуры продуктов горения в камере высокой температуры рабочего пространства в 200° в секунду; продолжительность нахождения этих продуктов там же в 2 секунды; температура продуктов горения покидающих камеру высокой температуры 1400° C.

Тогда теоретическая температура горения должна быть:

$$1400 + 200 \times 2 = 1800^\circ \text{ C.}$$

Продукты горения при этой температуре должны иметь тепла:

CO_2 . .	3,530 × 22.014 =	77.709 кал
SO_2 . .	0,024 × 22.014 =	528 „
HO_2 . .	3,212 × 18.209 =	58.487 „
N_2 . . .	19,536 × 13.491 =	263.560 „
O_2 . . .	1,252 × 13.851 =	17.341 „
		417.625 кал.

Газ нагретый до 446° содержит тепла 38.364 кал.

При горении газа выделится . . . 306.371 кал.

Горячий вторичный воздух должен доставить:

$$417.625 - 38.364 - 306.371 = 72.890 \text{ кал.}$$

Количество вторичного воздуха будет 17,866 мо на 100 гр б. у. В каждом мо должно заключаться тепла:

$$72.890 : 17,866 = 4.080 \text{ кал.}$$

Температура подогрева вторичного воздуха определяется в 584° C.

[1]) Расчет сделан Н. А. Соболевским и впоследствии пересчитан согласно новым теплоемкостям и термичностям реакций.

Принимая во внимание, что в боровках ведущих к регенераторам, воздух подогреется до 50° и будет заключать в себе тепла

$$337 \times 17{,}866 = 6.021 \text{ кал},$$

мы определим работу регенераторов в

$$72.890 - 6.021 = 66.869 \text{ кал}.$$

Следовательно регенератор должен отдать воздуху 66.869 кал, а получить от продуктов горения 66.869 + 20% на лучеиспускание т.-е.

$$66.869 : 0{,}8 = 83.586 \text{ кал}.$$

Предположим, что продукты горения охладятся в регенераторах от 1400° до 300° (этим предположением мы не вводим ничего произвольного, т.-к. задание температуры дыма есть такое же задание, как производительность печи и от него зависит только об'ем регенераторов. Чем ниже будет задана температура дыма, тем больше придется сделать регенераторы).

Продукты горения содержат тепла

при 1400°:

CO_2 . . .	3,530 × 16.607 =	58.623	кал
SO_2 . . .	0,024 × 16.607 =	399	„
H_2O . .	3,212 × 13.019 =	41.817	„
N_2 . . .	19,536 × 10.241 =	200.068	„
O_2 . . .	1,252 × 10.521 =	13.172	„
		314.079	кал,

при 300°:

CO_2 . .	3,530 × 2.926 =	10.329	кал
SO_2 . .	0,024 × 2.926 =	70	„
H_2O . .	3,212 × 2.461 =	7.905	„
N_2 . . .	19,536 × 2.046 =	39.971	„
O_2 . . .	1,252 × 2.106 =	2.637	„
		60.912	кал.

Охлаждаясь от 1400° до 300°, продукты горения отдадут тепла:

$$314.079 - 60.912 = 253.167 \text{ кал}.$$

Таким образом в регенераторы надо будет направить

$$83.586 : 253.167 \times 100 = 33\%$$

всех продуктов горения.

В направленных в подогревательную камеру продуктах горения заключается тепла:

$$253.167 - 83.586 = 169.581 \text{ кал},$$

из этого количества тепла надо считать потерянными на лучеиспускание 30%. Тогда на нагрев слитков пойдет:

$$169{,}581 \times 0{,}7 = 118.707 \text{ кал}.$$

Слиток подогретый до 900° С содержит тепла:

$$0{,}170^1) \times 900 \times 1000 = 153.000 \text{ кал}.$$

теплом, полученным от горения 100 гр бурого угля, можно подогреть:

$$118.707 : 153.000 = 0{,}776 \text{ кг железа},$$

а для подогрева 6000 пудов или 100 000 кг понадобится бурого угля:

$$\frac{100\,000 \times 0{,}1}{0{,}776} = \sim 12\,900 \text{ кг} = 790 \text{ пудов}$$

$$\text{или, } \frac{12\,900}{100\,000} \times 100 = 12{,}9\% \text{ от посада}.$$

Остальной подогрев слитков от 900° до 1200° пойдет за счет тепла всех продуктов горения между температурами 1800° и 1400°.

Для нагрева 1 кг железа от 900° до 1200° нужно тепла:

$$(0{,}167 \times 1200 - 0{,}170 \times 900) \times 1000 = 47.400 \text{ кал},$$

а для нагрева 0,776 кг понадобится тепла:

$$47.400 \times 0{,}776 = 36.782 \text{ кал}.$$

Продукты горения, охлаждаясь от 1800° до 1400° оставляют тепла:

$$417.625 - 314.079 = 103.546 \text{ кал}.$$

Из этого тепла 36.782 кал пойдут на нагрев слитков, а остальные

$$103.546 - 36.782 = 66.764 \text{ кал}$$

на лучеиспускание и утечку газов.

Высота свода в камере высокой температуры определится из об'ема печных газов. Секундный расход топлива:

$$\frac{12\,900}{24 \times 60 \times 60} = 0{,}149 \text{ кг б. у./сек}.$$

Секундный об'ем печных газов при 0° С будет в камере высокой температуры:

$$6{,}172 \times 0{,}149 = 0{,}920 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Наблюдаемая температура 1400° С. Секундный об'ем при 1400° С:

$$0{,}920 \times 6{,}13 = 5{,}64 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Считая время пребывания печных газов в камере высокой температуры в 2 секунды (см. выше), получим об'ем камеры

$$5{,}64 \times 2 = 11{,}28 \text{ м}^3.$$

Площадь пода делаем (см. фиг. 4)

$$1{,}5 \times 3{,}5 + 2 \times 1 \times 0{,}75 = 6{,}75 \text{ м}^2.$$

---

[1]) См. таблицу в приложении.

Тогда высота свода будет

$$11{,}28 : 6{,}75 = 1{,}67 \text{ м.}$$

По формуле И. Есьмана глубина потока будет:

$$h = A\sqrt[3]{\frac{Q^2}{B^2 t}} = 3{,}45\sqrt[3]{\frac{5{,}64^2}{1{,}5^2 \times 1400}} = 0{,}750 \text{м.}$$

Высота свода в камере высокой температуры более чем в 2 раза превышает глубину газослива, следовательно, под сводом места совершенно достаточно для обращения потока горячих газов на 180°.

Общая высота будет:

$$0{,}500 + 0{,}208 = 0{,}708 \text{ м.}$$

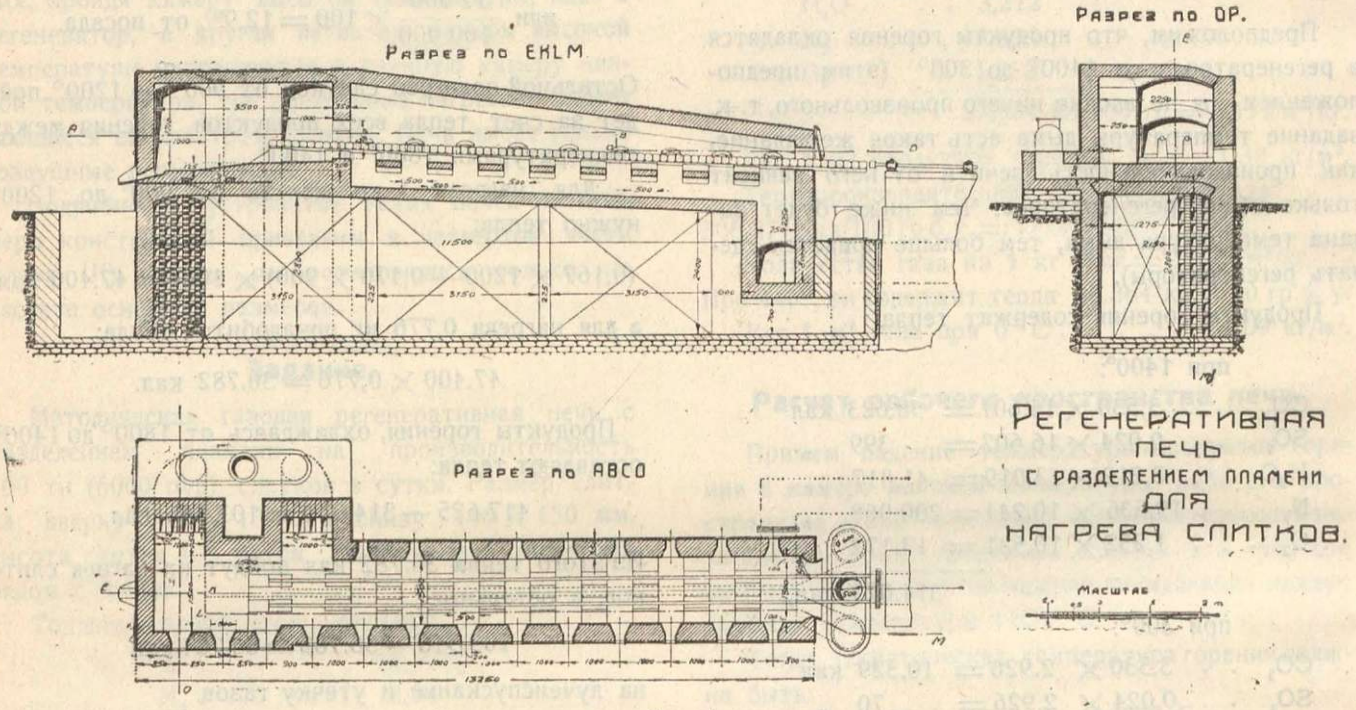
или круглым счетом 710 мм.

Расстояние от слитков до занавески:

$$710 - 300 - 150 = \sim 260 \text{ мм,}$$

т. е. можно грузить еще и во второй ряд. На этот случай, во избежание уменьшения полезного сечения газослива, поднимем занавеску еще на пол толщины поля слитков т. е. на:

$$\frac{0{,}135}{2 \times 1{,}3} = 0{,}052 \text{ м,}$$



Фиг. 4.

Высоту занавески над подиной расчитаем как газослив, через который проходит $100 - 33 = 67\%$ всех продуктов горения, т.-е.:

$$0{,}920 \times 0{,}67 = 0{,}616 \text{ м}^3\text{/сек,}$$

или при 1400° С:

$$0{,}616 \times 6{,}13 = 3{,}78 \text{ м}^3\text{/сек.}$$

Глубина потока для пропуска этих продуктов горения под занавеску найдется по формуле И. Есьмана ($E = 0{,}35$ м):

$$h = 2{,}86\sqrt[3]{\frac{3{,}78^2}{1{,}3^2 \times 1400}} = \sim 0{,}500 \text{ м.}$$

Сечение слитков ($0{,}9 \times 0{,}150 = 0{,}135$ м²) и подставок для труб $\left(\frac{0{,}2 + 0{,}25}{2} \times 0{,}3 \times 2 = 0{,}135 \text{ м}^2\right)$ составит: $0{,}135 + 0{,}135 = 0{,}270$ м². Для покрытия этого сечения занавеску надо приподнять на

$$0{,}270 : 1{,}3 = 0{,}208 \text{ м.}$$

тогда общая высота занавески над подиной будет:

$$710 + 52 = \sim 760 \text{ мм.}$$

Сечение дымового борова, выводящего продукты горения из рабочего пространства, расчитываем как газослив шириной 750 мм.

Глубина газослива:

$$h_{300} = 3{,}69\sqrt[3]{\frac{1{,}294^2}{0{,}75^2 . 300}} = \sim 800 \text{ мм.}$$

Тепловой баланс печи.

(На 100 гр б. у.).

Приход.

Принесено газом нагретым до 446° физической теплоты	38.364	кал.
Химическая энергия газа	306.371	„
Подогретым воздухом вносится	66.869 + 6.021 = 72.890	„
	417.625	кал.

Расход.

На подогрев слитков до 900° . .	118.707	кал.
„ „ „ от 900° до 1200°	36.782	„
На лучеиспускание:		
камеры высокой температуры . .	66.764	„
подогревательной камеры 169.581 — 118.707 =	50.874	„
регенераторов 83.586 — 66.869 =	16.717	„
В дым	60.912	„
На подогрев воздуха	66.869	„
	417.625	кал.

Полезная работа печи:
на нагрев слитков пойдет

$$118.707 + 36.782 = 155.489 \text{ кал},$$

что составит от теплотворной способности газа:

$$\frac{155.489}{306.371} = 50{,}8\%.$$

Регенераторы.

От секундного расхода б. у. в регенераторы поступает тепла

$$\frac{83.586 \times 0{,}149}{0{,}1} = 124.543 \text{ кал/сек},$$

из которых:

$$0{,}8 \times 124.543 = 99.634 \text{ кал}$$

полезной работы, и

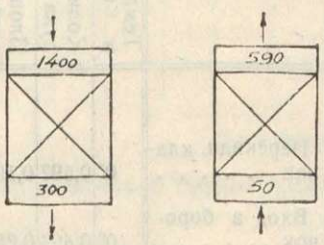
$$124.543 - 99.634 = 24.909 \text{ кал}$$

на лучеиспускание.

Но регенератор должен воспринять от газов не всю, а только часть этой работы, а именно: всю полезную работу $+ {}^1/_2$ на лучеиспускание, т.-е.

$$99.634 + {}^1/_2 \times 24.909 = 112.089 \text{ кал}.$$

Для принятого нами распределения температур (см. фиг. 5) мы получим среднюю температуру продуктов горения [1]):



Фиг. 5.

$$\frac{1400 + 300}{2} = 850° \text{ C};$$

среднюю температуру нагреваемого воздуха:

$$\frac{590 + 50}{2} = 320° \text{ C}.$$

Разность между средними температурами

$$850 - 320 = 530° \text{ C}.$$

При этой разности, падение температуры кладки считается 2,332° в минуту, или

$$2{,}332 : 60 = 0{,}0388°/\text{сек}.$$

Об'ем насадки регенераторов определим по формуле

$$Q = P \cdot c' \cdot \tau \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (a)$$

где Q—количество тепла, отдаваемого регенераторами в секунду = 112.089 кал,

τ—найденное нами падение температуры насадки в секунду = 0,0388°,

c'—теплоемкость кирпича, которая, при средней температуре между средними температурами продуктов горения и воздуха, равной

$$\frac{850 + 320}{2} = 585°,$$

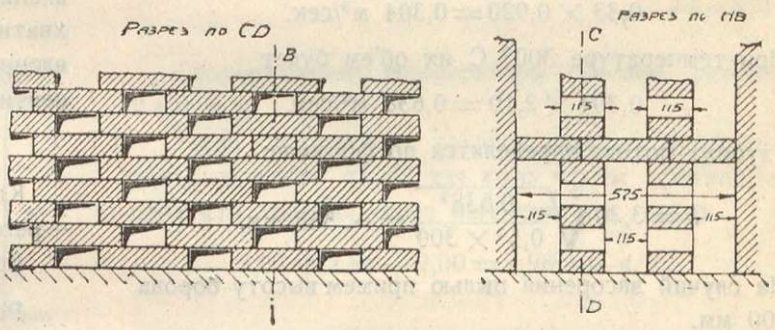
будет найдена по формуле

$$c' = 0{,}185 + 2 \times 0{,}000075\, t,$$

т.-е.

$$c^{585} = 0{,}185 + 2 \times 0{,}000075 \times 585 = 0{,}273,$$

P—вес кирпичной насадки в 1 м³ кладки забора типа (фиг. 6) равен ~ 800 кг.



Фиг. 6.

В самом деле: каждая стенка забора представляет из себя ${}^1/_3$ пустот и ${}^2/_3$ заложенного кирпичом пространства. В двух стенках получается

$${}^2/_3 \times 2 = 1{}^1/_3$$

сплошных кирпичных стенок; да две поверхности боковых стен, которые будут равнозначны одной сплошной стенке. Всего, таким образом, получим:

$$1{}^1/_3 + 1 = 2{}^1/_3$$

кирпичных стенок, что составит $2{}^1/_3 \times 115 = 268$ мм, а это составит $\frac{268}{575}$ ширины регенераторов. На этом основании вес 1 м³ насадки мы можем принять:

$$1800 \times \frac{268}{575} = 840 \text{ кг}$$

Для круглого счета примем 800 кг, что будет не во вред работе печи

[1]) Подробнее см. ниже, «Расчет мартеновской печи»

Итак: $P = 800\,q$ кг, где q число м³ насадки регенератора.

Подставляя найденные величины в формулу (*a*), получим:

$$112.089 = 800 \times q \times 0{,}273 \times 0{,}0388,$$

откуда:

$$q = \frac{112.089}{800 \times 0{,}273 \times 0{,}0388} = 13{,}2 \text{ м}^3.$$

При средней высоте регенераторов

$$\frac{2{,}800 + 2{,}400}{2} = 2{,}6 \text{ м}$$

и ширине 0,575 м, получим их длину:

$$\frac{13{,}2}{2{,}6 \times 0{,}575} = 8{,}80 \text{ м}.$$

В данном случае, при боковых топках, мы получим регенераторы разной длины и, следовательно, разного об'ема. Но это не окажет большого влияния на работу печи.

Сечение выходных каналов из регенераторов определится, как газослив шириной 500 мм. В регенераторы в секунду направляется 33% всех печных газов, т.-е.

$$0{,}33 \times 0{,}920 = 0{,}304 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

При температуре 300° С их об'ем будет

$$0{,}304 \times 2{,}10 = 0{,}638 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Глубина потока определится по формуле:

$$h = 3{,}20 \sqrt[3]{\frac{0{,}638^2}{0{,}5^2 \times 300}} = \sim 565 \text{ мм}.$$

На случай засорения пылью примем высоту борова 700 мм.

Перекидной клапан к генераторам: необходимое сечение канала для дыма

$$0{,}565 \times 0{,}500 = 0{,}282 \text{ м}^2,$$

этой площади соответствует круг $d = 600$ мм.

Сечение канала для впуска воздуха определится из секундного расхода воздуха:

$$0{,}149 \times 4{,}006 = 0{,}597 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

При скорости 3 м/сек получим необходимое сечение

$$0{,}597 : 3 = \sim 0{,}200 \text{ м}^2,$$

т.-е. круг диаметром: $d = 500$ мм.

Расчет движения рабочих газов.

Путь газа.

Щели в стене—пламенный пролет.

Количество газа поступающего в печь при расходе топлива 0,149 кг б. у./сек, при 0° С будет

$$0{,}149 \times 2{,}619 = 0{,}390 \text{ м}^3/\text{сек},$$

или при 446° С

$$0{,}390\left(1 + \frac{446}{273}\right) = 1{,}027 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Расход давления будет:

Путь газа.	Температура в °С.	Колич. газа при t° С в м³.	Площадь сечения в м².	Скорость газа в м/сек.	Скоростной напор h в м.	Вес 1 м³ газа при 0° С.	Вес 1 м³ газа при t° С.	δ
Щели в стене.	446°	1,027	0,168	6,1	1,90	1,09	0,414	0,79
Пламен. пролет.	1400°	2,39	0,168	14,2	10,28	1,09	0,178	1,83
								$\delta = 2{,}62$

Запас положительного давления на пути газа будет (от пода щелей до пода рабочего пространства)

$$0{,}30\left(1{,}29 - 1{,}09\,\frac{1}{1 + \frac{1400}{273}}\right) = 0{,}33 \text{ мм}.$$

Недостает положительного давления

$$2{,}62 - 0{,}33 = 2{,}29 \text{ мм}.$$

В данном случае при установке генератора рядом с печью мы можем получить 2 случая: 1) давления создаваемого генератором (см. часть II) хватит для создания скоростей, или 2) этого давления не хватит; в этом случае придется ставить вентилятор.

Путь вторичного воздуха.

Клапан Сименса—боровок к регенераторам —регенераторы—щели газовой горелки.

Количество вторичного воздуха 0,597 м³/сек.

Расход давления:

Путь вторичного воздуха.	Температура в °С.	Количество воздуха при t°С в м³.	Площадь сечения в м².	Скорость воздуха в м/сек.	Скоростной напор h м.	Вес 1 м³ воздуха при 0°С.	Вес 1 м³ воздуха при t °С.	δ
Перекидн. клапан	0°	0,597	0,196	3,05	0,474	1,29	1,29	0,61
Вход в боровок	0°	0,597	0,283	2,11	0,226	1,29	1,29	0,29
2 поворота на 45° в перекидном клапане. .	—	—	—	—	—	—	—	0.29
Дымовой боровок	50°	0,704	0,350	2,01	0 206	1,29	1,09	0,22
Щели в газовой горелке . .	584°	1,974	0,132	14,2	10,28	1,29	0,412	4,24
								$\Sigma\delta = 5{,}65$

Запас гидростатического давления при средней температуре регенераторов

$$\frac{0+584}{2}=292^\circ\text{ C},$$

будет

$$2{,}80\left\{1{,}29-1{,}29\frac{1}{1+\frac{292}{273}}\right\}=1{,}88\text{ мм в. с.}$$

Сопротивление регенераторов заборного типа не поддается учету, поэтому примем его с запасом 2 мм в. с. Тогда запас давления будет

$$-5{,}65+1{,}88-2{,}00=-5{,}77\text{ мм}$$

водяного столба, что заставляет вводить искусственное дутье.

Расчет движения отработавших газов.

Путь газов через рабочее пространство.

Температуру дыма примем равной 300° С.

