

П.А. АНДРЕЕВ, А.А. КАНАЕВ, Е.Д. ФЕДОРОВИЧ

ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ
ТЕПЛОНОСИТЕЛИ
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

ОУАДРОМБИР-НАТО

П. А. АНДРЕЕВ, А. А. КАНАЕВ, Е. Д. ФЕДОРОВИЧ

ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ
ТЕПЛОНОСИТЕЛИ
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Под общей редакцией А. А. Канаева



ГОСУДАРСТВЕННОЕ СОЮЗНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Ленинград

1959

В книге сжато изложены сведения (на основе иностранных данных) о свойствах жидких металлов—теплоносителей ядерных реакторов.

Рассматриваются: теплообмен (в жидкой фазе, при кипении и конденсации); взаимодействие жидких металлов с конструкционными материалами; методы очистки жидких металлов от примесей; особенности конструкций оборудования и эксплуатации установок с жидкометаллическими теплоносителями.

Во введении формулируются требования к теплоносителям ядерных реакторов и пути повышения эффективности атомосиловых установок при использовании жидкометаллических теплоносителей.

В заключении дается краткий обзор некоторых отечественных исследований по жидким металлам.

Книга предназначена для инженерно-технических работников заводов и проектных организаций, в том числе судостроительной промышленности, а также для студентов энергетических и судостроительных вузов и техникумов.

АНДРЕЕВ ПАВЕЛ АЛЕКСЕЕВИЧ, КАНАЕВ АНДРЕЙ АНДРЕЕВИЧ,
ФЕДОРОВИЧ ЕВГЕНИЙ ДАНИЛОВИЧ

ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ТЕПЛОНОСИТЕЛИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

Научный редактор С. А. Сердюкова

Редактор Е. Н. Шаурак

Технический редактор Н. В. Эрстова Корректоры: А. Ф. Андрианова и
Е. В. Кирдан

Сдано в набор 19/XI 1958 г.

Подписано к печати 6/IV 1959 г.

Формат бумаги 60х92 1/16.

Физ. п. л. 24.

Усл. п. л. 24.

Уч. изд. л. 25,7

Изд. № 625—59.

М. 05280.

Тираж 4000 экз.

Цена 14 руб. 35 коп.

Заказ № 356

Судпромгиз, Ленинград, ул. Дзержинского, 10

Типография № 6 УПП Ленсовнархоза, Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

ОТ АВТОРОВ

Жидкометаллические теплоносители находят все большее распространение в атомной энергетике.

Опубликовано большое количество статей в иностранных журналах и монографиях, посвященных исследованиям свойств жидкометаллических теплоносителей и их применению в ядерных реакторах. Многие из этих иностранных исследований неизвестны широкому кругу советских читателей.

Составляя настоящую монографию, авторы ставили своей задачей в сжатом виде изложить результаты наиболее важных иностранных исследований в главных аспектах использования жидкометаллических теплоносителей в ядерной энергетике (разделы I и II).

Значительная часть иностранных исследований по жидким металлам опубликована в изданном в США справочнике по жидким металлам (Liquid Metals Handbook). В тех случаях, когда в тексте монографии даны ссылки на источники для физических констант и других величин, это означает, что они приводятся по указанному справочнику.

Во введении дается краткий обзор современного состояния ядерной энергетики и описываются преимущества и недостатки жидкометаллических теплоносителей по сравнению с другими теплоносителями ядерных энергетических установок.

Раздел III посвящен краткому обзору некоторых советских исследований жидкометаллических теплоносителей. Полное изложение отечественных исследований в данной области является самостоятельной темой.

Авторы выражают благодарность проф., докт. техн. наук А. Ф. Алабышеву и А. В. Алькимовичу за ценные советы, данные ими при просмотре рукописи, а также Н. Н. Евдокимовой за помощь в техническом оформлении иллюстраций.

Авторы будут признательны за критические замечания и пожелания, направленные на улучшение книги.