Тогда для опускания дымовых газов от порога садочного окна до пода дымового борова необходимо создать разрежение

$$2{,}250\left\{1{,}29-1{,}30\frac{1}{1+\frac{300}{273}}\right\}=1{,}51\text{ мм в. с.}$$

Для создания скоростей нужен будет напор:

Путь дыма.	Температура в °С.	Количество дыма при t °С в м³.	Площадь сечения потока в м².	Скорость дыма в м/сек.	Скоростной напор h м.	Вес 1 м³ дыма при 0° С.	Вес 1 м³ дыма при t°С.	δ
Вертикальный канал	300°	1,29	0,975	1,32	0,089	1,30	0,619	0,06
Дымовой боровок	300°	1,29	0,600	2,15	0,236	1,30	0,619	0,15
2 поворота в дымовом борове.	—	—	—	—	—	—	—	0,30
								$\Sigma\delta=0{,}51$

Всего необходимо создать дымовой трубой, разряжения

$$1{,}51+0{,}51=2{,}02\text{ мм в. с.}$$

Путь через регенераторы.

Для опускания газов от порога рабочих окон до зеркала газового потока в дымовом боровке необходимо разрежение

$$(0{,}500+2{,}800-0{,}135)\left\{1{,}29-1{,}30\frac{1}{1+\frac{850}{273}}\right\}=$$

$$=3{,}165\cdot 0{,}97=3{,}07\text{ мм в. с.,}$$

где 850° есть средняя температура дыма в регенераторах $=\frac{1400+300}{2}=850^\circ$ С.

Расход напора на создание скоростей:

Путь продуктов горения.	Температура в °С.	Количество продуктов гор. в м³.	Площадь сечения потока в м².	Скорость продуктов гор. в м/сек.	Скоростной напор h м.	Вес 1 м³ прод. горения при 0° С.	Вес 1 м³ продукт. горения при t° С.	δ
Щели в газовой горелке.	1400°	1,86	0,132	14,1	10,13	1,30	0,212	2,15
Дымовой боровок	300°	0,64	0,282	2,27	0,263	1,30	0,619	0,16
Перекидной клапан	250°	0,58	0,283	2,05	0,215	1,30	0,677	0,15
2 поворота на 90° в перек. клапане . . .	—	—	—	—	—	—	—	0,30
Поворот в боров к дымовой трубе . .	—	—	—	—	—	—	—	0,15
								$\Sigma\delta=2{,}91$

Сопротивление регенератора считаем равным 2 мм в. с.

Тогда разрежение, которое должна будет создать дымовая труба для того чтобы протащить продукты горения через регенераторы, будет

$$3{,}07+2{,}91+2{,}00=7{,}98\text{ мм в. с.}$$

Расчет дымовой трубы.

Мы получили, что дымовая труба должна создать в одном случае разрежение в 2,02 мм, а в другом 7,98 мм в. с. Очевидно, что расчет высоты трубы придется вести по большему нужному разрежению (7,98 мм), регулируя работу печи заслонками, поставленными в обоих боровках.

Среднюю температуру дыма в трубе примем 200° С.

Тогда высота трубы найдется из уравнения:

$$7{,}98=H\left\{1{,}29-1{,}30\frac{1}{1+\frac{200}{273}}\right\}$$

откуда

$$H=\frac{7{,}98}{0{,}54}=14{,}8\text{ м.}$$

Окончательно принимаем с запасом на случай засорения регенераторов и боровков

$$H=20\text{ м.}$$

ГЛАВА IV.

Расчет 30-ти тонной мартеновской печи [1]).

При проектировании мартеновской печи обычно задается лишь ее вместимость и топливо; кроме того обыкновенно известен характер работы, а именно, будет ли работать проектируемая печь скрап-процессом или рудным процессом.

Всеми остальными исходными величинами приходится задаваться на основании тех или иных соображений. К числу таких исходных данных относятся прежде всего расход горючего и температура подогрева газа и воздуха в регенераторах.

Расход каменного угля в 24 часа на тонну вместимости для печей, нормально работающих есть величина почти постоянная. Как показывает практика, он изменяется от 1,0 до 0,9 тонны; при таком расходе горючего от печи можно ждать нормальной производительности, т.-е. на скрап-процессе не менее 3 плавок и на рудном процессе четырех плавок. Печи, расходующие в 24 часа менее тоннажа, например, 0,75 его, дают пониженную производительность [2]).

Выбор той или иной цифры обусловливается условиями работы генераторов и регенераторов. Чем лучше работают первые и чем выше температура подогрева во-вторых, тем ниже расход горючего.

Так как в настоящем примере для расчета берется генераторный газ, расчитанный в предположении, что температура на колосниках генератора равна 1000°, то уместно взять при большем об'еме регенераторов для 30-тонной печи расход в 0,9 тн.

Отсюда расход угля в секунду на тн вместимости равен:

$$\frac{0{,}9}{24 \cdot 60 \cdot 60} = 0{,}0000104 \text{ тн} = 0{,}0104 \text{ кг} = 10{,}4 \text{ гр.}$$

Поэтому на тн вместимости в печь поступает (см. часть I):

генераторного газа . . . $0{,}0104 \times 4{,}318 = 0{,}045$ м³
вторичного воздуха . . $0{,}0104 \times 7{,}700 = 0{,}080$ „
и получается:
продуктов горения . . . $0{,}0104 \times 11{,}117 = 0{,}116$ „

Всего в секунду в печь поступает:

генераторного газа . . . . $30 \times 0{,}045 = 1{,}35$ м³
вторичного воздуха . . . . $30 \times 0{,}080 = 2{,}40$ „
и получается
продуктов горения . . . . $30 \times 0{,}116 = 3{,}48$ „

Рабочее пространство.

Об'ем рабочего пространства.

При определении размеров рабочего пространства мартеновской печи одной из исходных величин является об'ем рабочего пространства на тн вместимости. Как показывает следующая таблица (см. стр. 21), составленная на основании данных проф. М. А. Павлова [3]), величина его изменяется сравнительно мало.

При рассмотрении этой таблицы обращает внимание об'ем последних (№№ 35 и 36) печей, американской конструкции. Дело в том, что современные американские печи отличаются от европейских печей огромной площадью пода, тонкими стенками и головками, охлаждаемыми водой. В таких печах разгара во время кампании не наблюдается по той простой причине, что гореть нечему.

Об'ем их поэтому остается постоянным. Наоборот, в европейских печах разгар во время кампании будет значительный; как показывают расчеты, об'ем печей средней вместимости может увеличиться от оплавления стен до полутора раз. Поэтому на вышеприведенные цифры для европейских печей следует смотреть лишь как на цифры, характеризующие печь в начале кампании; по мере разгара она все ближе и ближе приближается к американскому типу.

Соответственно с выше сказанным для 30-ти тонной печи европейской конструкции можно задаться для печи, работающей скрап-процессом об'емом на тонну вместимости в 1,74 м³.

Тогда первоначальный об'ем печи получится равным:

$$1{,}74 \cdot 30 = 52{,}20 \text{ м}^3.$$

Для правильного функционирования печи необходимо, чтобы продукты горения оставались в рабочем пространстве соответствующий промежуток времени.

---

[1]) Означенный расчет сделан Б. В. Старком, ныне профессором Московской Горной Академии, в 1911 году, когда он был преподавателем Петр. Полит. Инст. и вел упражнения студентов по кафедре металлургии стали. В тексте сделаны лишь необходимые исправления.

[2]) Инж. Скаредов дает в Горном Журнале норму расхода тепла—35.000 кал на одну тонну вместимости печи в 1 сек, что даст примерно то же количество топлива, что и принятое нами. По подсчетам инж. Н. В. Грум-Гржимайло выходит, что печи, дающие 1,7 плавки в сутки, поглощают всего 13.550 кал/тн сек (Американская печь Duquesne); тогда как при работе 6 плавок в сутки печь поглощает 46.000 кал/тн сек (б. Царицынский завод).

[3]) М. А. Павлов. „Размеры мартеновских печей по эмпирическим данным". Ж.Р.М.О. 1910, I, стр. 169.

Об'ем мартеновских печей на тонну вместимости.

№ печи.	T Вместимость печи в тоннах.	S Площадь пода в м².	h_0 Высота от средины свода до средины пода в м.	$V = S.h_0$ Об'ем печи в м³.	$T(0{,}14+0{,}20.\ 0{,}28)$ Об'ем металла и шлака в м³.	Об'ем печи за вычетом об'ема металла и шлака в м³.	Об'ем печи на тонну вместимости в м³, не принимая во внимание об'ем металла и шлака.	Об'ем печи на тонну вместимости в м³.
1	10	13,20	1,525	20,130	1,960	18,170	2,01	1,82
3	12	14,45	1,605	23,192	2,352	20,840	1,93	1,74
4	15	16,02	1,760	28,195	2,940	25,255	1,88	1,68
5	14	16,21	1,870	30,313	2,744	27,569	2,17	1,97
7	15	16,63	1,950	32,429	2,940	29,489	2,16	1,97
9	20	19,50	1,900	37,050	3,920	33,130	1,85	1,66
10	20	19,80	1,770	35,046	3,920	31,126	1,75	1,56
12	22	21,76	1,700	36,992	4,312	32,680	1,68	1,49
13	23	22,40	1,750	39,200	4,508	34,692	1,70	1,51
14	25	22,88	2,000	45,760	4,900	40,860	1,83	1,63
15	25	23,42	1,900	44,498	4,900	39,598	1,78	1,59
16	25	24,10	2,000	48,200	4,900	43,300	1,93	1,73
17	25	24,38	1,850	45,103	4,900	40,203	1,80	1,61
18	25	24,48	2,170	53,122	4,900	48,222	2,12	1,93
19	27	25,60	2,500	64,000	5,292	58,708	2,37	2,17
20	30	26,40	2,280	60,192	5,880	54,312	2,01	1,81
22	30	26,97	2,050	55,289	5,880	49,409	1,84	1,65
24	30	27,20	2,000	54,400	5,880	48,520	1,81	1,62
26	32	28,50	2,150	61,275	6,272	55,003	1,91	1,72
27	35	30,40	2,700	82,080	6,860	75,220	2,35	2,15
28	40	31,50	2,300	72,450	7,840	64,610	1,81	1,62
29	40	32,20	2,350	75,670	7,840	67,830	1,89	1,70
30	45	36,40	2,400	87,360	8,820	78,540	1,94	1,75
33	50	41,63	2,400	99,912	9,800	90,112	2,00	1,80
					Среднее		1,94	1,74
35	60	59,46	2,530	150,434	11,760	138,674	2,51	2,31
36	60	66,86	2,690	179,853	11,760	168,093	3,00	2,80

Если этот промежуток времени слишком мал, то реакции горения заканчиваются в головках печи и обусловливают быстрое их разрушение. Время пребывания продуктов горения обыкновенно изменяется от 1,60 до 2,20 секунд в европейских печах и от 2,5 до 3,00 в американских печах.

В печах работающих скрап-процессом, до разгара, при средней температуре продуктов горения в 1700° время пребывания получается равным:

$$1{,}74 : \left\{ 0{,}116 \left(1 + \frac{1700}{273} \right) \right\} =$$

$$= 1{,}74 : \{ 0{,}116 . 7{,}23 \} = \sim 2{,}1 \text{ сек.}$$

При разгаре печи на $^1/_3$ ее емкости об'ем на тн увеличивается до 2,32 м³, а время пребывания печных газов до 2,8 сек. В это время печь работает наилучшим образом.

Соответственно с этим падение температуры от теоретической температуры горения (при подогреве газа и воздуха до 1100° в регенераторах она для взятого газа равна 2360°С) до температуры продуктов горения, уходящих из печи равно в секунду:

при начале работы печи $\frac{2360-1600}{2,1}=360°$.

после разгара $\frac{2360-1600}{2,8}=270°$.

Если при постройке печи принять меры, предупреждающие ее разгар, то выгодно увеличить об'ем печи на тонну уже во время постройки печи, поэтому мы примем, согласно стр. 27, ч. III, для печи, работающей рудным процессом следующие размеры:

Под . . . . . $8,9\times3,6=32$ м².

Высота свода над ванной . . . . . 2 м
Об'ем рабочего пространства . . . 64 м³
или на 1 тн. . . . . $64:30=2,13$ м³.

Время пребывания печных газов

$$2,13:\left\{0,116\left(1+\frac{1700}{273}\right)\right\}=\sim 2,5 \text{ сек.}$$

Падение температуры:

$$\frac{2360-1600}{2,5}=\sim 300°/\text{сек.}$$

В вышеприведенном расчете мы принимаем нормальный подогрев газа и воздуха до 1100°. При данном об'еме печи, задавшись расходом угля в 0,9 тн на тн вместимости печи в сутки, нормальное падение температуры будет 350° в секунду.

Теперь, исходя из этого падения температуры и данного об'ема печи, покажем, что с уменьшением подогрева газа и воздуха расход угля увеличится.

Пусть подогрев газа и воздуха в регенераторах не до 1100°, а только до 900°.

Ведя расчет в обратном порядке получим.

Время пребывания газа в рабочем пространстве, при теоретической температуре 2200°, будет:

$$\frac{2200-1600}{350}=1,7 \text{ сек.}$$

Секундный об'ем газов при 0°С будет равен:

$$\frac{1,74}{1,7\left(1+\frac{1700}{273}\right)}=0,142 \text{ м}^3/\text{сек},$$

а суточный расход угля на тн вместимости:

$$\frac{0,142\cdot24\cdot60.60}{11,117}=1,1 \text{ тн}$$

вместо прежних 0,9 тн.

Форма ванны.

Расчет ванны мартеновской печи приведен на стр. 26 часть III. Оттуда мы и возьмем размеры ванны для работы рудным процессом.

Площадь пода . . . . . $8,9\times3,6$ м.
Глубина металла над отверстием . . . 483 мм.
Толщина слоя шлака . . . . . 74 „
Высота откосов . . . . . 700 „

Регенераторы.

Предварительные замечания.

Так как устройство регенераторов имеет своею целью использование тепла, заключающегося в раскаленных продуктах горения, то мерилом успешности работы регенеративной кладки является температура дыма—чем последняя ниже, тем лучше работает насадка регенераторов.

Очевидно, что при прохождении одного и того же количества продуктов горения с одной и той же скоростью через регенераторы различных размеров, температура дыма будет тем ниже, чем больше об'ем регенератора. Следовательно, с точки зрения возможно полной утилизации тепла продуктов горения, большие регенераторы безусловно выгоднее маленьких и практика американцев, ставящих за мартеновскими печами паровые котлы, не заслуживает внимание.

Передача тепла кладкой нагреваемому газу идет тем быстрее, чем больше разница в температурах первой и второго. А так как средняя температура насадки лежит между средними температурами нагреваемого газа и продуктов горения, нагревающих кладку, то температура нагрева газа находится в тесной связи с разностью средних температур газа и продуктов горения в соответствующем регенераторе.

Из вышеизложенного вытекает, что, если задаться определенным распределением температур в регенераторе, то об'ем кладки должен быть вполне определенной величиной.

Вес кладки (а значит, и об'ем) регенератора, очевидно, должен удовлетворять уравнению:

$$Q=P.c.\tau,$$

где Q — количество тепла, отдаваемое кладкой нагреваемому газу в единицу времени

P — вес кладки (в кг),

c — теплоемкость кладки (в кал) при соответствующей температуре,

τ — падение температуры кладки в единицу времени, обусловливаемое разностью температур кладки и нагреваемого газа.

Так как температура кладки лежит между температурами нагреваемого газа и греющих кладку продуктов горения, то последнюю величину — τ удобно иметь в функции разности средних температур газа и охлаждающихся продуктов горения. В нижеследующей табличке Б. В. Старка приводится эта связь, найденная эмпирическим путем на основании распределения температур в аппарате Каупера.

Разность температур нагреваемого газа и охлаждающихся продуктов горения.	Падение температуры кладки в минуту.	Разность температур нагреваемого газа и охлаждающихся продуктов горения.	Падение температуры кладки в минуту.
100°	0,44°	400°	1,76°
150°	0,66°	450°	1,98°
200°	0,88°	500°	2,20°
250°	1,10°	550°	2,42°
300°	1,32°	600°	2,64°
350°	1,54°	—	—

Из вышеизложенного получаем следующий метод расчета регенераторов: на основании предполагаемого распределения температур определяется количество тепла, отдаваемое кладкой регенераторов в секунду и по вышеприведенной формуле непосредственно определяется вес насадки на тонну вместимости.

Распределение температур в регенераторах.

Из вышесказанного вытекает, что интенсивность работы регенераторов обусловливается разностью средних температур нагреваемого газа и нагревающих кладку продуктов горения в соответствующем регенераторе; поэтому, для того, чтобы оба регенератора работали одинаково интенсивно, нужно, чтобы в том и другом эта разность была одинакова.

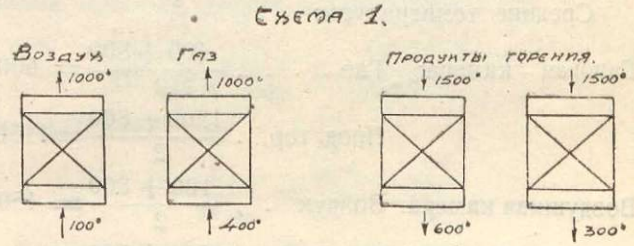
Для этой цели необходимо, чтобы разница между температурами продуктов горения, покидающих газовый и воздушный регенераторы, была равна разнице температур подводимых газа и воздуха. Для примера ниже приводится четыре распределения температур (фиг. 7 — 10), в которых это условие соблюдено, вследствие чего и получим одинаковые разницы температур между нагреваемым газом и продуктами горения.

Температуру газа, поступающего в регенератор, обыкновенно следует принимать несколько ниже температуры генераторного газа, покидающего генератор. Что касается температуры воздуха, то следует иметь в виду возможность его нагревания во время прохождения через перекидной клапан и по каналу к регенератору, так как последние нагреты только что проходившими продуктами горения. Температуру подогрева газа и воздуха при выходе из регенераторов следует принимать несколько ниже, чем та, с которой они поступают в печь. Дело в том, что пролеты и шлаковики, нагретые продуктами горения отчасти играют роль регенераторов, повышая температуру проходящих через них газа и воздуха примерно на 100°. По той же причине и температуру продуктов горения при входе в регенератор приходится считать несколько ниже, чем при выходе из печи; вместо 1600° ее лучше считать равной 1500°.

Непосредственные измерения температур дыма, газа и воздуха в регенераторах представляют непреодолимые трудности: при измерении температур дыма получаются температуры более низкие, а при измерении температур нагреваемых газа и воздуха более высокие, чем следовало бы. Причина этих неверностей лежит в лучистой теплоте стенок регенератора и решетки. При измерении температур дыма холодные стенки регенератора понижают показание пирометра; при измерении температуры нагреваемого газа и воздуха раскаленные стенки регенератора повышают показание пирометра. Это обстоятельство надо учитывать и относиться очень осторожно к цифрам, полученным непосредственными измерениями.

Кроме того, при измерении температуры дыма получаются иногда несоразмерно низкие цифры. Об'ясняется это тем, что в пролетах давление ниже атмосферного, в силу чего в регенераторы неизбежно засасывается наружный холодный воздух, что легко обнаруживается газовыми анализами.

Схема 1.



Фиг. 7.

Средние температуры:

Газовая камера: Газ . . . . $\frac{400+1000}{2} = 700°$

Прод. гор. . $\frac{1500+600}{2} = 1050°$

Воздушная камера: Воздух . . $\frac{100+1000}{2} = 550°$

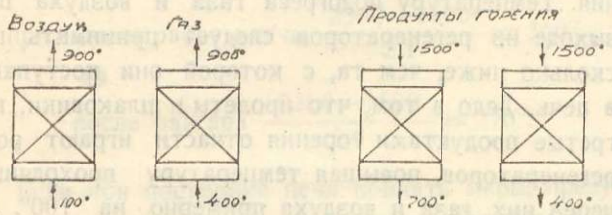
Прод. гор. . $\frac{1500+300}{2} = 900°$

Разница средних температур:

Продукты горения и газ . . . $1050 - 700 = 350°$

„ „ и воздух . $900 - 550 = 350°$

Схема 2.



Фиг. 8.

Средние температуры:

Газовая камера: Газ . . . . $\frac{400+900}{2} = 650°$

Прод. гор. . $\frac{1500+700}{2} = 1100°$

Воздушная камера: Воздух . . $\frac{100+900}{2} = 500°$

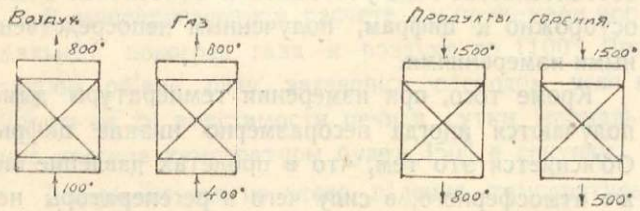
Прод. гор. . $\frac{400+1500}{2} = 950°$

Разница средних температур:

Продукты горения и газ . . . $1100 - 650 = 450°$

„ „ и воздух . $950 - 500 = 450°$

Схема 3.



Фиг. 9.

Средние температуры:

Газовая камера: Газ . . . . $\frac{400+800}{2} = 600°$

Прод. гор. . $\frac{1500+800}{2} = 1150°$

Воздушная камера: Воздух . . $\frac{100+800}{2} = 450°$

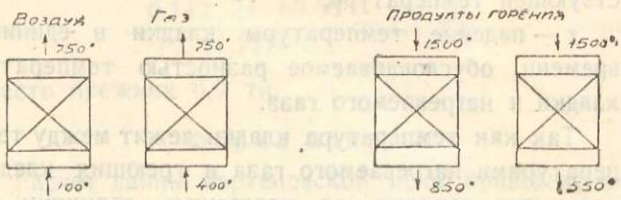
Прод. гор. . $\frac{1500+500}{2} = 1000°$

Разница средних температур:

Продукты горения и газ . . . $1150 - 600 = 550°$

„ „ и воздух . $1000 - 450 = 550°$

Схема 4.



Фиг. 10.

Средние температуры.

Газовая камера: Газ . . . . $\frac{400+750}{2} = 575°$

Прод. гор. . $\frac{850+1500}{2} = 1175°$

Воздушная камера: Воздух . . $\frac{100+750}{2} = 425°$

Прод. гор. . $\frac{1500+550}{2} = 1025°$

Разница средних температур:

Продукты горения и газ . . . $1175 - 575 = 600°$

„ „ и воздух . $1025 - 425 = 600°$

Распределение продуктов горения между регенераторами.

Продукты горения должны распределяться между регенераторами, пропорционально уступаемым кладкой количествам тепла газа и воздуха с одной стороны, и обратно пропорционально количествам тепла, уступаемым насадке продуктами горения в газовом и воздушном регенераторе—с другой стороны. Поэтому прежде всего надлежит выяснить, какие количества тепла заимствуются нагреваемыми газами и приносятся продуктами горения в соответствующие камеры; для этой цели нужно знать количество тепла, заключающегося в циркулирующих газах при соответствующих температурах. Для расчета выбрана 1-я схема распределения температур.

Генераторный газ из 102,6 гр. угля, нагретый до 400°С содержит:

CH_4 . . . . . $0{,}403 \times 4.872 = 1.963$ кал

$CO_2 + SO_2$ . . . $0{,}622 \times 4.009 = 2.494$ „

$CO + H_2 + N_2$ . . . $17{,}593 \times 2.746 = 48.310$ „

H_2O . . . . . $1{,}158 \times 3.305 = 3.827$ „

56.594 кал.

При расходе угля 10,4 гр/сек запас тепла в газе равен:

$\frac{10{,}4}{02{,}6} \times 56.594 = 0{,}10136 \times 56.594 = 5.736$ кал.

Тот же газ из 102,6 гр угля, нагретый до 1000° содержит тепла:

CH_4	0,403 × 15.780 =	6.359	кал
$CO_2 + SO_2$ . . .	0,622 × 11.317 =	7.039	„
$CO + H_2 + N_2$ . .	17,593 × 7.135 =	125.526	„
H_2O	1,158 × 8.750 =	10.132	„
		149.056	кал.

При расходе угля 10,4 гр/сек запас тепла в газе равен:

$$0{,}10136 \times 149.056 = 15.108 \text{ кал.}$$

Следовательно, полезная работа газового регенератора, состоящая в нагреве генераторного газа от 400° до 1000°, равна:

$$15.108 - 5.736 = 9.372 \text{ кал.}$$

Вторичный воздух, необходимый для горения генераторного газа из 102,6 гр угля, нагретый до 100°, содержит тепла:

$$35{,}257 \times 677 = 23.869 \text{ кал.}$$

При расходе угля в 10,4 гр/сек запас тепла равен:

$$0{,}10136 \times 23.869 = 2.419 \text{ кал.}$$

Вторичный воздух, необходимый для горения генераторного газа из 102,6 гр угля, нагретый до 1000°, содержит тепла:

$$35{,}257 \times 7.177 = 253.039 \text{ кал.}$$

При расходе угля 10,4 гр/сек запас тепла в воздухе равен:

$$0{,}10136 \times 253.039 = 25.648 \text{ кал.}$$

Следовательно, полезная работа воздушного регенератора, состоящая в нагреве воздуха от 100° до 1000°, равна:

$$25.648 - 2.419 = 23.229 \text{ кал.}$$

Продукты горения генераторного газа из 102,6 гр угля, нагретые до 1500°, содержат тепла:

$CO_2 + SO_2$ . . .	6,077 × 17.938 =	109.009	кал
H_2O	5,154 × 14.212 =	73.249	„
O_2	2,468 × 11.340 =	27.987	„
N_2	37,222 × 11.040 =	410.931	„
		621.176	кал.

При расходе угля 10,4 гр/сек запас тепла равен:

$$0{,}10136 \times 621.176 = 62.962 \text{ кал.}$$

Продукты горения генераторного газа из 102,6 гр угля нагретые до 600°, содержат тепла:

$CO_2 + SO_2$	6,077 × 6.311 =	38.352	кал
H_2O	5,154 × 5.036 =	25.956	„
O_2	2,468 × 4.293 =	10.595	„
N_2	37,222 × 4.173 =	155.327	„
		230.230	кал.

При расходе угля 10,4 гр/сек запас тепла равен:

$$0{,}10136 \times 230.230 = 23.336 \text{ кал.}$$

Продукты горения генераторного газа из 102,6 гр угля, нагретые до 300°С, содержат тепла:

$CO_2 + SO_2$	6,077 × 2.926 =	17.781	кал
H_2O	5,154 × 2.461 =	12.684	„
O_2	2,468 × 2.106 =	5.198	„
N_2	37,222 × 2.046 =	76.156	„
		111.819	кал.

При расходе угля в 10,4 гр в секунду, запас тепла равен:

$$0{,}10136 \times 111.819 = 11.334 \text{ кал.}$$

Секундное количество печных газов на тонну равно 0,116 м³; часть его $A_{газ}$ — направляется в газовый регенератор; другая часть $B_{воздух}$ — в воздушный регенератор, при чем:

$$A_{газ} + B_{воз} = 0{,}116 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Печные газы поступают в оба регенератора при 1500°, выходят же из газового регенератора при 600°, а из воздушного регенератора при 300°, оставляя в том и другом регенераторе разное количество тепла. Если бы все печные газы прошли бы газовый регенератор и вышли бы с температурой в 600°, то они оставили бы в газовом регенераторе тепла:

$$62.962 - 23.336 = 39\ 626 \text{ кал.}$$

Но так как через газовый регенератор прошла только часть печных газов $A_{газ}$ — то, очевидно, тепла в газовом регенераторе останется:

$$39.626\ A_{газ} \text{ кал.}$$

Точно так же для воздушного регенератора количество оставленного в нем тепла будет равно:

$$(62.962 - 11.334)\ B_{воз} = 51.628\ B_{воз} \text{ кал.}$$

А так как количества тепла, оставленные в регенераторах печными газами, будут пропорциональны полезной работе регенераторов, то:

$$\frac{39.626 \times A_{газ}}{51.628 \times B_{воз}} = \frac{9.372}{23.229}$$

или приблизительно:

$$\frac{A_{газ}}{B_{воз}} = \frac{34{,}5}{65{,}5}.$$

Следовательно, через газовый регенератор пройдет на тонну:

$$A_{газ} = 0{,}116 \times 0{,}345 = 0{,}040 \text{ м}^3/\text{сек,}$$

а через воздушный:

$$B_{воз} = 0{,}116 \times 0{,}655 = 0{,}076 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Для печи же в 30 тн секундное количество печных газов будет:

для газового регенератора:

$$0{,}040 \times 30 = 1{,}20 \text{ м}^3/\text{сек},$$

для воздушного:

$$0{,}076 \times 30 = 2{,}28 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Температура дыма.

Запас тепла в продуктах горения, прошедших регенераторы, равен:

$$23.336 \times 0{,}345 = 8.051 \text{ кал}$$
$$11.334 \times 0{,}655 = 7.424 \text{ „}$$
$$15.475 \text{ кал.}$$

Продукты горения генераторного газа из 102,6 гр угля, нагретые до 400°, содержат тепла:

$CO_2 + SO_2$	$6{,}077 \times 4.009 =$	24.363 кал
H_2O	$5{,}154 \times 3.305 =$	17.034 „
O_2	$2{,}468 \times 2.826 =$	6.975 „
N_2	$37{,}222 \times 2.746 =$	102.212 „
		150.584 кал.

При расходе угля 10,4 гр запас тепла равен:

$$0{,}10136 \times 150.584 = 15.263 \text{ кал.}$$

Продукты горения генераторного газа из 102,6 гр угля, нагретые до 500°, содержат тепла:

$CO_2 + SO_2$	$6{,}077 \times 5.139 =$	31.230 кал
H_2O	$5{,}154 \times 4.162 =$	21.451 „
O_2	$2{,}468 \times 3.555 =$	8.774 „
N_2	$37{,}222 \times 3.455 =$	128.602 „
		190.057 кал.

При расходе угля 10,4 гр/сек запас тепла равен:

$$0{,}10136 \times 190.057 = 19.264 \text{ кал.}$$

Интерполируем:

15.475 кал	19.264 кал
15.263 „	15.263 „
212 кал.	4.001 кал.

$$\frac{x}{100} = \frac{212}{4.001}; \quad x = 5{,}3°.$$

Температура дыма равна приблизительно:

$$400 + 5 = 405°\text{C}.$$

Лучеиспускание регенераторов.

Лучеиспускание удобнее всего найти по разности между теплом полученным и отданным.

Газовая камера:

получает тепла: $39.626 \times 0{,}345 = 13.671$ кал
отдает тепла газу . . . . . 9.372 „
Следовательно, лучеиспусканием теряется . . . . . 4.299 кал.

Воздушная камера:

получает тепла: $51.628 \times 0{,}655 = 33.816$ кал
отдает тепла воздуху . . . . . 23.229 „
Следовательно, лучеиспусканием теряется: . . . . . 10.587 кал.

Всего благодаря лучеиспусканию пары регенераторов на тонну вместимости печи в секунду теряется тепла:

$$4.299 + 10.587 = 14.886 \text{ кал.}$$

Так как лучеиспускание имеет место во все время функционирования регенераторов, а нагревание газа и воздуха продолжается лишь половину этого времени (в другую половину времени идет нагревание регенераторов продуктами горения), то за период охлаждения теряется благодаря лучеиспусканию лишь половина вычисленных количеств тепла, т.-е.

в газовом регенераторе . . $4.299 : 2 = 2.150$ кал
„ воздушном „ . . $10.587 : 2 = 5.293$ „

Заметим, что только эта половина лучеиспускания должна быть поглощена кладкой газового и воздушного регенераторов.

Средний коэффициент полезного действия пары регенераторов.

Потеря тепла в дыме в % подведенного количества тепла равна:

$$\frac{15.475}{62.962} \times 100 = 24{,}58\% = \sim 24\%.$$

Потеря тепла вследствие лучеиспускания в % подведенного количества тепла:

$$\frac{14.886}{62.962} \times 100 = 23{,}64\% = \sim 24\%.$$

Коэффициент полезного действия пары регенераторов

$$\frac{9.372 + 23.229}{62.962} \times 100 = 51{,}78\% = \sim 52\%.$$

По поводу этих цифр нужно сказать, что на практике очень часто получаются совсем иные результаты. Если принять во внимание сказанное в части I об измерении температур, то будут вполне понятны те несоразмерности, которые часто получаются при практических исследованиях.

Об'ем насадок регенераторов на тонну вместимости.

Определение об'ема насадки производится по вышеприведенной формуле

$$Q = P.c.\tau,$$

где P — вес кирпича в кг. Для того, чтобы от веса перейти к об'ему, необходимо знать характер кладки, так как в зависимости от последнего об'ем, не занятый кирпичом, изменяется. В расчете принято, что об'ем, не занятый кирпичом, равен об'ему заполненному [1]). Так как вес 1 м³ кирпича равен 1800 кг, то в данном случае вес 1 м³ насадки вдвое меньше, т.-е. равен 900 кг и в формуле P можно заменить 900 q, если под q понимать число м³ насадки на тн вместимости.

Величина τ, даваемая в таблице, отнесена к одной минуте. Так как все тепловые данные отнесены к расходу угля в секунду, то τ нужно заменить через $\frac{\tau}{60}$.

Далее в формулу входит величина c—теплоемкость кирпича при температуре теплоотдачи. Так как средняя теплоемкость кирпича (1 кг) выражается формулой:

$$c_0' = 0{,}185 + 0{,}000075\,t,$$

то истинная теплоемкость при температуре t выражается формулой:

$$c' = 0{,}185 + 2 \cdot 0{,}000075\,t.$$

Газовая камера:

Количество тепла, отдаваемое кладкой в период охлаждения равно:

нагревание газа	9.372 кал
лучеиспускание	2.150 „
	11.522 кал.

Средняя температура кладки по предположению лежит между средней температурой газа и продуктов горения в соответствующем регенераторе, т.-е.

$$\frac{1050 + 700}{2} = 875°.$$

Теплоемкость кладки при 875° С равна:

$$c^{875} = 0{,}185 + 2.0{,}000075.875 = 0{,}316.$$

Следовательно:

$$11.522 = 900\,q\,\frac{1{,}54}{60}\,0{,}316$$

$$q = \frac{11.522 \times 60}{900 \times 1{,}54 \times 0{,}316} = 1{,}578 \text{ м}^3.$$

Воздушная камера:

Количество тепла, отдаваемого кладкой в период охлаждения равно:

нагревание воздуха . . .	23.229 кал
лучеиспускание	5.293 „
	28.522 кал.

Средняя температура кладки:

$$\frac{900 + 550}{2} = 725° \text{ С}.$$

Теплоемкость кладки при 725° равна:

$$c^{725} = 0{,}185 + 2.0{,}000075.725 = 0{,}294.$$

Следовательно

$$28.522 = 900\,q\,\frac{1{,}54}{60}\,0{,}294$$

$$q = \frac{28.522 \times 60}{900 \times 0{,}294 \times 1{,}54} = 4{,}200 \text{ м}^3.$$

Всего об'ем пары регенераторов на тн вместимости равен:

$$1{,}578 + 4{,}200 = 5{,}778 \text{ м}^3.$$

Эта величина очень велика; для современных печей таких регенераторов не делают (см. стр. 28), но зато и не получают дыма в 405° С. Некоторые заводы указывают на такую температуру дыма своих мартеновских печей, но такая низкая температура является в них результатом засасывания холодного воздуха на пути от головок до дымовой трубы.

Об'ем насадок газового и воздушного регенераторов.

Об'ем насадок газового регенератора так же, как и воздушного, получается умножением насадки на тн вместимости—на вместимость печи:

газовый регенератор	1,578 × 30 = 47,34 м³
воздушный	4,200 × 30 = 126,00 „

При определении линейных размеров насадки, а значит и камер нужно иметь в виду, с одной стороны конструктивные соображения, а с другой стороны—условия работы печи с точки зрения гидравлической теории печей. Ниже будет видно, что высота решетки меньше 4 м не целесообразна.

---

[1]) В этом случае число кирпичей в 1 м³ решетки будет равно 354 шт. Clement (см. St. und Eis., 1923, стр. 85) дает для насадок регенераторов число кирпичей значительно меньше—до 168 шт/м³.

Об'ем насадки регенераторов.

(По данным проф. М. А. Павлова. Ж.Р.М.О. 1910 г. I ч. 169 стр.).

№ печи.	Вместимость печи в тоннах. T	Площадь пода в м². S	Об'ем насадки регенераторов в м³. Газового. Q газ.	Воздушного. Q воз.	На тонну вместимости. Газового. q газ.	Воздушного. q воз.	q газ. + q возд.	На 1 м² площади пода. $\frac{Q \text{ газ.} + Q \text{ воз.}}{S}$
3	12	14,45	нефть	41,0	—	3,417	—	—
4	15	16,02	21,5	21,5	1,433	1,433	2,866	2,684
5	14	16,21	17,2	17,2	1,229	1,229	2,458	2,122
7	15	16,63	17,2	17,2	1,147	1,147	2,294	2,069
9	20	19,50	36,2	36,2	1,810	1,810	3,620	3,713
10	20	19,80	28,1	24,2	1,405	1,210	2,615	2,641
12	22	21,76	20,1	26,8	0,914	1,218	2,132	2,155
13	23	22,40	19,1	25,5	0,830	1,108	1,938	1,991
14	25	22,88	41,0	43,0	1,640	1,720	3,360	3,671
15	25	23,42	25,0	26,5	1,000	1,060	2,060	2,199
16	25	24,10	41,6	41,6	1,664	1,664	3,328	3,452
17	25	24,38	37,8	44,2	1,512	1,768	3,280	3,363
18	25	24,48	51,0	63,5	2,040	2,540	4,580	4,677
19	27	25,60	37,7	47,6	1,396	1,763	3,159	3,332
20	30	26,40	34,2	40,2	1,140	1,340	2,480	2,818
22	30	26,97	нефть	65,0	—	2,167	—	—
26	32	28,50	58,5	62,5	1,828	1,953	3,781	4,246
27	35	30,40	79,1	115,8	2,260	3,3 9	5,569	6,411
28	40	31,50	63,8	78,0	1,595	1,950	3,545	4,502
31	40	39,70	54,1	74,2	1,082	1,484	2,566	3,232
32	50	40,40	56,0	76,2	1,120	1,524	2,644	3,272
33	50	41,63	57,6	88,5	1,152	1,770	2,922	3,509
34	50	43,20	93,4	93,4	1,868	1,868	3,736	4,324
35	60	59,46	60,6	82,6	1,010	1,377	2,387	2,408
36	60	66,86	68,5	118,9	1,142	1,982	3,124	2,803

Поэтому размеры кладки устанавливаются следующие (фиг. 11).

Газовый регенератор:

высота . . 4,5 м
длина . . . 7,7 „
ширина . . 1,4 „
об'ем . . . 48,5 м³.

Воздушный регенератор:

высота . . 4,5 м
длина . . 7,7 „
ширина . 3,7 „
об'ем . . 128,2 м³.

Регенераторы делаются лежачие.

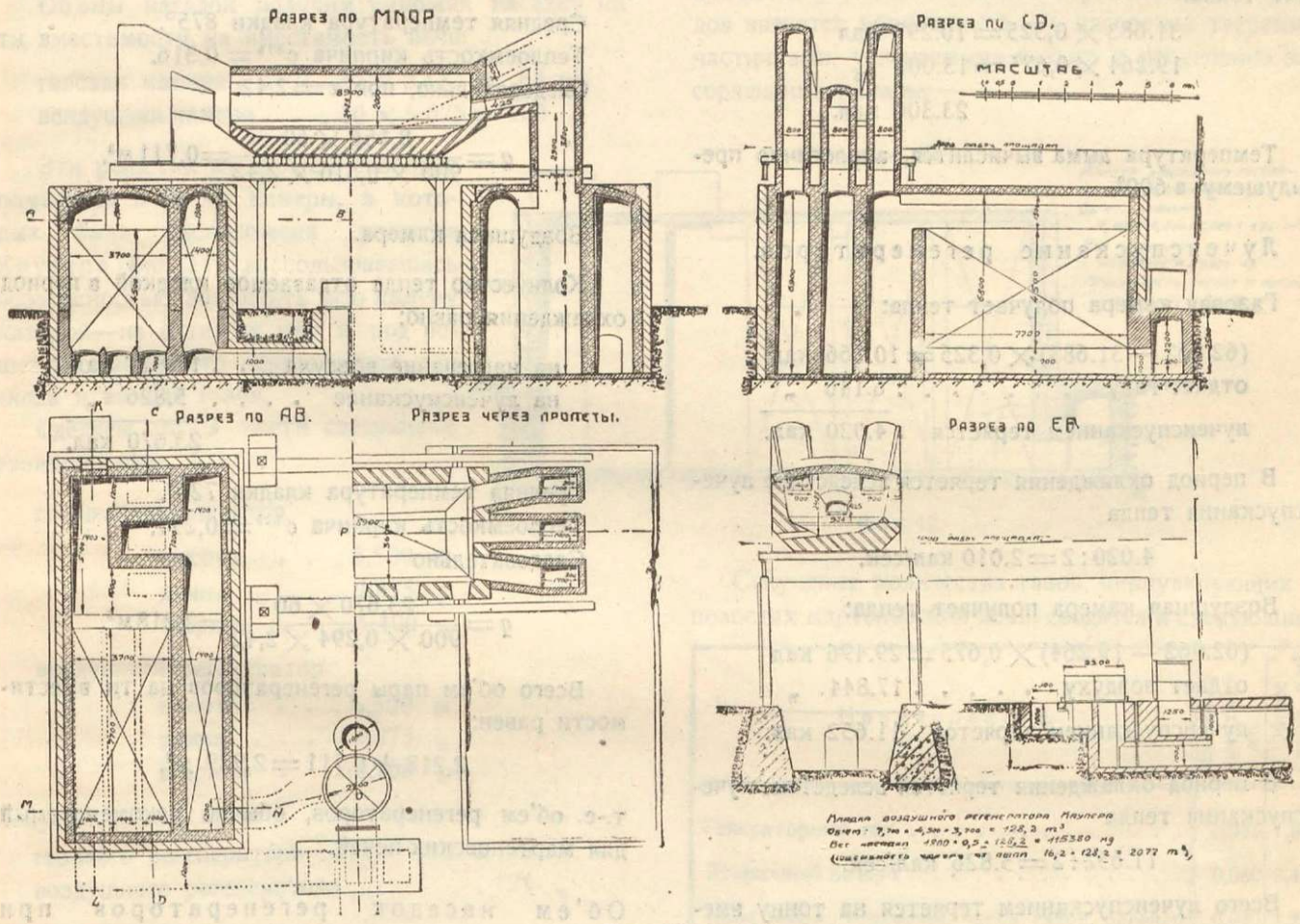
Ввиду большего интереса, который представляет об'ем регенераторов на тонну вместимости печи, ниже приводится расчет для распределения температур, соответствующего третьей схеме. Распределение это, соответствующее подогреву газа и воздуха до 800°, представляет из себя случай, часто встречающийся на заводах.