Основные жидкотеплоносители

Металл	Свойства						
	Атом- ный вес	Атом- ный номер	Точка плав- ления, °С	Точка кипения, °С ($p = 1 \text{ атм}$)	Теплопро- водность при 400° С, ккал/м час °С	Тепло- емкость при 400° С, ккал/кг°С	Удель- ный вес при 400° С, кг/м ³
Натрий Na	22,997	11	97,8	883	61,3	0,3055	854
Калий K	39,096	19	63,7	760	34,4	0,1826	747
Сплав натрий- калий (эвтектика) Na — K (77% K)	—	—	—12,3	784	22,9	0,210	775
Литий Li	6,940	3	186	1317	32,4	1,0	790
Галлий Ga	69,72	31	29,8	1983	25,2	0,082	5845
Ртуть Hg	200,61	80	—38,87	357	10,9	0,0324	12640
Олово Sn	118,70	50	231,9	2270	28,4	0,0580	6835
Свинец Pb	207,21	82	327,4	1737	13,7	0,0370	10510
Висмут Bi	209,00	83	271,0	1477	13,3	0,0354	9910
Сплав свинец- висмут (эвтектика) Pb — Bi (56,5% Bi)	—	—	125	1670	9,74	0,035	10180

ВВЕДЕНИЕ

Масштабы и темпы развития атомной энергетики зависят от эксплуатационной надежности и экономичности реакторов и энергетических агрегатов. Эксплуатационные и экономические показатели оборудования атомных силовых установок в значительной мере определяются выбором теплоносителя, влияющего на конструкцию реактора и силовых агрегатов, а также на их технико-экономические характеристики.

Идеальный теплоноситель должен обладать высокой теплоемкостью и теплопроводностью, малой вязкостью и незначительным поперечным сечением захвата нейтронов; он должен быть химически стабилен в диапазоне рабочих температур при воздействии нейтронного поля, а возникающая радиоактивность — слабой и кратковременной. Теплоноситель должен быть химически неактивен в отношении корпуса реактора и делящегося материала или материала оболочки тепловыделяющих элементов, а также не быть дефицитным материалом.

Ни один из используемых в настоящее время теплоносителей не отвечает всем этим требованиям. При проектировании атомной установки приходится принимать компромиссное решение, выбирая теплоноситель по его положительным свойствам.

Например, принимая воду в качестве теплоносителя и замедлителя нейтронов в водородном реакторе, учитывают сравнительно компактность реактора, неограниченные запасы воды и ее невысокую стоимость с учетом затрат на химическое обессоливание, а также удовлетворительные характеристики теплообмена.

Между тем, отрицательные свойства воды как теплоносителя ухудшают технико-экономические показатели установки. Вследствие низкой температуры кипения воды даже при умеренной температуре теплоносителя на выходе из реактора (около 300° C) требуется давление в корпусе около 100 атм. Низкая температура воды на выходе из реактора обуславливает низкие параметры пара, получаемого в парогенераторе, и в результате низкий к. п. д. установки.

Высокое давление воды приводит к большой толщине корпуса и к его большому весу, что нежелательно для транспортных уста-

новок. Разрыв корпуса такого реактора приводит к серьезным последствиям, так как большое количество активной воды превращается в пар, а затем конденсируется на огромных площадях. Эта опасность значительно увеличивается в случае гомогенных реакторов, где в водном растворе горячего содержится продукты деления.

Радиолизитическое разложение воды и рекомбинация молекул водорода и кислорода требуют мер по удалению гремучей смеси. Коррозионные свойства воды обуславливают необходимость облицовки корпуса реактора нержавеющей сталью.

Органические соединения в качестве теплоносителей имеют преимущества перед водой: более высокую температуру кипения при атмосферном давлении и сравнительно низкое давление пара при температуре 300—350°С, что облегчает корпус реактора. Однако под действием излучения в активной зоне органические теплоносители подвергаются полимеризации с изменением некоторых физических свойств, а при более высоких температурах эти соединения подвергаются термическому разложению. Для отвода продуктов полимеризации требуется дополнительное оборудование, усложняющее эксплуатацию установок.

Жидкометаллические теплоносители даже при атмосферном давлении имеют высокую температуру кипения. Так, температура кипения натрия составляет 883°С. Это позволяет получать во втором контуре атомной установки пар высоких параметров или газ с высокой температурой при соответствующем давлении. В результате ядерные установки с жидкометаллическими теплоносителями как паротурбинные, так и газотурбинные могут иметь высокий к. п. д.

Жидкие металлы представляются в настоящее время единственными возможными охладителями для реакторов на быстрых нейтронах, так как использование газов исключается из-за невозможности обеспечения очень большой тепловой нагрузки объема или поверхности, а применение воды исключается вследствие ее замедляющего действия.

Вместе с тем жидкие металлы имеют и отрицательные свойства — химическое взаимодействие с водой и воспламеняемость у натрия и калия, токсичность и большое поперечное сечение поглощения тепловых нейтронов у ртути, большая затрата энергии на циркуляцию у свинца и висмута и т. д.

Выбор коррозионноустойчивых конструкционных материалов и защита теплоносителя от окисления являются важнейшими инженерными проблемами при проектировании жидкометаллических систем.

Как показано ниже, наиболее перспективными с точки зрения повышения к. п. д. атомных установок теплоносителями являются жидкие металлы и газы. Это позволяет мириться с недостатками жидкометаллических теплоносителей. Особо важные преимущества жидкометаллических теплоносителей имеют в реакторных

установках на быстрых и промежуточных нейтронах, а также в реакторах с жидкометаллическим топливом.

Приводимый краткий обзор тенденций развития атомной энергетики, схем и конструкций стационарных и транспортных установок на ядерном топливе имеет целью показать место реакторов с жидкометаллическими теплоносителями и их технико-экономические преимущества наряду со специфическими недостатками.

1. Атомные электростанции

Планы строительства. К 2000 г. ожидается увеличение мировой выработки электроэнергии в 4—5 раз по сравнению с уровнем 1955 г., когда производство электроэнергии достигло 1500 млрд. кат-ч. Для производства 6000 млрд. кат-ч в год потребуется около 2200 млн. тонн в год условного топлива.

Уже в настоящее время в большинстве стран увеличение производства электроэнергии лимитируется недостаточными темпами строительства шахт и роста добычи угля. Мировые запасы органического топлива ограничены и составляют в тоннах условного топлива:

Каменный уголь	2,6 · 10 ¹²
Нефть	0,27 · 10 ¹²
Природный газ	0,02 · 10 ¹²
Всего	2,89 · 10 ¹²

Запасы ядерного топлива оцениваются в пересчете на условное топливо цифрами (в тоннах):

Уран	61,5 · 10 ¹²
Торий	2,5 · 10 ¹²
Всего	64 · 10 ¹²

Следовательно, запасы ядерного топлива в 22 раза превышают запасы органического топлива. Существующие в настоящее время типы реакторов не позволяют достигать большой глубины выгорания урана и из указанного теплового эквивалента запасов урана и тория может быть реализована только незначительная часть. Лишь при освоении регулируемых термоядерных реакторов энергетические ресурсы станут неограниченными. Однако при указанных затруднениях с ростом добычи органического топлива на ближайший период для ряда стран единственной базой для увеличения производства электроэнергии является ядерное топливо. К таким странам относится Англия, где к 1965 г. предполагается довести мощность атомных электростанций до 6 млн. кат, а к 1975 г. — до 35 млн. кат.

Пионером строительства атомных электростанций является СССР, где с июня 1954 г. успешно эксплуатируется первая в мире атомная электростанция мощностью 5000 кат.