Полезная работа воздушного регенератора, заключающаяся в нагреве вторичного воздуха от 100° до 800°, т.-е. в сообщении воздуху:

$$20.263 - 2.419 = 17.844 \text{ кал/сек.}$$

Продукты горения нагретые до 1500° содержат тепла . . . . . 62.962 кал

Эскизный проект 30 тонной мартеновской печи.



Фиг. 11.

Распределение продуктов горения между регенераторами.

Газ нагретый, до 400°, заключает тепла 5.736 кал.
Газ нагретый, до 800° заключает тепла 11.882 кал.

Полезная работа газового регенератора, заключающаяся в нагреве газа от 400° до 800°, т.-е. в сообщении газу:

$$11.882 - 5.736 = 6.146 \text{ кал/сек.}$$

Вторичный воздух, нагретый до 100°, заключает тепла . . . . . 2.419 кал

Вторичный воздух, нагретый до 800°, заключает тепла . . . . . 20.263 „

Продукты горения, нагретые до 800°, содержат тепла . . . . . 31.683 кал

Продукты горения нагретые до 500° содержат тепла . . . . . 19.264 „

Секундное количество печных газов, поступающее из рабочего пространства, равно 0,116 м³. Оно разделится между газовыми и воздушными регенераторами так, что

$$A_{\text{газ}} + B_{\text{воз}} = 0{,}116$$

$$\frac{(62.962 - 31.683)\, A_{\text{газ}}}{(62.962 - 19.264)\, B_{\text{воз}}} = \frac{6.146}{17.844}$$

откуда

$$A_{\text{газ}} : B_{\text{воз}} = 32{,}5\% : 67{,}5\%.$$

Следовательно, в газовую камеру печных газов поступает:

$$0{,}116 \times 0{,}325 = 0{,}0377 \text{ м}^3/\text{сек},$$

в воздушную

$$0{,}116 \times 0{,}675 = 0{,}0783 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Температура дыма.

Продукты горения, покидая регенераторы, содержат тепла:

$$31.683 \times 0{,}325 = 10.297 \text{ кал}$$
$$19.264 \times 0{,}675 = 13.003 \text{ „}$$
$$23.300 \text{ кал}.$$

Температура дыма вычислится, аналогично предыдущему, в 600°.

Лучеиспускание регенераторов.

Газовая камера получает тепла:

$$(62.962 - 31.683) \times 0{,}325 = 10.166 \text{ кал}$$

отдает газу . . . . . 6.146 „

лучеиспусканием теряется . 4.020 кал.

В период охлаждения теряется вследствие лучеиспускания тепла

$$4.020 : 2 = 2.010 \text{ кал/сек}.$$

Воздушная камера получает тепла:

$$(62.962 - 19.264) \times 0{,}675 = 29.496 \text{ кал}$$

отдает воздуху . . . . . 17.844 „

лучеиспусканием теряется . 11.652 кал.

В период охлаждения теряется вследствие лучеиспускания тепла

$$11.652 : 2 = 5.826 \text{ кал/сек}.$$

Всего лучеиспусканием теряется на тонну вместимости

$$4.020 + 11.652 = 15.672 \text{ кал}.$$

Коэффициент полезного действия пары регенераторов.

Потеря тепла в дым в % подведенного тепла:

$$\frac{23.300}{62.962} \times 100 = 37{,}00\% = \sim 37\%.$$

Потеря тепла на лучеиспускание:

$$\frac{15.672}{62.962} \times 100 = 24{,}89\% = \sim 25\%.$$

Коэффициент полезного действия пары регенераторов:

$$\frac{6.146 + 17.844}{62.962} = 38{,}11\% = \sim 38\%.$$

Об'ем насадок регенераторов на тонну вместимости.

Газовая камера.

Количество тепла отдаваемое кладкой в период охлаждения равно:

на нагревание газа . . . 6.146 кал
на лучеиспускание . . . 2.010 „
8.156 кал.

Средняя температура кладки 875°.
Теплоемкость кирпича $c^{875} = 0{,}316$.
Следовательно, при $\tau = 2{,}42$:

$$q = \frac{8.156 \times 60}{900 \times 0{,}316 \times 2{,}42} = 0{,}711 \text{ м}^3.$$

Воздушная камера.

Количество тепла отдаваемое кладкой в период охлаждения равно:

на нагревание воздуха . . . 17.844 кал
на лучеиспускание . . . . 5.826 „
23.670 кал.

Средняя температура кладки 725°.
Теплоемкость кирпича $c^{725} = 0{,}294$.
Следовательно

$$q = \frac{23.670 \times 60}{900 \times 0{,}294 \times 2{,}42} = 2{,}218 \text{ м}^3.$$

Всего об'ем пары регенераторов на тн вместимости равен:

$$2{,}218 + 0{,}711 = 2{,}929 \text{ м}^3,$$

т.-е. об'ем регенераторов, обычно рекомендуемый для мартеновских печей.

Об'ем насадок регенераторов при решетке заборного типа.

Выше мы предполагали, что вес кирпича в 1 м³ решетки равен 900 кг. Это соответствует решеткам Сименса, в разбежку и Каупера. При решетке заборного типа об'ем кирпича равен всего 37% (см. стр. 67, часть III) поэтому вес кирпича в 1 м³ решетки будет всего:

$$1800 \times 0{,}37 = 666 \text{ кг}.$$

Расчитаем, каков будет об'ем кладки решеток газового и воздушного регенераторов в этом случае.

Аналогично стр. 27 имеем:

Газовая камера

$$q = \frac{11.522 \times 60}{666 \times 1{,}54 \times 0{,}316} = 2{,}133 \text{ м}^3.$$

Воздушная камера

$$q = \frac{28.522 \times 60}{666 \times 1{,}54 \times 0{,}294} = 5{,}675 \text{ м}^3.$$

Всего об'ем пары регенераторов на тн вместимости равен:

$$2{,}133 + 5{,}675 = 7{,}808 \text{ м}^3.$$

Об'ем насадок газового и воздушного регенераторов.

Об'емы насадок получим умножая насадку на тн вместимости на вместимость печи:

газовая камера . . . . $30 \times 2{,}133 =$ 64 м³.
воздушная камера . . . $30 \times 5{,}675 = 170$ „

Эти решетки мы можем свободно поместить в те же камеры, в которых была расположена решетка Каупера (фиг. 11), воспользовавшись возможностью заполнить всю камеру кладкой—не оставляя над и под решеткой свободного пространства для входа и выхода газов.

Сделаем по 3 клети следующих размеров (фиг. 12)

газовый регенератор

высота . . . . 6,500 м.
длина . . . . 2,375 „
ширина . . . 1,400 „

воздушный регенератор

высота . . . . 6,500 м
длина . . . . 2,375 „
ширина . . . 3,700 „

Получим об'ем кладки

газового регенератора . . . . . 65 м³.
воздушного регенератора . . . . 171 „

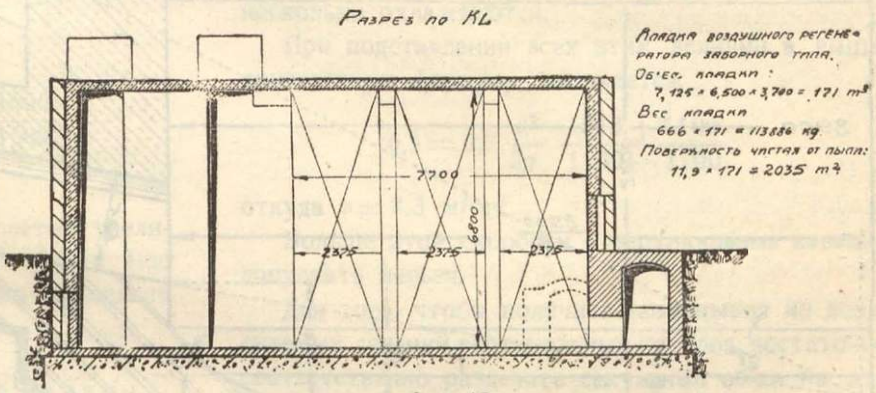
Газовые и воздушные окна, шлаковики, каналы и пр.

Предварительные замечания.

При определении всех размеров окон, каналов и т. п. здесь больше, чем где-либо приходится считаться с удобством расположения. Поэтому параллельно с этим расчетом лучше вычерчивать эскизно все расчитываемые части.

Далее, при выборе надлежащих сечений, именно тех, через которые газы движутся в вертикальном направлении, как например, в каналах внутри головок, нужно брать их возможно большими для того, чтобы получить возможно малые скорости. Дело в том, что при больших скоростях приходится располагать довольно значительными запасами гидростатического давления: запасами, требующими значительного расстояния от уровня лещади регенераторов до окон в печь, что сделать часто не представляется возможным.

Наконец, при выборе сечений, через которые газы движутся в горизонтальном направлении, следует иметь в виду, что высота боровков больше теоретической, т.-е. высота газослива, бесполезна, т. к. все равно газовая струя не выполнит канала большей высоты, чем выходит по формуле. Главной причиной увеличения высоты горизонтальных каналов является возможность их засорения твердыми частичками, увлекаемыми газами и постепенно засоряющими каналы.



Фиг. 12.

Секундные количества газов, циркулирующих в полостях мартеновской печи, сводятся к следующим:

Наименование.	На тонну вместим. в м³.	Общее колич. в м³.
Генераторный газ	0,045	1,35
Вторичный воздух	0,080	2,40
Прод. горен., проходящ. через. газов. регенер.	0,040	1,20
„ „ „ „ возд. регенер.	0,076	2,28
Общее количество продуктов горения . . .	0,116	3,48

Воздушные окна.

Для определения площади воздушных окон удобно пользоваться эмпирическим соотношением проф. М. А. Павлова, который рекомендует делать площадь окон в 225 см² на 1 м² площади пода. Следовательно, для печи работающей рудным процессом, площадь воздушных окон равна:

$$0{,}0225 \times 32 = 0{,}72 \text{ м}^2;$$

если сделать два окна, то площадь каждого:

$$0{,}72 : 2 = 0{,}36 \text{ м}^2.$$

При длине основания 900 мм средняя высота окна получится 400 мм.

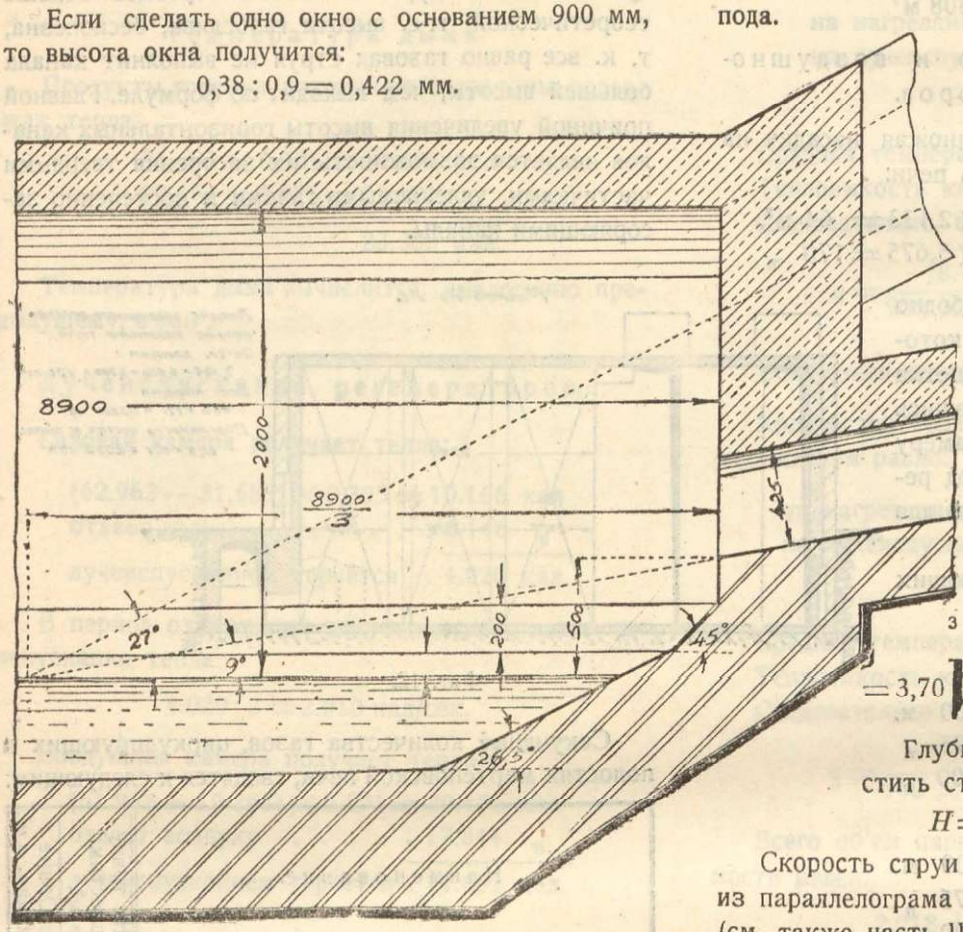
Газовые окна.

Площадь газовых окон, по отношению к воздушным, следует делать пропорциональной количеству проходящих через них продуктов горения, т.-е.

$$\frac{x}{0{,}72}=\frac{0{,}40}{0{,}76};\ x=0{,}379=\sim 0{,}38\ м^2.$$

Если сделать одно окно с основанием 900 мм, то высота окна получится:

$$0{,}38:0{,}9=0{,}422\ мм.$$



Фиг. 13.

Уклон газовых и воздушных каналов.

Этот уклон находится графическим путем в предположении, что продолжение нижней плоскости того и другого канала должны встречаться на уровне зеркала спокойной ванны на расстоянии одной трети длины пода, считая от соответствующих окон. При построении уклонов следует иметь в виду: 1) что расстояние между верхней кромкой газового пролета и нижней кромкой воздушного не должно быть менее 370 мм, т.-е. $1^1/_2$ кирпичей, 2) что порог газового канала при скрап-процессе должен быть выше уровня спокойной ванны на 300 мм, а при рудном процессе не менее 500 мм и до 700 мм.

На прилагаемем эскизе (фиг. 13) уклоны для печи, работающей рудным процессом, получились:

газового . . . . . 9°,
воздушного . . . 27°.

Условия заварки пода.

По мере работы печи площади газовых и воздушных окон вследствие разгара увеличиваются. Поэтому важно выяснить вопрос, до какого предела это увеличение площади окон не будет служить помехой для работы, в частности наварки пода.

В части II был подробно разобран вопрос о наварке пода. Поэтому, не останавливаясь на условиях, необходимых для хорошей заварки пода, решим вопрос: во сколько раз может увеличиться площадь окон, так, что заварка пода будет еще возможна, хотя бы при очень сильном нагреве печей?

Глубина газовой реки по формуле И. Г. Есьмана будет:

$$h_1=A\sqrt[3]{\frac{Q_t^2}{B^2t}}=$$

$$=3{,}70\sqrt[3]{\frac{\left\{3{,}48\left(1+\frac{1700}{273}\right)\right\}^2}{3{,}6^2\,.\,1700}}=1{,}132\ м.$$

Глубина, на которую нужно опустить струю газов:

$$H=2{,}483-1{,}132=1{,}351\ м.$$

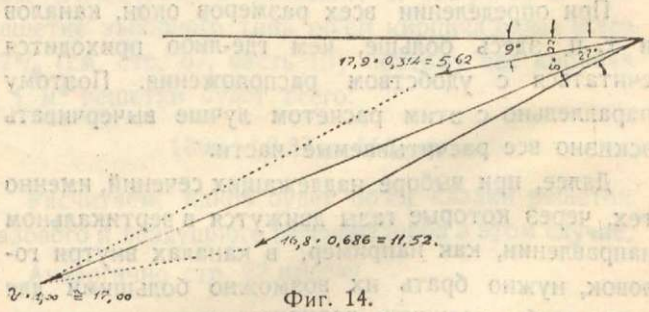
Скорость струи смеси газа и воздуха получим из параллелограма количеств движения (фиг. 14) (см. также часть II).

Скорость газа:

$$v_t=\frac{1{,}35\left(1+\frac{1100}{273}\right)}{0{,}38}=17{,}9\ м/сек.$$

Скорость воздуха:

$$v_a=\frac{2{,}40\left(1+\frac{1100}{273}\right)}{0{,}72}=16{,}8\ м/сек.$$



Фиг. 14.

Весовой состав смеси:

газа . . . . . $1{,}35\times 1{,}05=1{,}42$ кг, 31,4%
воздуха . . . . . $2{,}40\times 1{,}29=3{,}10$ „ 68,6 „

Строя параллелограм количеств движения (фиг. 14), получим скорость смеси $v = 17$ м/сек.

Наклон ее к горизонту . . . . . $\delta = 22°$.

Предполагая, что угол наклона скорости смеси к горизонту, равный 22° остается при разгаре пролетов все время постоянным, мы можем на основании формулы И. Есьмана (см. часть II)

$$H = 0{,}7 \frac{v^2 Sin^2 \delta}{2g} \frac{273 + t_н}{t_э - t_н},$$

найти скорость v при которой будет еще возможна наварка пода.

Возьмем крайний случай, очень сильно нагретой печи, т.-е. $t_н = 1600°$C.

Тогда

$$1{,}351 = 0{,}7 \frac{v^2 Sin^2 22°}{2 . 9{,}81} \frac{273 + 1600}{1850 - 1600}.$$

Откуда $v = 6$ м/сек.

Таким образом, если сечение пролетов увеличится в $17 : 6 = 2{,}83$ раза, то наварка будет еще возможна, хотя печь должна быть для этого сильно нагрета.

Шлаковики и вертикальные каналы.

Так как поперечное сечение вертикальных каналов с точки зрения гидравлической теории печей определяет глубину шлаковиков, то лучше итти обратным путем, а именно, задавшись максимальной глубиной шлаковиков, определить наименьшее из возможных сечений вертикальных каналов.

Устройство шлаковиков имеет своею целью предохранение от засорения пылью регенеративных решеток. Поэтому шлаковики должны быть устроены так, чтобы пыль в них действительно оседала, другими словами, вертикальная струя продуктов горения, при опускании до дна шлаковиков, должна уменьшать свою скорость до нуля и вертикальный фонтан продуктов горения должен быть меньше высоты шлаковиков.

Высота обращенного вертикального фонтана определяется по приведенной уже выше формуле:

$$H = 0{,}7 \frac{v^2}{2g} \frac{273 + t_н}{t_э - t_н}.$$

Для нахождения скорости продуктов горения в соответствующем вертикальном канале нужно задаться высотой шлаковиков (H), температурой их $t_н$ и температурой движущихся продуктов горения $t_э$.

Конструктивно неудобно делать шлаковики выше регенераторов. Поэтому максимальной их глубиной будет высота регенеративной решетки увеличенная на высоту пространства над и под кладкой.

Для данного случая можно взять $H = 6{,}5$ м, считая высоту решетки в 4,5 м и высоту пространства не занятого кирпичем в 1 м сверху и в 1 м снизу решетки.

Минимальной температурой среды шлаковиков является температура подогрева газа и воздуха т.-е. 1000°—1100°; чем выше эта температура, тем, вообще говоря, глубже должны быть шлаковики. При подогреве газа и воздуха в регенераторах до 1000°, температуру среди шлаковиков можно считать равной 1100°. Температуру продуктов горения при входе в шлаковики можно принимать равной 1500°, так как при прохождении через каналы, через которые только что шли газ и воздух, они несколько охлаждаются.

При подставлении всех этих величин в вышеприведенную формулу, получается:

$$6{,}5 = 0{,}7 \frac{v^2}{2g} \frac{273 + 1100}{1500 - 1100},$$

откуда $v = 7{,}3$ м/сек.

Больше этой скорости в вертикальных каналах допускать нельзя.

Для того, чтобы получить наименьшия из допускаемых сечений вертикальных каналов, достаточно соответственно разделить секундный об'ем на эту цифру. А именно, об'ем продуктов горения, проходящих через газовые окна в секунду при 1500°, равен

$$1{,}20\left(1 + \frac{1500}{273}\right) = 7{,}80 \text{ м}^3/\text{сек},$$

об'ем продуктов горения, проходящих через воздушные окна в секунду при 1500°, равен

$$2{,}28\left(1 + \frac{1500}{273}\right) = 14{,}82 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Отсюда наименьшее сечение вертикального газового канала равно:

$$7{,}80 : 7{,}3 = 1{,}070 \text{ м}^2.$$

Наименьшее сечение вертикального воздушного канала равно:

$$14{,}82 : 7{,}3 = 2{,}030 \text{ м}^2.$$

С конструктивной точки зрения вертикальному газовому каналу удобно дать размеры

$$0{,}8 \times 1{,}4 = 1{,}120 \text{ м}^2,$$

а двум воздушным также по

$$0{,}8 \times 1{,}4 = 1{,}120 \text{ м}^2.$$

Поперечное сечение шлаковиков с теоретической точки зрения обоснований не имеет. Из конструктивных соображений их можно сделать равными:

$1{,}4 \times 5{,}1$ м для воздушного
и $1{,}4 \times 5{,}1$ м для газового.

Высота свободного пространства над решетками регенераторов.

Высоты эти расчитываются, как высоты газосливов. Полученные таким образом величины представляют тот minimum, ниже которого их делать нельзя.

Высота над решеткой газового регенератора определяется, как высота газослива для продуктов горения, нагретых до 1500°С,

$$h = 3{,}70\sqrt[3]{\frac{7{,}8^2}{1{,}4^2 \cdot 1500}} = 1{,}017\text{м}.$$

Высота над решеткой воздушного регенератора определяется совершенно так же:

$$h = 3{,}69\sqrt[3]{\frac{14{,}82^2}{3{,}7^2 \cdot 1500}} = 0{,}812\text{ м}.$$

В том и другом случае высоту эту, для запаса, следует увеличить.

Окна из шлаковиков в регенераторы.

Окна из шлаковиков в регенераторы нужно делать возможно больше, т.-е. во всю ширину шлаковиков и по высоте равными высоте пространства над решеткой; в данном случае последнюю высоту можно считать равной 1 м, при ширине окна из газового шлаковика 1,4 м, из воздушного 3,7 м.

Следовательно, площадь окна из газового шлаковика в газовый регенератор равна:

$$1 \times 1{,}4 = 1{,}4\text{ м}^2.$$

Площадь окна из воздушного шлаковика в воздушный регенератор равна:

$$1 \times 3{,}7 = 3{,}7\text{ м}^2.$$

Окна из регенераторов в каналы к перекидным клапанам.

Из воздушного регенератора можно сделать три окна по 1 м ширины. Высота их определяется, как высота газослива.

Об'ем продуктов горения при 300°:

$$2{,}28\left(1+\frac{300}{273}\right) = 4{,}79\text{ м}^3/\text{сек}.$$

Длина газослива 1 м.

Ширина газослива: $1{,}0 \times 3 = 3{,}0$ м.

$$h = 3{,}16\sqrt[3]{\frac{4{,}79^2}{3{,}0^2 \cdot 300}} = 0{,}645\text{ м}.$$

Из газового регенератора сделаем одно окно, которое будет непосредственно переходить в канал к перекидному клапану. Высоту его и ширину расчитаем, как газослив квадратного сечения по формуле

$$h = \sqrt[5]{\frac{A^3 \cdot Q^2}{t}},$$

где $Q = 1{,}20\left(1+\frac{600}{273}\right) = 3{,}84$ м³/сек,

и $t = 600°$.

Тогда:

$$h = \sqrt[5]{\frac{3{,}36^3 \cdot 3{,}84^2}{600}} = \sim 1{,}0\text{ м}.$$

В виду возможного осаждения пыли увеличиваем глубину воздушных окон до 1 м и газового ширину до 1,2 м, оставляя глубину равной 1 м.

Таким образом, получим сечения окон в канале к перекидным клапанам:

Воздушных . . . . . , $3 \times 1{,}0 \times 1{,}0 = 3{,}0$ м².
Газового . . . . . $1 \times 1{,}2 = 1{,}2$ „

Каналы от регенераторов к перекидным клапанам.

Канал из воздушного регенератора расчитываем, как газослив квадратного сечения:

$$h = \sqrt[5]{\frac{3{,}70^3 \cdot 4{,}79^2}{300}} = 1{,}3\text{ м}.$$

На чертеже (фиг. 11) этот боровок из конструктивных соображений сделан:

$$2{,}2 \times 1{,}2\text{ м}.$$

Канал от газового регенератора к перекидному клапану (см. выше) имеет сечение:

$$1 \times 1{,}2\text{ м}.$$

Перекидные клапана.

Эти клапана и для газа и для воздуха следует пропорционировать на скорость от 2,0 до 2,5 м/сек, при 0°С. Для воздуха удобно взять клапан системы Сименса. Если скорость воздуха при 0° равна 2 м/сек, то диаметр клапана D определится из уравнения:

$$\frac{2{,}40}{2{,}0} = \frac{\pi D^2}{4};\ D = 1{,}25\text{ м};\ \omega = 1{,}23\text{ м}^2.$$

Газовый клапан удобно взять типа обыкновенного круглого барабана. Так как работающим сечением является $^1/_4$ круга, уменьшенная еще присутствием перегородок в 12,5 см шириной, то диаметр барабана определяется из нижеследующего уравнения

$$\frac{\pi D^2}{44.4} - 0{,}125\,D = \frac{1{,}35}{2{,}0}$$

Из этого уравнения получаем следующее квадратное уравнение.

$$D^2 - 0{,}637\,D - 3{,}440 = 0$$

$$D = \frac{0{,}637}{2} + \sqrt{\frac{0{,}637^2}{4} + 3{,}440} = 2{,}2 \text{ м.}$$

Отсекающий клапан для газа.

Диаметр отсекающего клапана расчитывается на основании скорости в нем 2 м/сек при 0°.

Следовательно

$$\frac{\pi d^2}{4} = \frac{1{,}35}{2};\ d = 0{,}93 = 1{,}0 \text{ м.}$$

Газовый боровок к клапану.

Если задаться шириной этого боровка 1 м, то высота его определяется, как высота газослива для газа при 300° С.

Об'ем газа, при 300°,

$$1{,}35 \times 2{,}1 = 2{,}835 \text{ м}^3.$$

$$h = 2{,}65 \sqrt[3]{\frac{2{,}835^2}{1{,}0^2 . 300}} = 0{,}800 \text{ м.}$$

В виду возможного засорения высоту увеличиваем до 1 м.

Сечение боровка окончательно получится

$$1{,}0 \times 1{,}0 = 1 \text{ м}^2.$$

Гидравлическая поверка печи.

Предварительные замечания.

Для правильного функционирования печи газ и воздух должны поступать в рабочее пространство с вполне определенными скоростями, подсчитанными выше. Так как силой, движущий газ и воздух, является гидростатическое давление, обусловливаемое с одной стороны разными температурами, а с другой стороны различными весами одного м³, то этого давления должно с некоторым избытком хватить на приобретение всех скоростей. Избыток теоретического давления необходим в виду возможного засорения регенераторов и каналов пылью в продолжении кампании печи. Правда, разгар пролетов, вызывая в этом месте уменьшение скорости газа и воздуха, уменьшает расход давления, но тем не менее, засорение каналов и регенеративных решеток бывает настолько значительно, что возрастание скоростей в этих местах далеко не компенсируется уменьшением скоростей, а соответственно и давления в окнах. Запас же давления нисколько не мешает правильной работе печи, т. к. легко устраняется применением заслонок, вызывающих пережим струи, а значит и большую скорость. Метод проверки вытекает из вышесказанного. Сначала определяется расход гидростатических давлений на приобретение скоростей; затем определяется то гидростатическое давление, которое получается во всех полостях печи, заполненных нагретыми газами. Разность между вторым и первым и дает запас давления на случай засорения решеток печи.

Для определения гидростатического давления, необходимого для развития скорости v, служат формулы, устанавливающие связь между скоростью и скоростным напором h с одной стороны, и напором, весом 1 м³ газа и давлением — с другой стороны. А именно:

$$h = \frac{v^2}{2g} \text{ и } \delta = hp_t,$$

где v — скорость газа в м/сек.

g — ускорение силы тяжести (9,81),

h — скоростной напор в м,

p_t — вес 1 м³ газа при температуре t,

δ — гидростатическое давление в кг на 1 м², или в мм водяного столба.

Для определения скоростей необходимо знать протекающий в секунду об'ем газа в м³ при температуре t, т.-е. Q_t и площадь сечения газослива — ω — в м². При движении в вертикальном направлении таковой площадью является вся площадь сечения канала; при движении же в горизонтальном направлении площадью газослива будет все сечение канала лишь в том случае, когда стенки канала горячее проходящего газа. Происходит это потому, что холодный газ в горячем канале будет стремиться итти по его дну, нагревшиеся же струйки будут подыматься кверху, и в конце-концов будет выполнено все сечение канала. Этот случай как раз и имеет место при прохождении по каналам и газа и воздуха. Наоборот, при движении продуктов горения приходится определять скорость их, принимая во внимание лишь сечение газослива. Далее, по поводу сопротивления регенеративной решетки нужно иметь в виду следующее: так как кладка решетки предположена по типу Каупера, то расчет сопротивления ее (решетки) по этому способу невозможен, ибо скорость в решетке, так сложеной, не меняется; поэтому приходится пользоваться эмпирической цифрой 0,14 мм на метр высоты кауперовской решетки,—заимствованной из статьи инж. Гилева.

Запас давления на пути воздуха.

Об'ем воздуха при 0° . . . . 2,40 м³.
Вес 1м³ воздуха при 0° . . . 1,29 кг.

Путь воздуха	Температура струи в° С.	Об'ем в м³ при температуре t.	Площадь сечения струи в м².	Скорость в м/сек.	Скоростной напор в м.	Вес 1 м³ при температуре t°.	Гидростатическое давление в мм водяного столба.
	t	Q_t	ω	r	h	p_t	δ
Клапан Сименса . . .	0	2,40	1,23	1,95	0,194	1,29	0,25
„ „	0	2,40	0,87[1])	2,76	0,391	1,29	0,50
„ „	0	2,40	1,23	1,95	0,194	1,29	0,25
Боров между клапаном и регенератором	50	2,83	2,64	1,07	0,059	1,09	0,06
Окна из канала в регенератор. . . .	100	3,29	3,00	1,10	0,062	0,94	0,06
Регенерат. решетка . . .	—	—	—	—	$0,14 \times 4,5 = 0,63$		
Окно из регенератора в шлаковик. . .	1000	11,18	3,70	3,02	0,465	0,276	0,13
Вертикальн. каналы	1050	11,61	2,24	5,20	1,38	0,266	0,37
Пролеты в печь.	1100	12,07	0,72	16,80	14,39	0,257	3,70
							$\Sigma\delta = 5,95$

Таким образом, на приобретение всех скоростей необходимо располагать давлением равным 5,95 мм водяного столба.

Для того, чтобы знать, каким давлением располагает печь, необходимо знать:

1) расстояние от пода регенератора до его свода,

2) расстояние от свода регенератора до порога пролетов—в данном случае воздушных,

и если уровень пода регенератора ниже уровня фабрики, то:

3) расстояние от уровня пола фабрики до дна регенератора.

Последняя высота необходима для того, чтобы можно было выяснить, какое давление необходимо преодолеть при опускании нагретого до 50° воздуха на эту глубину.

На прилагаемом эскизе печи (фиг. 11) расстояние от пода регенератора до его свода равно 6,8 м, а расстояние от свода регенератора до порога воздушного пролета равно 3,8 м, глубина, на которую нужно опустить нагретый воздух (от клапана расположенного на уровне пола фабрики, до дна регенератора), равна 2,5 м.

Следовательно, печь располагает гидростатическим давлением:

$$1,29\ (6,8+3,8-2,5)+1,29\ \frac{1}{1+\frac{50}{273}}\ 2,5-$$

$$-1,29\ \frac{1}{1+\frac{550}{273}}\ 6,8-1,29\ \frac{1}{1+\frac{1050}{273}}\ 3,8=$$

$$=10,45+2,73-2,92-1,01=9,25 \text{ мм.}$$

Если из всего гидростатического давления вычесть давление необходимое для создания скоростей, то мы получим запас давления равный:

$$9,25-5,95=3,30 \text{ мм водяного столба.}$$

Запас этот достаточен. Результат этот получен, главным образом, благодаря тому, что взяты очень большие вертикальные каналы. Обыкновенно делаются они гораздо меньше. Согласно данным проф. М. А. Павлова, площадь поперечного сечения их бывает в среднем в 1,5 раза больше площади пролетов. Если бы, руководясь этим правилом, эти каналы были сделаны гораздо меньше, то запас гидростатического давления стал бы равным нулю. Запас же на пути воздуха безусловно необходим; повысить давление засасываемого воздуха вентилятором, как это возможно для газа, нельзя.

Поэтому, если запас давления получается слишком малым (0,2 мм и ниже), нужно менять размеры проектируемых каналов, клапанов и т. п., увеличивая их. Целесообразно так же увеличить высоту регенераторов и головок, так как это повысит запас давления. Именно, с этой точки зрения, регенераторы с решеткой меньше 4 м высоты нежелательны. Вообще говоря, чем выше регенераторы, тем с гидравлической точки зрения они лучше. Наоборот, лишь в очень редких случаях можно увеличить площадь пролетов. Уменьшение скорости в них, вообще говоря, очень нежелательно, так как при этом работа печи затрудняется. Лишь тогда, когда все каналы и проч. увеличены, при чем все-таки гидростатического давления не хватает, приходится уменьшать скорость в окнах.

[1]) Эта цифра получается благодаря тому, что диагональное сечение клапана Сименса («бабочки») представляет из себя эллипс, который проектируется в виде круга (площадь 1,23 м²) на плоскость, наклоненную под углом в 45°:

$$\omega=\frac{1,23}{2}:Cos\ 45^\circ=0,87 \text{ м}^2.$$

Запас давления на пути генераторного газа.

Об'ем генераторного газа при 0° С . . 1,35 м³.

Вес 1 м³ генераторного газа при 0° С . 1,05 кг.

Путь генераторного газа.	Температура струи в °С.	Об'ем в м³ при $t°$.	Площадь сечения струи в м².	Скорость в м/сек.	Скоростной напор в м.	Вес 1 м³ газа при температуре $t°$.	Гигростатическ. давление в мм водяного столба.
	t	Q_t	ω	v	h	p_t	δ
Подводящий канал.	300	2,84	0,800	3,55	0,642	0,500	0,32
Вертикальный кан. клапана . . .	300	2,84	0,68	4,17	0,887	0,500	0,44
Поворот на 90°. .	—	—	—	—	—	—	0,44
Вертикальный кан. клапана. . .	300	2,84	0,68	4,17	0,887	0,500	0,44
Боров между клапаном и регенератор. . . .	400	3,33	1,20	2,77	0,392	0,425	0,17
Регенеративн. решетка	—	—	—	—	$0,14 \times 4,5 = 0,63$		
Окно из регенератора шлаковик	1000	6,29	1,40	4,49	1,025	0,225	0,23
Вертикальные каналы.	1050	6,55	1,12	5,85	1,74	0,216	0,38
Пролеты в печь.	1100	6,79	0,38	17,9	16,33	0,209	3,41
							$\Sigma\delta = 6,46$

Таким образом, на приобретение всех скоростей необходимо располагать гидростатическим давлением равным 6,46 мм водяного столба.

По эскизу печи:

1) Расстояние от пода регенератора до его купола равно 6,8 мм.

2) Расстояние от купола регенератора до порога газового окна равно 2,9 м.

Расстояние от пола фабрики до дна регенератора равно 2,5 м.

Следовательно, печь располагает, считая от дна регенератора до порога газового окна, гидростатическим давлением, равным:

$$1,29\ (6,8 + 2,9 - 2,5) + 1,05\ \frac{1}{1 + \frac{300}{273}}\ 2,5 -$$

$$- 1,05\ \frac{1}{1 + \frac{700}{273}}\ 6,8 - 1,05\ \frac{1}{1 + \frac{1050}{273}}\ 2,9 =$$

$$= 9,29 + 1,25 - 2,01 - 0,63 = 7,90 \text{ мм.}$$

Запас гидростатического давления:

$$7,90 - 6,46 = 1,44 \text{ мм,}$$

т. е. запас вполне достаточен.

Очень часто на заводах ставят маленькие перекидные клапана. Посмотрим, как это отзывается на работе печи.

Предположим, что диаметр колокола равен 1,8 м Рабочее сечение клапана

$$\frac{\pi \cdot 1,8^2}{4 \cdot 4} - 0,125 \cdot 1,8 = 0,64 - 0,23 = 0,41 \text{ м}^2.$$

Скорость в клапане:

$$2,84 : 0,41 = 6,93 \text{ м/сек.}$$

Скоростной напор . . . . 2,45 м.
Расход давления . . . . . 1,22 мм,

т.-е. на 1,22 – 0,44 = 0,78 мм больше в каждом канале колокола, или всего на

$$0,78 \times 3 = 2,34 \text{ мм}$$

больше, чем в предыдущем случае.

Недостаток давления

$$7,90 - (6,46 + 2,34) = -0,90 \text{ мм.}$$

Этот пример показывает, какую огромную роль играют, с точки зрения гидравлической теории печей, перекидные устройства. Впрочем, недостаток гидростатического давления страшен лишь в том случае, когда печь идет на самодувном генераторе. В том же случае, когда источником генераторного газа является генератор с дутьем, недостаток давления можно возместить повышением упругости дутья. Результатом гидравлического подсчета движения воздуха и газа является, таким образом, обеспечение некоторого запаса гидростатического давления на случай засорения регенераторов и, следовательно, удлинение кампании печи.

Расчет высоты дымовой трубы.

Необходимое для функционирования печи разрежение.

Для правильного функционирования печи необходимо, чтобы продукты горения надлежащим образом удалялись из рабочего пространства. Эта цель и достигается устройством дымовой трубы достаточной высоты. Работа дымовой трубы слагается из сообщения надлежащих скоростей продуктам горения на пути через газовый и воздушный регенераторы, с одной стороны, и опускания нагретых газов от порогов воздушного и газового окон до дна борова, с другой стороны. Другими словами, работа трубы заключается в преодолении некоторых гидростатических давлений.

Количество продуктов горения, проходящих через газовый регенератор . . . . . 1,200 м³/сек.

Количество продуктов горения, проходящих через воздушный регенератор . . . . . 2,280 м³/сек.

Вес 1м³ продуктов горения, при 0°С . . . . . 1,30 кг/м³.

Разрежение, которое необходимо создать на пути через воздушный регенератор:

Путь продуктов горения через воздушный регенератор.	Температура струи в °С.	Об'ем в м³ при $t°$.	Площадь сечения струи в м².	Скорость в м/сек.	Скоростной напор в м.	Вес 1 м³ и при температуре t.	Гидростатич. давл. мм. водяного столба.
	t	Q_t	ω	v	h	p_t	δ
Пролеты . .	1600	15,64	0,72	21,7	24,0	0,190	4,56
Вертикальные каналы	1550	15,23	2,24	6,80	2,36	0,195	0,46
Окно из шлаковика в регенератор . .	1500	14,80	3,70	4,00	0,816	0,200	0,16
Решетка регенератора . .	—	—	—	—	0,14 × 4,5 =		0,63
Окна из регенератора в боровок	300	4,79	1,94	2,47	0,311	0,619	0,19
Боровок к перекидн. клапану.	300	4,79	1,70	2,82	0,405	0,619	0,25
Клапан Сименса . . .	300	4,79	1,23	3,89	0,771	0,619	0,48
„ „	300	4,79	0,87	5,51	1,54	0,619	0,95
„ „	300	4,79	1,23	3,89	0,771	0,619	0,48
							$\Sigma\ \delta = 8,16$

Таким образом, для сообщения надлежащих скоростей труба должна дать разрежение 8,16 мм водяного столба.

Для подсчета того разрежения, которое должна дать труба для опускания нагретых продуктов горения, необходимо знать:

1) Расстояние от порога воздушного пролета до свода регенератора (в данном случае 3,8 м).

2) Расстояние от свода регенератора до его пода (в данном случае 6,8 м).

3) Расстояние от дна регенератора до дна отводящего дым боровка, если оба они расположены на разных уровнях.

По поводу последней величины нужно сказать следующее: движение нагретых продуктов горения вверх от пода регенератора до клапана, расположенного на уровне фабрики, делает излишним разрежение, отвечающее гидростатическому давлению столба продуктов горения этой высоты. Далее, от клапана до отводящего дым борозка, нагретые продукты горения приходится опускать на высоту, в некоторых случаях меньшую, чем расстояние от дна регенератора до пола фабрики. Вследствие этого делается излишним лишь разрежение, соответствующее гидростатическому давлению столба продуктов горения, высота которого равна расстоянию от пода регенератора до дна отводящего дым боровка.

Так как в нашем случае дно боровка совпадает с дном регенератора, то мы можем совершенно не учитывать под'ем продуктов горения от пода регенератора до клапана и опускание их от клапана до пода дымового борова.

Разрежение, необходимое для опускания продуктов горения от порога воздушного окна до дна дымового борова, равно:

$$1{,}29\,(6{,}8+3{,}8)-1{,}30\left(\frac{1}{1+\frac{900}{273}}\,6{,}8+\frac{1}{1+\frac{1550}{273}}\,3{,}8\right)=$$

$$=13{,}67-2{,}80=10{,}87 \text{ мм вод. столба.}$$

Следовательно, для опускания продуктов горения дымовая труба должна дать разрежение:

$$10{,}87+8{,}16=19{,}03 \text{ мм в. с.}$$

Разрежение, которое необходимо создать на пути через газовый регенератор определяется совершенно так же:

Путь продуктов горения через газовый регенератор.	Температура струи в °С.	Об'ем в м³ при $t°$.	Площадь сечения струи в м².	Скорость в м/сек.	Скоростной напор в м.	Вес 1 м³ при температуре t.	Гидростатическое давление в мм водяного столба.
	t	Q_t	ω	v	h	p_t	δ
Пролеты . .	1600	8,23	0,38	21,7	24,0	0,190	4,56
Вертикальные каналы . . .	1550	8,02	1,12	7,16	2,61	0,195	0,51
Окно из шлаковика в регенератор . . .	1500	7,79	1,40	5,56	1,58	0,200	0,32
Решетка регенератора . .	—	—	—	—	0,14 × 4,5 =		0,63
Окно из регенератора в боровок и боровок	600	3,84	1,00	3,84	0,75	0,406	0,31
Вертикальный канал клапана.	600	3,84	0,63	5,73	1,68	0,406	0,68
Поворот на 90°	—	—	—	—	—	—	0,68
Вертикальный канал клапана.	600	3,84	0,68	5,73	1,68	0,406	0,68
Боровок к клапану	600	3,84	0,80	4,80	1,17	0,406	0,47
							$\Sigma\ \delta = 8,84$

Соответствующие высоты, фигурирующие при определении разрежения, необходимого при опускании продуктов горения, остаются те же, за исключением расстояния от свода регенератора до порога соответствующего окна: в данном случае оно равно 2,9 м.

Разрежение, необходимое для опускания продуктов горения от порога газового окна до дна регенератора, что тоже—до дна дымового боровка равно:

$$1{,}29\,(6{,}8+2{,}9)-1{,}30\left(\frac{1}{1+\frac{1050}{273}}\,6{,}8+\right.$$

$$\left.+\frac{1}{1+\frac{1550}{273}}\,2{,}9\right)=12{,}51-2{,}39=10{,}12\text{ мм.}$$

Всего дымовая труба должна дать разрежение:

$$10{,}12+8{,}84=18{,}96\text{ мм в с.}$$

Как и следовало ожидать, необходимые разрежения на путях через газовый и воздушный регенераторы получились различными. Отсюда и вытекает необходимость ставить шибера в отдельных боровках до соединения их в общий боров к дымовой трубе.

Дымовая труба.

Дымовая труба, очевидно, должна обладать высотой, способной дать наибольшее разрежение; отсюда вытекает необходимость исходить при расчете из цифры, полученной при определении необходимого разрежения на пути через воздушный регенератор, где разрежение получилось равным 19,03 мм водяного столба. Высота дымовой трубы определяется на основании средней температуры продуктов горения, движущихся в ней, и необходимого разрежения нижеследующим способом:

$$19{,}03=0{,}8\;H\left(1{,}29-\frac{1{,}30}{1+\frac{300}{273}}\right)$$

$$H=\frac{19{,}03}{0{,}8\cdot 1{,}67}=\sim 35\text{ м.}$$

В этот расчет для запаса введен коэффициент, равный 0,8, а средней температурой продуктов горения принята температура в 300°.

Верхний диаметр трубы d определяется на основании об'ема продуктов горения при 300°, покидающих трубу со скоростью 3 м/сек.

Об'ем продуктов горения при 300° равен:

$$3{,}48\times 2{,}10=7{,}31\text{ м}^3/\text{сек;}$$

$$\frac{\pi d^2}{4}\cdot 3=7{,}31\;;\;d=1{,}75\text{ м.}$$

Нижний диаметр определяется из уклона трубы, который обыкновенно бывает около 0,02.

$$D=1{,}75+0{,}02\cdot 35=2{,}45\text{ м.}$$

Размеры квадратного борова, подводящего продукты горения к трубе, определяются на основании формулы И. Г. Есьмана:

$$h=\sqrt[5]{\frac{3{,}70^3\cdot\left[3{,}48\left(1+\frac{400}{273}\right)\right]^2}{400}}=1{,}56\text{ м.}$$

В виду возможности засорения и удобства конструкции глубина борова увеличена до 2,2 м.

ГЛАВА V.

Расчет конденсатора для осушки дровяного генераторного газа[1]).

В первой части при расчете генераторного газа из дров мы пришли к выводу, что выгоднее всего работать, подводя под колосники генератора пар и частично разлагая его по реакции

$$H_2O+C=CO+H_2,$$

и потом осушивая влажный газ в конденсаторе.

Осушка газа обычно производится охлаждением газа ниже точки росы, при чем вода конденсируется и отводится из конденсатора. Для уменьшения поверхности конденсатора выгодно применять брызгало, вбрызгивающее воду в проходящий горячий генераторный газ. При этом газ отдает свое тепло, охлаждаясь до точки росы Дальнейшее охлаждение до 35° удобнее производить в поверхностном конденсаторе.

Состав осушенного генераторного газа.

Состав сырого газа, выходящего из генератора при температуре 230°С:

CH_4	0,207 мо		1,89%
CO_2	0,721 „		6,58 „
CO	2,180 „		19,90 „
H_2	1,614 „		14,74 „
N_2	3,206 „		29,27 „
H_2O	3,025 „		27,62 „
	10,953 мо.		100,00%.

[1]) Расчет сделан студ. Ф. Бугровым и С. Грум-Гржимайло.

Давление паров воды в газе:

$$0{,}2762 \times 1{,}0333 = 0{,}2854 \text{ кг/см}^2.$$

Точка росы определится из таблицы (см. приложения) в 67,5°С.

Давление паров воды, насыщающих пространство при 35°С:

0,0572 кг/см² [1]).

Об'ем абсолютно сухого газа из 100 грамм дров равен:

$$10{,}953 - 3{,}025 = 7{,}928 \text{ мо.}$$

Об'ем паров воды способных удержаться в газе после охлаждения его до 35°С:

$$x = 7{,}928 \frac{0{,}0572}{1{,}0333 - 0{,}0572} = 0{,}465 \text{ мо.}$$

Следовательно, можно сконденсировать:

$$3{,}025 - 0{,}465 = 2{,}560 \text{ мо.}$$

Состав осушенного газа:

CH_4	0,207 мо		2,47%
CO_2	0,721 „		8,59 „
CO	2,180 „		25,97 „
H_2	1,614 „		19,23 „
N_2	3,206 „		38,20 „
H_2O	0,465 „		5,54 „
	8,393 мо		100,00%.

Сырой газ, нагретый до 230°С, содержит тепла:

CH_4	$0{,}207 \times 2.567 =$	531 кал
CO_2	$0{,}721 \times 2.184 =$	1.575 „
$CO + H_2 + N_2$	$7{,}000 \times 1.561 =$	10.927 „
H_2O	$3{,}025 \times 1.878 =$	5.681 „
		18.714 кал.

При 67,5°С он содержит тепла:

CH_4	$0{,}207 \times 687 =$	142 кал
CO_2	$0{,}721 \times 608 =$	438 „
$CO + H_2 + N_2$	$7{,}000 \times 453 =$	3.171 „
H_2O	$3{,}025 \times 546 =$	1.652 „
		5.403 кал.

Осушенный газ при 67,5° содержит тепла:

CH_4	$0{,}207 \times 687 =$	142 кал
CO_2	$0{,}721 \times 608 =$	438 „
$CO + H_2 + N_2$	$7{,}000 \times 453 =$	3.171 „
H_2O	$0{,}465 \times 546 =$	254 „
		4.005 кал.

Осушенный газ при 35°С содержит тепла:

CH_4	$0{,}207 \times 350 =$	72 кал
CO_2	$0{,}721 \times 311 =$	224 „
$CO + H_2 + N_2$	$7{,}000 \times 235 =$	1.645 „
H_2O	$0{,}465 \times 282 =$	131 „
		2.072 кал.

[1]) См. приложения.

Определение количества воды, вступающей в брызгало.

Работа брызгала (см. фиг. 15) состоит в охлаждении газа от 230° до точки росы 67,5°, т.-е. в отнятии от газа:

$$18.714 - 5.403 = 13.311 \text{ кал.}$$

Для расчета количества воды, вступающей в конденсатор через брызгало, зададимся, чтобы эта вода, охлаждая газ, не нагревалась бы выше 67,5°С (точка росы). Начальную температуру воды брызгала будем считать равной температуре летнего воздуха ~ 20°С.

Отсюда, вода нагревается на

$$67{,}5 - 20 = 47{,}5°\text{C.}$$

Следовательно, количество воды, вступающей в брызгало:

$$\frac{13.311}{47.500} = 0{,}2802 \text{ кг на 100 гр дров.}$$

Определение работы трубчатого конденсатора.

Работа трубчатого (поверхностного) конденсатора состоит из:

1) Охлаждения осушенного газа с 67,5° до 35°.
2) Охлаждения воды брызгала с 67,5° до 35°.
3) Конденсации паров воды в воду и охлаждения последней до 35°.

Охлаждение осушенного газа с 67,5° до 35,°С.

Генераторный газ с соответствующим ему количеством паров воды при 35°С и 760 мм давления, охлаждаясь с 67,5° до 35°С, оставит в конденсаторе тепла:

$$4.005 - 2.072 = 1.933 \text{ кал.}$$

Охлаждение воды брызгала с 67,5° до 35°С.

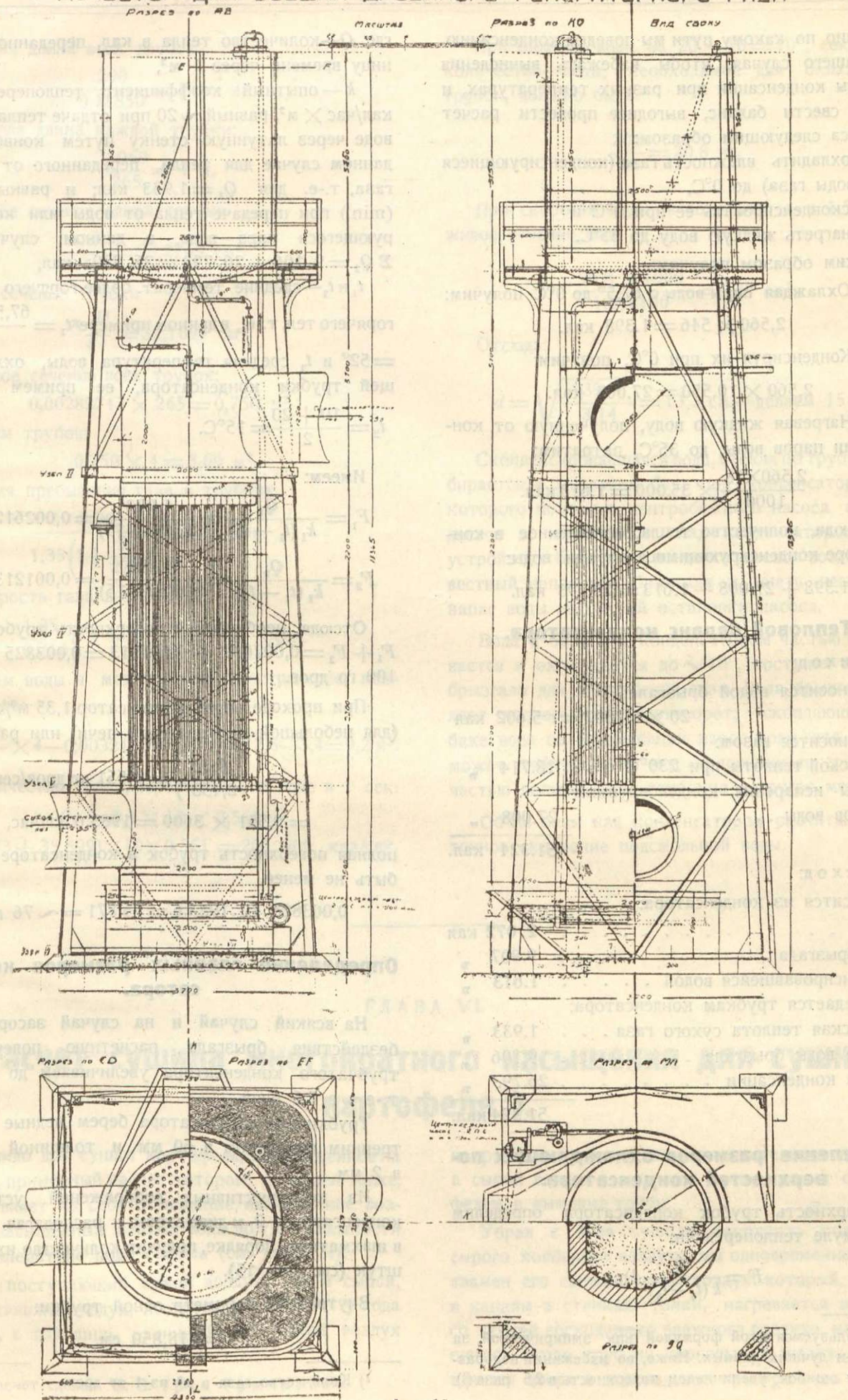
Вода брызгала, попадая в трубчатый конденсатор, охлаждается на $67{,}5 - 35 = 32{,}5$°С и оставляет тепла:

$$0{,}2802 \times 32.500 = 9.106 \text{ кал.}$$

Конденсация паров воды в воду и охлаждение последней до 35°С.

При охлаждении паров с 67,5° до 35° конденсация последних в воду будет происходить непрерывно, по мере охлаждения, и для выяснения происходящего процесса нужно в каждый данный момент вычислять количество тепла освобождающееся при конденсации паров воды. Но согласно закону начального и конечного состояния совершенно без-

Конденсатор для осушки дровяного генераторного газа



Фиг. 15

различно по какому пути мы поведем конденсацию. Для нашего случая, чтобы избежать вычисления теплоты конденсации при разных температурах, и чтобы свести баланс, выгоднее провести расчет процесса следующим образом:

1) охладить влажность газа (конденсирующиеся пары воды газа) до 0°С,

2) сконденсировать ее при 0°С и

3) нагреть жидкую воду до 35°С.

Таким образом получим:

1) Охлаждая пары воды с 67,5° до 0°С получим:

$$2{,}560 \times 546 = 1.398 \text{ кал.}$$

2) Конденсируя их при 0°С, получим:

$$2{,}560 \times 10.550 = 27.008 \text{ кал.}$$

3) Нагревая жидкую воду, полученную от конденсации паров воды, до 35°С, затратим:

$$\frac{2{,}560 \times 18}{1000} \times 35.000 = 1.613 \text{ кал.}$$

Отсюда, количество тепла, оставленное в конденсаторе конденсирующимися парами воды:

$$1.398 + 27.008 - 1.613 = 26.793 \text{ кал.}$$

Тепловой баланс конденсатора.

Приход:

Приносится водой брызгала:

$20 \times 0{,}2802 =$ 5.602 кал

Приносится газом:

Физической теплоты при 230°С . . .	18.714	„
Теплоты испарения конденсируемых паров воды	27.008	„
	51.324	кал.

Расход:

Уносится из конденсатора:

Газом	2.072	кал
Водой брызгала	9.807	„
Сконденсировавшейся водой	1.613	„
Передается трубкам конденсатора:		
Физическая теплота сухого газа . . .	1.933	„
Теплота воды брызгала	9.106	„
Теплота конденсации	26.793	„
	51.324	кал.

Определение размеров охлаждающих поверхностей конденсатора.

Поверхность трубок конденсатора определим по формуле теплопередачи:

$$F = \frac{Q}{k(t_1 - t_2)}$$ [1]),

где Q—количество тепла в кал, переданное в единицу времени через 1 м²,

k — опытный коэффициент теплопередачи в кал/час × м², равный ~ 20 при отдаче тепла от газа воде через латунную стенку путем конвекции; в данном случае для тепла, переданного от сухого газа, т.-е. для $Q_1 = 1.933$ кал; и равный ~ 800 (min.) при передаче тепла от воды или конденсирующегося пара—воде, в данном случае для $\Sigma Q_2 = 9.106 + 26.793 = 35.899$ кал,

t_1 и t_2—средние температ. более горячего и менее горячего тел, т.-е., в данном примере $t_1 = \frac{67{,}5+35}{2} = 52°$ и t_2 средняя температура воды, охлаждающей трубки конденсатора, ее примем равной $t_2 = \frac{10+20}{2} = 15°$С.

Имеем:

$$F_1 = \frac{Q_1}{k_1(t_1 - t_2)} = \frac{1{,}933}{20(52-15)} = 0{,}002612 \text{ м}^2,$$

$$F_2 = \frac{Q_2}{k_2(t_1 - t_2)} = \frac{35{,}899}{800(52-15)} = 0{,}001213 \text{ м}^2.$$

Отсюда, необходимая поверхность трубок:
$F_1 + F_2 = 0{,}002612 + 0{,}001213 = 0{,}003825$ м² на 100 гр дров.

При проходе через конденсатор 1,35 м³/сек газа (для небольшой мартеновской печи) или расходе:

$$\frac{1{,}35}{2{,}453}$$ [1]) $= 0{,}551$ кг дров/сек

$$= 0{,}551 \times 3600 = 1983{,}6 \text{ кг/час,}$$

полная поверхность трубок в конденсаторе должна быть не менее,

$$0{,}003825 . 10 . 1983{,}6 = 75{,}871 = \sim 76 \text{ м}^2.$$

Определение главных размеров конденсатора.

На всякий случай и на случай засорения и бездействия брызгала расчетную поверхность трубчатого конденсатора увеличиваем до 200 м², т.-е ~ в 2,5 раза.

Трубки для конденсатора берем медные с внутренним диаметром в 60 мм и толщиной стенки в 2 мм.

Из конструктивных соображений устраивая конденсатор в 2 м диаметром и располагая трубки в шахматном порядке, получим количество их = 265 штук (см. фиг. 15).

Внутренний периметр одной трубки:

$$\pi . d = 18{,}850 \text{ см.}$$

[1]) Пользуемся этой формулой как эмпирической, за неимением лучших данных. Ниже, во избежании недоразумений и ошибок, увеличиваем поверхность в 2,5 раза (!).

[1]) Количество газа в м³ из 1 кг дров.

Общая длина всех трубок:

$$\frac{200}{0{,}18850} = 1060 \text{ м.}$$

Отсюда длина каждой трубки:

$$\frac{1060}{265} = 4 \text{ м.}$$

Живое сечение одной трубки

$$\frac{\pi . d^2}{4} = 28{,}2743 \text{ см}^2.$$

Все сечение трубки

$$\frac{\pi . d_1^2}{4} = 32{,}1699 \text{ см}^2.$$

Живое сечение всех трубок:

$$0{,}00282743 \times 265 = 0{,}750 \text{ м}^2.$$

Об'ем трубок:

$$0{,}750 \times 4 = 3{,}00 \text{ м}^3.$$

Время пребывания газа в трубках,

$$\frac{3{,}00}{1{,}35\left(1+\frac{52}{273}\right)} = 1{,}87 \text{ сек.}$$

Скорость газа в трубках,

$$\frac{1{,}35}{0{,}750}\left(1+\frac{52}{273}\right) = 2{,}14 \text{ м/сек.}$$

Об'ем воды в межтрубном пространстве конденсатора:

$$\frac{3{,}14 . 2^2}{4} \times 4 - 0{,}00321699 \times 1060 = 12{,}6 - 3{,}4 = 9{,}2 \text{ м}^3.$$

Количество тепла, переходящее к воде в 1 сек:

$$(Q_1 + Q_2) \times 10 \times 0{,}551 =$$
$$= (1.933 + 35.899) \times 10 \times 0{,}551 = 208.000 \text{ кал/сек.}$$

При нагреве, воды на $20 - 10 = 10°$, секундное количество воды, необходимое для охлаждения трубок, должно быть:

$$\frac{208}{10} = 20{,}8 \text{ кг.}$$

При скорости воды в водопроводе в 1,5 м/сек живое сечение его:

$$\frac{20{,}8 \times 1000}{1{,}5 \times 100} = 139 \text{ см}^2.$$

Отсюда:

$$d = \sqrt{\frac{139 . 4}{3{,}14}} = 13{,}3 \text{ см,—делаем 15 см.}$$

Сконденсировавшаяся вода, стекая по трубкам, собирается в железном баке под конденсатором, из которого помощью центробежного насоса она подается в верхний бак, над конденсатором. Цель устройства бака над конденсатором: создать известный напор для брызгала и иметь некоторый запас воды на случай остановки насоса.

Вода в баке над конденсатором частью отстаивается и охлаждается до $\sim 10°$, поступая затем в брызгало для охлаждения газа. Вода брызгала делает непрерывный круговорот; скопляющаяся в баке вода от конденсации паров воды газа, частью может пойти вновь под колосники генератора и частью должна быть отводима в другое место.

Об'ем бака над конденсатором расчитан на суточное скопление подсмольной воды.

ГЛАВА VI.

Расчет сушила многократного насыщения для сушки картофеля [1]).

Сушило для сушки картофеля, изображенное на фиг. 16, примерный расчет которого помещен ниже, представляет из себя помещение, наполненное воздухом насыщенным парами воды до 75% влажности при температуре пода сушила (см. часть II).

Как поступающий сухой воздух, так и сырой, отработавший воздух, вводятся и отводятся у пода сушила, с той лишь разницей, что сухой воздух направляется прямо на подогревательные приборы, а сырой воздух отводится из-под решет с картофелем в дымовые трубы.

Убрав с пода сушила некоторое количество сырого холодного воздуха, мы одновременно вводим взамен его свежий сухой воздух, который, попадая в каналы в стенках топки, нагревается и вместе со струей восходящего влажного воздуха, нагревающегося около труб из кровельного железа, направляется вверх в подсводовое пространство сушила.

[1]) Расчет сделан С. В. Грум-Гржимайло.

После этого воздух, с влажностью немного меньшей 75% (считая на температуру у пода сушила — t_{min}) омывает сушащий картофель и, насыщаясь до 75% влажности, вновь опускается на под сушила, имея температуру значительно ниже температуры у свода. После этого часть воздуха отводится из сушила, а оставшийся в сушиле воздух, нагреваясь в каналах топки и около железных труб, снова поднимается под свод в смеси с вновь поступившим нагревшимся сухим воздухом.

Задание.

Расчитать сушило для сушки 300 пудов картофеля в 24 часа, при влажности картофеля 80% и максимальной температуре сушки 90° С. Отопление должно производиться дровами состава:

C	40,65%	N_2 . . .	0,24%
H_2 . . .	4,63 „	H_2O . . .	18,70 „
O_2 . . .	35,37 „	Зола . .	0,41 „
			100,00%

Данные расчета горения дров.

Количество возд. при 100% избытка 7,34 м³/кг.

Состав и количество продуктов горения:

CO_2 . . .	3,388	мо
H_2O	3,354	„
O_2	3,441	„
N_2	25,899	„
	36,082	мо = 8,082 м³/кг дров.

Теплотворная способн. 1 кг дров 3433 Кал.

Вес 1 м³ продуктов горения 1,29 кг/м³.

Расчет сушила.

При производительности сушила 300 пудов (5000 кг) сырого картофеля в 24 часа полезная работа сушила будет заключаться в удалении количества влажности:

$$300 \times 16{,}38 \times 0{,}8 = \sim 4\,000 \text{ кг воды/24 часа} = 0{,}0463 \text{ кг/сек.}$$

Условия сушки таковы:

1. Температура у потолка сушила $t_{max} = 90°C$ [1]).
2. „ у пода „ $t_{min} = 61{,}6°C$.
3. 1 кг воды, испаряемой из картофеля, требует:

a) Сухого воздуха 8,65 кг [2]) или (при 0° С) 6,69 м³.

b) влажного воздуха 9,65 кг [3]) или 9,70 м³ (при t_{min}).

c) Число подогревов и насыщений . . . . 9,2 [4]).

d) Точка росы подогреваемой смеси влажного и сухого воздуха . . . . . 54° С [5]).

4. Проектные данные сушила:

a) Сухого воздуха в сек поступает:
$6{,}69 \times 0{,}0463 = 0{,}310$ м³/сек при 0° С;

b) Влажного воздуха удаляется, в сек:
$9{,}70 \times 0{,}0463 = 0{,}449$ м³/сек при t_{min};

c) Циркулирующий об'ем, при средней температуре в сушиле $\frac{90{,}0 + 61{,}6}{2} = 76°$ С, будет

$$0{,}449 \times 9{,}2 \times \frac{1 + \frac{76}{273}}{1 + \frac{61{,}6}{273}} = 4{,}31 \text{ м}^3.$$

Итак, для того, чтобы сушило могло испарить 0,0463 кг/сек воды, нужно, чтобы около отопительных труб в секунду прошло бы 4,31 м³ влажного воздуха, заполняющего сушило. Этот влажный воздух подогреется до 90° С и начнет омывать решета с сырым картофелем, будет сушить картофель, сам насыщаться влажностью и остуживаться до 61,6° С. Сколько времени нужно для этого воздуху? Это зависит от природы предмета, который сушится. Картофель, просто нарезанный, сушится очень долго, ибо живые клетки трудно отдают свою влагу. Ошпаренный картофель сушится скоро. В зависимости от способности сохнуть погруженного в сушило материала для сушки находится и об'ем сушила.

На основании данных практики в сушиле для картофеля приняты нижеследующие конструктивные размеры:

Поверхность решета 700 × 1000 мм. Нагрузка на такое решето зависит от метода сушки. Практика показывает, что главное зло сушил это запаривание товара, когда на сыром картофеле долго не получается сухой корочки и картофель, так сказать, закисает, отчего качество его понижается. Поэтому предполагается сырой картофель грузить на решета верхней половины сушила только по 4 кг на решето, чтобы они подвергались быстрой энергичной сушке с самого момента погрузки в сушило. Когда картофель наполовину высохнет, два решета верхнего этажа ссыпается на одно решето нижнего, которое принимает на себя, т. о., полупродукт, соответствующий 8 кг сырого картофеля Из сказанного следует, что средняя нагрузка картофеля на решето будет

$$\frac{2 \times 4 + 8}{3} = 5\tfrac{1}{3} \text{ кг}$$

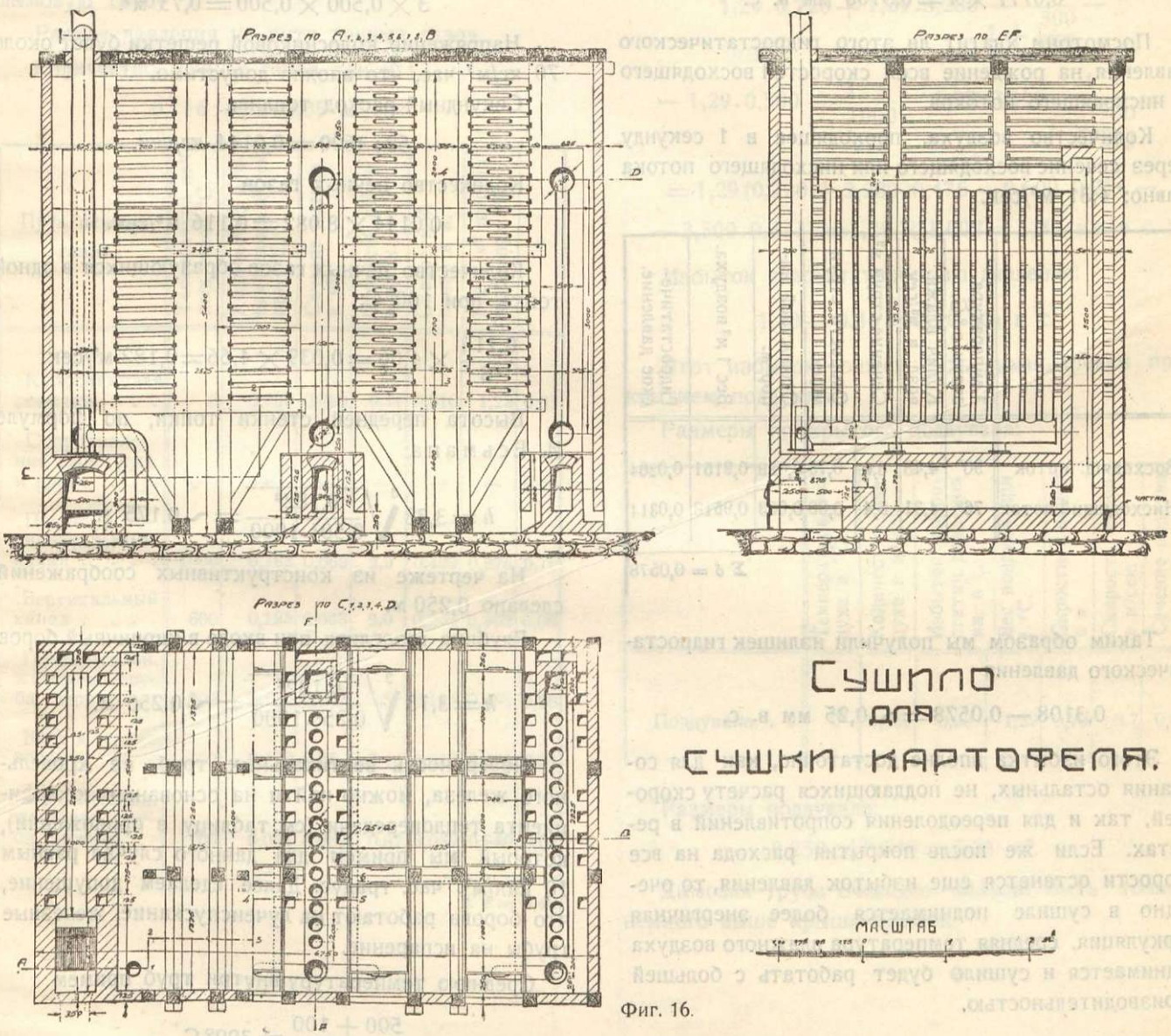
сырого картофеля. Производительность решета в сутки будет зависеть от времени сушки картофеля. Зададимся 8-ю часами, т.-е. тремя оборотами решет в 24 часа. Откуда производительность решета будет 16 кг в 24 часа, считая на сырой картофель, и число решет около 300 шт.

---

[1]) См. часть II. Теория сушки, табл. II.
[2]) См. табл. VIII.
[3]) См. табл. VIII.
[4]) См. табл. VI.
[5]) См. табл. VII.

Делаю 288 решет (фиг. 16), располагая их в четыре колонны по 72 решета, по 3 в ряду или 24 ряда. Из них для первого нагрева 16 рядов с нагрузкой сырого картофеля по 4 кг и 8 рядов по 8 кг для второго нагрева.

Сухой картофель будет выгружаться из 96 решет, расположенных в восьми нижних рядах. Сырой картофель будет погружаться в 16 верхних рядов в 192 решета. Порядок работы будет таков: один нижний ряд, состоящий из 12 решет с нагрузкой, считая на сырой картофель в 96 кг



Фиг. 16.

опораживается каждые $^1/_2$ часа. За эти же полчаса нужно пересыпать 24 решета полусырого картофеля из верхних рядов решет в 12 нижних решет и вновь загрузить в них 96 кг сырого картофеля по 4 кг на каждое решето. Совершенно очевидно, что маневры прислуги для такой работы должны быть хорошо разработаны, но об этом здесь распространяться неуместно.

Расчет циркуляции воздуха.

Располагая решета в четыре вертикальных стопы в расстоянии 150 мм по высоте друг от друга, мы получим об'ем нисходящего и восходящего потоков около 50 м³ [1]), что дает время одной циркуляции

$$50 : 4{,}31 = 11{,}6 \text{ сек}$$

и время пребывания секундного об'ема воздуха в сушиле

$$\frac{50 . 9{,}2}{4{,}31} = 107 \text{ сек.}$$

в это время совершится полное насыщение вошедшего в сушило сухого воздуха парами воды.

Циркуляция воздуха внутри сушила происходит вследствие того, что воздух, нагреваясь у труб отопления, делается легче, чем создается необходимое для циркуляции гидростатическое давление.

[1]) Восходящий поток: $3 \times 4 \times 4 \times 0{,}625 = \sim 30$ м².
Нисходящий поток: $2 \times 4 \times 4 \times 0{,}675 = \sim 20$ м².

При температуре восходящих струек в 90° С, а нисходящих в 61,6° С разность весов кубического метра воздуха будет:

$$\Delta = 0{,}9928^{1}) - 0{,}9928\,\frac{1+\frac{61{,}6}{273}}{1+\frac{90}{273}} = 0{,}0777 \text{ кг/м}^3,$$

или гидростатическое давление 0,0777 мм на 1 погонный метр высоты струи теплого воздуха, равной 4 м, что даст запас гидростатического давления

$$0{,}0777 \times 4 = 0{,}3108 \text{ мм в. с.}$$

Посмотрим хватит ли этого гидростатического давления на рождение всех скоростей восходящего и нисходящего потоков.

Количество воздуха, проходящее в 1 секунду через сечение восходящего или нисходящего потока равно: 4,31 м³/сек.

	Температура струи в °С.	Колич влажн. возд. в м³/сек.	Сечение струи м².	Скорость струи м/сек.	Скоростной напор м.	Вес 1 м³ воздуха.	Гидростатическое давление.
Восходящ. поток	90°	4,48	6,0	0,75	0,029	0,9151	0,0264
Нисходящий поток	76°	4,31	5,4	0,80	0,033	0,9518	0,0314
							$\Sigma\,\delta = 0{,}0578$

Таким образом мы получили излишек гидростатического давления

$$0{,}3108 - 0{,}0578 = \sim 0{,}25 \text{ мм в. с.}$$

Этого избытка вполне достаточно, как для создания остальных, не поддающихся расчету скоростей, так и для переодоления сопротивлений в решетах. Если же после покрытия расхода на все скорости останется еще избыток давления, то очевидно в сушиле поднимается более энергичная циркуляция, средняя температура влажного воздуха поднимается и сушило будет работать с большей производительностью.

Расчет отопительных устройств.

Из таблицы IX (см. часть II; теория сушки) мы имеем, что количество тепла необходимое для удаления 1 кг влажности равно 745 Кал. Исходя из этой цифры мы легко можем вычислить полезный расход дров и прибавив 30% на лучеиспускание и потерю в дым получить полный расход топлива.

[1]) См. часть II. Теория сушил, таб. I.

Полезный расход тепла в 1 час:

$$3600 \times 0{,}0463 \times 745.000 = 124.177.000 \text{ кал.}$$

Общий расход тепла

$$\frac{124.177.000}{0{,}7} = 177.395.000 \text{ кал.}$$

Расход дров теплопроизводительной способностью 3433 Кал.

$$177.395 : 3433 = \sim 52 \text{ кг/час.}$$

Делаем 3 топки поверхностью

$$3 \times 0{,}500 \times 0{,}500 = 0{,}75 \text{ м}^2.$$

Напряжение колосниковой решетки будет около 70 кг/м² час, что вполне допустимо.

Секундный расход топлива

$$52 : 3600 = 0{,}0144 \text{ кг/сек.}$$

Количество печных газов

$$0{,}0144 \times 8{,}082 = 0{,}116 \text{ м}^3\text{/сек.}$$

Количество печных газов образующихся в одной топке, при 100° С:

$$\frac{0{,}116}{3} \times 4{,}66 = 0{,}039 \times 4{,}66 = 0{,}182 \text{ м}^3\text{/сек.}$$

Высота передней стенки топки, по формуле И. Есьмана:

$$h = 3{,}38 \sqrt[3]{\frac{0{,}182^2}{0{,}50^2 . 1000}} = \sim 0{,}175 \text{ м.}$$

На чертеже из конструктивных соображений сделано 0,250 м.

Глубина газослива при входе в кирпичный боров

$$h = 3{,}13 \sqrt[3]{\frac{0{,}182^2}{0{,}25^2 . 1000}} = \sim 0{,}250 \text{ м.}$$

Поверхность вертикальных труб, из кровельного железа, можно найти на основании коэффициента теплопередачи (см. таблицу в приложении), который мы примем для данного случая равным 10 кал/м². час. градус. Далее сделаем допущение, что борова работают на лучеиспускание, железные трубы на испарение.

Среднюю температуру внутри труб примем

$$\frac{500 + 100}{2} = 300° \text{ С.}$$

Средняя температура внутри сушила 76° С.

Поверхность труб

$$F = \frac{Q}{k\,(t_1 - t_2)} = \frac{124.177}{10\,(300 - 76)} = \sim 56 \text{ м}^2.$$

Сделано, не считая дымовой трубы, 70 м², что вполне обеспечивает правильную работу сушила.

Расчет движения печных газов.

В основание дымовой трубы мы вводим отработавший влажный воздух, давление которого при входе в патрубки равно нулю. Отсюда следует, что и давление печных газов при входе в дымовую трубу так же должно быть равно нулю, так как иначе будет возможен прорыв дымовых газов в рабочее пространство сушила. Иначе говоря, сопротивление проходу печных газов по отопительному устройству должно быть равно запасу гидростатического давления, полученному дымом при входе в дымовую трубу [1]).

Расход давления на пути печных газов.

Количество печных газов при 0° С:

$$0{,}116 : 3 = 0{,}039 \text{ м}^3/\text{сек}.$$

Путь печных газов.	Температура печных газов °С.	Количество печных газов в м³/сек. при t°С.	Сечение потока в м².	Скорость струи в м/сек.	Скоростной напор в м.	Вес 1 м³ печных газов при t°С.	δ
Колосниковая решетка . . .	0	0,035	0,080	0,44	0,010	1,29	0,02
Сопротивление слоя угля и дров	—	—	—	—	—	—	0,05
Пролет в горизонтальный канал	1000	0,182	0,063	2,9	0,429	0,276	0,12
Вертикальный канал	600	0,125	0,063	2,0	0,204	0,403	0,08
Горизонтальн. железная труба, верхняя . .	500	0,110	0,062	1,8	0,165	0,455	0,08
Вход в вертик. трубы	500	0,110	0,25	0,44	0,010	0,455	0,01
Горизонтальн. железная труба, нижняя.	100	0,054	0,062	0,87	0,039	0,940	0,04
							$\Sigma\,\delta = 0{,}40$

Запас гидростатического давления:

среднюю температуру в топке примем равной . . . . . 1000° С.

среднюю температуру в вертикальном канале . . . . . $\frac{600+500}{2} = 550°$ С.

среднюю температуру в трубах из кровельного железа . . $\frac{500+100}{2} = 300°$ С.

Запас гидростатического давления:

$$1{,}29 \cdot 0{,}720 + 1{,}29 \cdot 3{,}280 \frac{1}{1+\frac{300}{273}} -$$

$$- 1{,}29 \cdot 0{,}500 \frac{1}{1+\frac{1000}{273}} - 1{,}29 \cdot 3{,}500 \frac{1}{1+\frac{550}{273}} =$$

$$= 1{,}29\,(0{,}720 + 3{,}280 \cdot 0{,}476 - 0{,}500 \cdot 0{,}214 -$$

$$- 3{,}500 \cdot 0{,}333) = 1{,}29 \times 1{,}008 = 1{,}30 \text{ мм в с.}$$

Избыток гидростатического давления:

$$1{,}30 - 0{,}40 = 0{,}90 \text{ мм в с.}$$

Этот избыток должен быть ликвидирован прикрытием поддувала.

Размеры прикрытого поддувала:

	Температура воздуха в °С.	Количество воздуха в м³/сек.	Избыток гидростатич. давления мм. в с.	Вес воздуха при t °С.	Скоростной напор в м.	Скорость струи в м/сек.	Сечение поддувала в м².
Поддувало . .	0°	0,035	0,90	1,29	0,70	3.7	0,01

Размеры поддувала:

$$0{,}250 \times 0{,}040 = 0{,}01 \text{ м}^2.$$

Дымовая труба очевидно должна быть только немного выше крыши сушила.

---

[1]) Все отопительное устройство представляет из себя «Сифон бр. Сименс» (см. часть II), в результате работы которого, получается избыток гидростатического давления при выходе.

Расчет движения дымовых газов.

В основание дымовой трубы мы вводим отработавший нагретый воздух, давление которого при входе в трубу равно нулю. Отсюда следует, что и давление дымовых газов при входе в дымовую трубу так же должно быть равно нулю, так как иначе будет возможен прорыв дымовых газов в рабочее пространство сушила. Иначе говоря, сопротивление проходу дымных газов по отопительному устройству должно быть равно запасу гидростатического давления, получаемому дымом при входе в дымовую трубу [1]).

Расход давления на пути дымных газов.

Количество дымных газов при 0° С

$$3 \times 0{,}500 \times 0{,}500 = 0{,}$$

$$0{,}116 : 3 = 0{,}039 \text{ м}^3/\text{сек.}$$

Посмотрим, хватит ли этого гидростатического давления на рождение всех скоростей восходящего и нисходящего потоков.

Количество воздуха, проходящее в 1 секунду через сечение восходящего или нисходящего потока равно 1,44 кг/сек.

Высота передней стенки топки, по формуле Н. Есьмана,

$$A = 3{,}38 \sqrt{\frac{0{,}250^2}{1000}} = \sim 0{,}$$

Глубина гарнисажа при входе в кирпичный боров

$$0{,}250 \times 0{,}040 = 0{,}01 \text{ м}^2$$

Дымовая труба средняя должна быть только немного выше крыши сушила.

Расчет отопительных устройств.

Из таблицы IX (см. часть II, теория сушки) мы имеем, что количество тепла необходимое для удаления 1 кг влажности равно 745 Кал. Исходя из этой цифры мы легко можем вычислить полезный расход дров и прибавив 30% на лучеиспускание и потери в дымовых газах, получим полный расход дров

1) Все отопительное устройство после калорифера «Сифон» (см. часть I), в результате работы которого поддается гидростатического давления при выходе.

Путь дымовых газов	Температура дымовых газов при входе в данный участок пути, °С	Количество дымовых газов при данной температуре, м³/сек.	Скорость движения дымовых газов при данной температуре, м/сек.	Средняя скорость движения дымовых газов, м/сек.	Средняя температура дымовых газов, °С	Удельный вес дымовых газов при данной температуре, кг/м³	Средний удельный вес дымовых газов, кг/м³	Разность удельных весов наружного воздуха и дымовых газов, кг/м³	Высота участка пути, м	Гидростатическое давление, мм в. ст.
Колосниковая решетка . . .	0	0,085	0,080	0,11	0,010	1,29	0,02			
Сопротивление в дров. . . .	—	—	—	—	—	—	—	0,05		
Приведенный канал . . .	1000	0,185	0,083	2,0	0,129	0,276	0,12			
Вертикальный канал . . .	800	0,125	0,083	2,0	0,201	0,108	0,08			
Горизонтальный железный трубопровод, вступающий в борова	500	0,110	0,083	1,8	0,282	0,165	0,08			
Вход в вертикальный железный трубопровод	500	0,110	0,083	1,8	0,282	0,165	0,01			
Горизонтальный железный трубопровод	500	0,110	0,083	1,8	0,282	0,165	0,01			
Вертикальный железный трубопровод	100	0,051	0,083	0,3	0,939	0,940	0,01			
Выход в дымовую трубу	100	0,051	0,083	0,3	0,939	0,940	0,01			

$$\Sigma = 0{,}40$$

Средняя температура внутри труб примем

$$\frac{500 + 100}{2} = 300° \text{ С.}$$

Средняя температура внутри сушила 75° С.

Поверхность труб

$$F = \frac{Q}{k\,(t_1 - t_2)} = \frac{\text{тыс. Кал.}}{\text{Кал.}} = \sim 56 \text{ м}^2.$$

ПРИЛОЖЕНИЯ.

Таблица значений:

$1+\alpha t$ и $\frac{1}{1+\alpha t}$

Температура в °С.	$1+\alpha t$	$\frac{1}{1+\alpha t}$	Температура в °С.	$1+\alpha t$	$\frac{1}{1+\alpha t}$
50	1,18	0,847	1300	5,76	0,173
100	1,37	0,730	1350	5,95	0,168
150	1,55	0,645	1400	6,13	0,163
200	1,73	0,578	1450	6,31	0,158
250	1,92	0,521	1500	6,49	0,154
300	2,10	0,476	1550	6,68	0,150
350	2,28	0,438	1600	6,86	0,146
400	2,47	0,405	1650	7,04	0,142
450	2,65	0,377	1700	7,23	0,138
500	2,83	0,353	1750	7,41	0,135
550	3,01	0,333	1800	7,59	0,132
600	3,20	0,312	1850	7,78	0,129
650	3,38	0,296	1900	7,96	0,126
700	3,56	0,281	1950	8,14	0,123
750	3,75	0,267	2000	8,33	0,120
800	3,93	0,254	2050	8,51	0,117
850	4,11	0,243	2100	8,69	0,115
900	4,30	0,233	2150	8,88	0,113
950	4,48	0,223	2200	9,06	0,110
1000	4,66	0,214	2250	9,24	0,108
1050	4,85	0,206	2300	9,43	0,106
1100	5,03	0,199	2350	9,61	0,104
1150	5,21	0,192	2400	9,79	0,102
1200	5,40	0,185	2450	9,97	0,100
1250	5,58	0,179	2500	10,16	0,098

Таблица средних теплоемкостей некоторых твердых тел.

(C_o^t в Кал/кг).

t° С.	Углерод амфорн.	Железо.	Чугун.	Кирпич и шлак.
350	—	0,126	0,133	0 211
400	—	0,129	0,135	0,215
450	—	0,132	0,138	0,219
500	0,268	0,136	0,143	0,222
550	0,285	0,140	0,147	226
600	0,300	0,142	0,150	0,230
650	0,313	0,146	0,154	0,234
700	0,324	0,159	0,167	0,237
750	0,333	0,168	0,176	0,241
800	0,341	0,170	0,179	0,245
850	0,348	0,170	0,179	0,249
900	0,354	0,170	0,179	0,252
950	0,359	0,169	0,179	0,256
1000	0,363	0,168	0,178	0,260
1050	0,367	0,167	0,177	0,264
1100	0,370	0,166	0,176	0,267
1150	0,373	0,167	0,177	0,271
1200	0,376	0,167	0,178	0,275
1250	0,379	0,167	—	0,279
1300	0,382	0,166	—	0,282
1350	0,385	0,166	—	0,286
1400	0,388	0,167	—	0,290
1450	0,391	0,167	—	0,294
1500	0,394	0,167	—	0,297

Теплосодержание 1 мо (гр) газа при $t°C$ (кал).

$t°$	O_2	H_2, CO, N_2	H_2O	CO_2, SO_2	CH_4	Воздух.
100°	0,693	0,673	0,810	0,912	1,038	0,677
200°	1,395	1,355	1,630	1,893	2,196	1,363
300	2,106	2,046	2,461	2,926	3,474	2,059
400	2,826	2,746	3,305	4,009	4,872	2,763
500	3,555	3,455	4,162	5,139	6,390	3,476
600	4,293	4,173	5,036	6,311	8,028	4,198
700	5,040	4,900	5,928	7,519	9,786	4,929
800	5,796	5,636	6,842	8,759	11,664	5,670
900	6,561	6,381	7,781	10,027	13,662	6,419
1000	7,335	7,135	8,750	11,317	15,780	7,177
1100	8,118	7,898	9,753	12,625	18,018	7,944
1200	8,910	8,670	10,795	13,945	20,376	8,720
1300	9,711	9,451	11,881	15,275		9,506
1400	10,521	10,241	13,019	16,607		10,300
1500	11,340	11,040	14,212	17,938		11,103
1600	12,168	11,848	15,470	19,269		11,915
1700	13,005	12,665	16,801	20,640		12,736
1800	13,851	13,491	18,209	22,014		13,567
1900	14,706	14,326	19,707	23,391		14,406
2000	15,570	15,170	21,300	24,770		15,254
2100	16,443	16,023	22,999	26,147		16,111
2200	17,325	16,885	24,816	27,526		16,977
2300	18,216	17,756	26,756	28,902		17,853
2400	19,116	18,636	28,836	30,276		18,737
2500	20,025	19,525	31,062	31,650		19,630
2600	20,943	20,423	33,436	33,033		20,532
2700	21,870	21,330	36,018	34,385		21,443
2800	22,806	22,246	38,752	35,770		22,364

Таблица теплового эффекта реакций, встречающихся в тексте.

(По проф. М. А. Павлову).

(Кал на кг-мо или кал на гр-мо).

$C_{ам}$	$+ \frac{1}{2} O_2$	$= CO$	$+ 29.430$
CO	$+ \frac{1}{2} O_2$	$= CO_2$	$+ 68.220$
$C_{ам}$	$+ O_2$	$= CO_2$	$+ 97.650$
CO_2	$+ C$	$= 2CO$	$- 38.790$
H_2	$+ \frac{1}{2} O_2$	$= H_2O_{пар}$	$+ 57.810$
H_2	$+ \frac{1}{2} O_2$	$= H_2O_{жид}$	$+ 68.360$
$H_2O_{пар}$		$= H_2O_{жид}$	$+ 10.550$
C	$+ H_2O_{пар}$	$= CO + H_2$	$- 28.380$
CO	$+ H_2O_{пар}$	$= CO_2 + H_2$	$+ 10.410$
CO	$+ H_2O_{жид}$	$= CO_2 + H_2$	$- 140$
C	$+ H_4$	$= CH_4$	$+ 20.870$
CH_4	$+ 2O_2$	$= CO_2 + 2H_2O_{пар}$	$+ 192.400$
S	$+ O_2$	$= SO_2$	$+ 69.800$
FeS	$+ S$	$= FeS_2$	$+ 16.700$
$FeS + 1{,}5O_2$	$+ SiO_2$	$= FeSiO_3 + SO_2$	$+ 127.793$
$FeS_2 + 2{,}5O_2$	$+ SiO_2$	$= FeSiO_3 + 2SO_2$	$+ 180.893.$

Опытные коэффициенты теплопередачи в формуле

$$Q = kF(t_1 - t_2).$$

Коэффициент теплопередачи k есть количество тепла (в Кал), передаваемое 1 м² поверхности стенки толщиною в 1 см в течение одного часа, при разности температур по обе стороны стенки в 1 °C.

Из воздушного пространства или дымохода в воздушное пространство через глиняную стенку	5.
Из воздушного пространства или дымохода в воздушное пространство через чугунную стенку	10—14.
Из воздушного пространства или дымохода в воду через железную стенку и обратно (паровой котел) . .	13—20.
Из парового пространства в воздух через железную стенку	11—80.
Из парового пространства в воду через железную стенку	800—1000.

1) См. К. Блахер. «Теплота в заводском деле». Изд. 1905 г., стр. 133.

Таблица коэффициентов A в формуле И. Г. Есьмана.

h_t — высота газослива (в м),

B — ширина газослива в м, Q_t — колич. газов при t °C (в м³),

E — длина газослива (в м).

$$h_t = A\sqrt[3]{\frac{Q_t^2}{B^2 t}}.$$

h_t	0,30					0,40					0,50				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
A	3,20	3,41	3,52	3,62	3,67	3,07	3,34	3,51	3,61	3,69	2,95	3,27	3,48	3,59	3,69

h_t	0,60					0,75					1,00				
E	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞	0,50	1,00	2,00	5,00	∞
A	2,75	3,20	3,45	3,59	3,69	2,71	3,06	3,36	3,56	3,69	2,43	2,95	3,28	3,52	3,70

Таблица поверхности чугунного рекуператора.

(в зависимости от температуры подогреваемого воздуха).

Температура нагретого воздуха в °C.	Нагревательная поверхность труб на 1 м³ воздуха, доставляемого в 1 мин. м²
150°	0,6 м²
250 до 300	0,75 до 1,0
300 „ 350	1,0 „ 1,5
400 „ 500	3 „ 4
„ 600	„ 5

Падение температуры в секунду в печах различного назначения.

(в °/сек).

Наименование печей.	% избытка воздуха при горении.	Падение температ. в °/сек.
Кирпичеобжигательные печи.	0 %	60—80°
Закалочные печи	0	100
Поковочные и отражательные с простыми колосниками. .	50—100	150
Печи кровельного производства.	0	200
Мартеновские печи	50	300—350

Таблица величин скоростного напора (в м),

$$h = \frac{v^2}{2g},$$

необходимого для создания скорости от 0 до 30,9 м/сек.

Скорость м/сек.	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,0000	0,0005	0,0020	0,0046	0,0082	0,013	0,018	0,025	0,033	0,041
1	0,051	0,062	0,073	0,086	0,100	0,115	0,130	0,147	0,165	0,184
2	0,204	0,225	0,247	0,270	0,294	0,318	0,345	0,372	0,400	0,429
3	0,459	0,490	0,522	0,555	0,589	0,624	0,661	0,698	0,736	0,775
4	0,816	0,857	0,899	0,924	0,987	1,03	1,08	1,13	1,17	1,22
5	1,27	1,33	1,38	1,43	1,49	1,54	1,60	1,66	1,71	1,77
6	1,83	1,90	1,96	2,02	2,09	2,15	2,22	2,29	2,36	2,43
7	2,50	2,57	2,64	2,72	2,79	2,87	2,94	3,02	3,10	3,18
8	3,26	3,34	3,43	3,51	3,60	3,68	3,77	3,86	3,95	4,04
9	4,13	4,22	4,31	4,41	4,50	4,60	4,70	4,80	4,90	5,00
10	5,10	5,20	5,30	5,41	5,51	5,62	5,73	5,84	5,95	6,06
11	6,17	6,28	6,39	6,51	6,62	6,74	6,86	6,98	7,10	7,22
12	7,34	7,46	7,59	7,71	7,84	7,96	8,09	8,22	8,35	8,48
13	8,61	8,75	8,88	9,02	9,15	9,29	9,43	9,57	9,71	9,85
14	9,99	10,13	10,28	10,42	10,57	10,72	10,86	11,01	11,16	11,32
15	11,49	11,62	11,78	11,93	12,09	12,25	12,40	12,56	12,72	12,89
16	13,05	13,21	13,38	13,54	13,71	13,88	14,05	14,22	14,39	14,56
17	14,73	14,90	15,08	15,25	15,43	15,61	15,79	15,97	16,15	16,33
18	16,51	16,70	16,88	17,07	17,26	17,44	17,63	17,82	18,01	18,21
19	18,40	18,59	18,79	18,99	19,18	19,38	19,58	19,78	19,98	20,18
20	20,39	20,59	20,80	21,00	21,21	21,42	21,63	21,84	22,05	22,26
21	22,48	22,69	22,91	23,12	23,34	23,56	23,78	24,00	24,22	24,45
22	24,67	24,89	25,12	25,35	25,57	25,80	26,03	26,26	26,50	26,73
23	26,96	27,20	27,43	27,67	27,91	28,15	28,39	28,63	28,87	29,11
24	29,36	29,60	29,85	30,10	30,35	30,60	30,85	31,10	31,35	31,60
25	31,85	32,11	32,37	32,63	32,88	33,14	33,40	33,67	33,93	34,19
26	34,46	34,72	34,99	35,26	35,52	35,79	36,06	36,34	36,61	36,88
27	37,16	37,43	37,71	37,99	38,27	38,55	38,83	39,11	39,39	39,68
28	39,96	40,25	40,53	40,82	41,11	41,40	41,69	41,98	42,28	42,57
29	42,87	43,16	43,46	43,76	44,06	44,36	44,66	44,96	45,26	45,57
30	45,87	46,18	46,49	46,80	47,10	47,41	47,73	48,04	48,35	48,67

Таблица эквивалентных весовых коэффициентов для замены одного вида топлива другим [1]).

№№ по порядку.	Наименование топлива.	Теплотвор. способн. в кал.	Условное топливо.	Донецк. к. у.	Подмоск. Бохгед.	Подмоск. курн.	Кизеловск. к. у.	Кузнецкий к. у.	Черемхов. к. у.	Челябинск. б. у.	Богословск. б. у.	Донецкий антрац.	Егоршинск. антрац.	Донецкий кокс.	Дрова с 25% вл.	Дрова с 35% вл.	Древесный уголь.	Торф с 30% вл.	Нефть.
1	Условное топливо	7.000	1	1,08	1,40	2,33	1,40	0,97	1,21	1,71	2,41	1,11	1,15	1,25	2,22	2,64	1,08	2,19	0,67
2	Донецкий к. у.	6.500	0,93	1	1,30	2,17	1,30	0,90	1,12	1,62	2,24	1,03	1,07	1,16	2,06	2,45	1,00	2,03	0,62
3	Подмосковн. бохгед.	5.000	0,71	0,77	1	1,67	1,00	0,69	0,86	1,25	1,72	0,79	0,82	0,89	1,59	1,89	0,77	1,56	0,48
4	„ курн.	3.000	0,43	0,46	0,60	1	0,60	0,42	0,52	0,75	1,03	0,48	0,49	0,54	0,95	1,13	0,46	0,94	0,29
5	Кизеловский к. у.	5.000	0,71	0,77	1,00	1,67	1	0,69	0,86	1,25	1,72	0,79	0,82	0,89	1,59	1,89	0,77	1,56	0,48
6	Кузнецкий к. у.	7.200	1,03	1,11	1,44	2,40	1,44	1	1,24	1,80	2,48	1,14	1,18	1,29	2,29	2,72	1,11	2,25	0,69
7	Черемховский. к. у.	5.800	0,83	0,89	1,16	1,93	1,16	0,81	1	1,45	2,00	0,92	0,95	1,04	1,84	2,19	0,89	1,81	0,55
8	Челябинский б. у.	4.000	0,57	0,62	0,80	1,33	0,80	0,56	0,69	1	1,38	0,63	0,66	0,71	1,27	1,51	0,62	1,25	0,38
9	Богословский б. у.	2.900	0,41	0,45	0,58	0,97	0,58	0,40	0,50	0,72	1	0,46	0,48	0,52	0,92	1,09	0,45	0,91	0,28
10	Антрацит Донец.	6.300	0,90	0,97	1,26	2,10	1,26	0,87	1,09	1,58	2,17	1	1,03	1,13	2,00	2,38	0,97	1,97	0,60
11	„ Егорш.	6.100	0,87	0,94	1,22	2,03	1,22	0,85	1,05	1,52	2,10	0,97	1	1,09	1,94	2,30	0,94	1,91	0,58
12	Кокс Донецкий	5.600	0,80	0,86	1,12	1,86	1,12	0,78	0,97	1,40	1,93	0,89	0,92	1	1,78	2,11	0,86	1,75	0,53
13	Дрова смеш. с 25% вл.	3.150	0,45	0,48	0,63	1,05	0,63	0,44	0,54	0,79	1,09	0,50	0,52	0,56	1	1,19	0,48	0,98	0,30
14	„ „ „ 35% »	2.650	0,38	0,41	0,53	0,88	0,53	0,37	0,46	0,66	0,91	0,42	0,43	0,47	0,84	1	0,41	0,83	0,25
15	Древесный уголь	6.500	0,93	1,00	1,30	2,17	1,30	0,90	1,12	1,62	2,24	1,03	1,07	1,16	2,06	2,45	1	2,03	0,62
16	Торф с 30% вл.	3.200	0,46	0,49	0,64	1,07	0,64	0,44	0,55	0,80	1,10	0,51	0,52	0,57	1,02	1,21	0,49	1	0,30
17	Нефть	10.500	1,50	1,62	2,10	3,50	2,10	1,46	1,81	2,62	3,62	1,67	1,72	1,87	3,33	3,97	1,62	3,28	1

Примечание: Теплопроизводительность каменноугольного штыба принимать в размере $^1/_2$ теплопроизводительности соответственных каменных углей.

[1]) См. «Нормы расхода топлива и смазочных материалов» изд. ГУТ'а.

Таблица для перевода дров в другие виды топлива [1]).

	Породы дров.			
	Березовые.	Смешан.	Сосновые.	Осиновые.
Вес 1 пог. сажени при длине 12 вершк. и влажности 25%, в пуд. .	69	62	59	54
Количество топлива, эквивалентное 1 пог. сажени (пуд).				
Угля условного	31,0	27,9	26,6	24,3
„ Донецкого	33,1	29,8	28,3	25,9
„ Подмосковн. богхеда	43,5	39,1	37,2	34,0
„ „ курного	72,5	65,1	62,0	56,7
„ Кизеловского	43,5	39,1	37,2	34,0
„ Кузнецкого	30,4	27,3	26,0	23,4
„ Черемховского	37,3	33,5	31,9	29,2
„ Челябинского	54,5	49,0	46,6	42,7
„ Богословского	75,2	67,6	63,8	58,9
Антрацита Донецкого	34,5	31,0	29,5	27,0
„ Егоршинского	35,9	32,2	30,7	28,1
Кокса Донецкого	39,3	35,3	33,6	30,8
Торфа с 30% влажн.	67,6	60,8	57,8	52,9
Нефти	20,7	18,6	17,7	16,2

Давление насыщенного водяного пара в кг/см².

Градусы.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,0062	0,0067	0,0072	0,0077	0,0083	0,0089	0,0095	0,0102	0,0109	0,0117
10	0,0125	0,0143	0,0143	0,0153	0,0163	0,0174	0,0185	0,0197	0,0210	0,0224
20	0,0238	0,0269	0,0269	0,0286	0,0304	0,0322	0,0342	0,0363	0,0384	0,0407
30	0,0431	0,0483	0,0483	0,0511	0,0541	0,0572	0,0604	0,0638	0,0673	0,0711
40	0,0750	0,0791	0,0834	0,0878	0,0925	0,0974	0,1026	0,1079	0,1135	0,1194
50	0,1255	0,1318	0,1385	0,1455	0,1527	0,1602	0,1681.	0,1762	0,1848	0,1936
60	0,2028	0,2124	0,2224	0,2328	0,2435	0,2547	0,2664	0,2785	0,2910	0,3040
70	0,3175	0,3315	0,3460	0,3611	0,3768	0,3929	0,4097	0,4269	0,4449	0,4635
80	0,4828	0,5027	0,5233	0,5445	0,5666	0,5894	0,6129	0,6371	0,6623	0,6881
90	0,7149	0,7425	0,7710	0,8004	0,8307	0,8620	0,8942	0,9274	0,9617	0,9970

[1]) См. «Нормы расхода топлива и смазочных материалов». Изд. ГУТ'а.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Часть V. Примеры расчетов печей.

Стр.

Глава I. Расчет кирпичеобжигательной печи . . . . . 3—8

Задание (3). Расчет топлива (3). Определение размеров печи (3). Определение расхода топлива и количества газов (4). Расчет топок (5). Расчет движения рабочих газов (5). Расчет движения отработавших газов (6). Расчет дымовой трубы (8).

Глава II. Расчет печи с рекуператором для производства кровельного железа . . . . . 9—13

Задание (9). Расчет топлива (9). Определение расхода топлива и количества газов (9). Расчет топки (11). Расчет рекуператора (11). Тепловой баланс печи (12). Определение основных размеров рабочего пространства (12). Расчет движения рабочих газов (12). Расчет движения отработавших газов (13).

Глава III. Расчет методической печи Сименса, с разделением пламени, для нагрева слитков . . . . . 14—19

Задание (14). Данные расчета генераторного газа (14). Расчет рабочего пространства печи (14). Тепловой баланс печи (16). Регенераторы (17. Расчет движения рабочих газов (18). Расчет движения отработавших газов (19). Расчет дымовой трубы (19).

Глава IV. Расчет 30-ти тонной мартеновской печи . . . . . 20—39

Рабочее пространство (20). Регенераторы (22) Газовые воздушные окна, шлаковики, каналы и проч. (31). Гидравлическая поверка печи (35). Расчет высоты дымовой трубы (37).

Стр.

Глава V. Расчет конденсатора для осушки генераторного газа . . 39—43

Состав осушенного газа (39). Определение количества воды, вступающей в брызгало (40). Определение работы трубчатого конденсатора (40). Тепловой баланс конденсатора (42). Определение размеров охлаждающих поверхностей конденсатора (42). Определение главных размеров конденсатора (42).

Глава VI. Расчет сушила многократного насыщения для сушки картофеля . . . . . 43—47

Задание (44). Данные расчета горения дров (44). Расчет сушила (44). Расчет циркуляции воздуха (45). Расчет отопительных устройств (46). Расчет движения печных газов (47).

Приложения . . . . . 49—54

Таблица значений $1+\alpha t$ и $\frac{1}{1+\alpha t}$ (49). Таблица средних теплоемкостей некоторых тел (49). Теплосодержание 1 мо газа при $t°$ С (50). Таблица теплового эффекта реакций (50). Опытные коэффициенты теплопередачи в формуле $Q = kF(t_1 - t_2)$ (50). Таблица коэффициента A в формуле И. Г. Есьмана (51). Таблица поверхности чугунного рекуператора (51). Падение температуры в сек. в печах различного назначения (51). Таблица величин скоростного напора (52). Таблица коэффициентов для замены одного вида топлива другим (53). Таблица коэффициентов для перевода дров в другие виды топлива (54). Давление насыщенного водяного пара (54).

№00755

2007089981