На мировой энергетической конференции в Белграде (1957 г.) советская делегация доложила о планах развития атомной энергетики в *Советском Союзе*. Энергетические ресурсы СССР оцениваются следующими цифрами в миллиардах тонн условного топлива:

Уголь	197,4
Торф	22,8
Сланцы	5,75
Всего	225,95

С учетом располагаемой энергии крупных рек суммарные энергетические ресурсы составляют 625,95 млрд. т условного топлива, не считая запасов нефти и природного газа.

Атомные электростанции, сооружаемые в ближайшие годы, будут иметь реакторы с электрической мощностью до 200—210 тыс. *квт*. Так, на одной из строящихся электростанций будет установлено два реактора мощностью по 210 тыс. *квт*, каждый из которых даст тепло для питания паром трех паровых турбин по 70 тыс. *квт*. На другой электростанции два реактора будут обеспечивать общую мощность паровых турбин 400 тыс. *квт*. Предполагается соорудить четыре опытных реактора электрической мощностью от 5 до 50 тыс. *квт*.

Опыт эксплуатации мощных атомных электростанций и опытных реакторов позволит выбрать наиболее надежные и экономичные типы реакторных установок для дальнейшего развития атомной энергетики СССР.

Стоимость киловатт-часа электроэнергии на атомных электростанциях будет ниже, чем на угольных.

В настоящее время в *Англии* эксплуатируется первая очередь атомной электростанции Колдер Холл мощностью 92 тыс. *квт* с двумя реакторами.

Строятся и более мощные электростанции. Принято решение о строительстве двух атомных электростанций мощностью по 500 тыс. *квт*.

В Даури (Шотландия) заканчивается строительство атомной электростанции с опытным реактором на быстрых нейтронах тепловой мощностью 60 тыс. *квт*. В качестве теплоносителя принят натрий с небольшой присадкой калия для понижения температуры застывания. Активная зона реактора имеет диаметр 0,6 м и высоту 0,6 м. Двадцать параллельных петель теплообменника первичного контура отводят тепло из активной зоны и четыре — из зоны воспроизводства. От теплоносителя вторичного контура (Na или NaK) тепло передается к парогенератору, питающему паровую турбину. Высокая температура натрия обеспечивает эффективный цикл перегретого пара.

В реакторе на быстрых нейтронах с малыми размерами активной зоны требуется высокая эффективность теплообмена. Реактор такого типа не требует большого запаса реактивности (1—1,5%

против 9—10% у реакторов с водяным замедлителем). Имеется опасность взрыва реактора, если нарушится система охлаждения и расплавленный уран соберется в корпусе в количестве, превышающем критическую массу. В целях безопасности при утечке натрия реакторная установка заключена в сферический стальной контейнер.

По английским данным, себестоимость киловатт-часа отпущаемой с атомных электростанций энергии складывается из следующих расходов:

Амортизационные начисления (5% за 20 лет)	0,37 пенса/квт-час
Начисления на начальную загрузку урана	0,06 "
Расходы на замену выгоревшего урана (2000 фн. ст./кг)	0,24 "
Эксплуатационные расходы	0,06 "
Итого . . .	0,73 пенса/квт-час
Прибыль за полученный плутоний	0,07 "
Стоимость нетто . . .	0,66 пенса/квт-час

На английских угольных электростанциях себестоимость киловатт-часа близка к 0,7 пенса.

Предполагается, что на угольных электростанциях стоимость 1 *квт-ч* будет возрастать, достигая величин: в 1970 г. — 0,67 пенса; в 1980 г. — 0,73 пенса; в 1990 г. — 0,84 пенса.

Наоборот, на атомных электростанциях себестоимость 1 *квт-ч* будет снижаться из года в год:

Составляющая стоимости 1 <i>квт-ч</i> в пенсах	Год			
	1960	1970	1980	1990
Амортизационные начисления	0,37	0,30	0,26	0,22
Начисления на загрузку урана	0,06	0,04	0,03	0,02
Расходы на замену выгоревшего урана	0,24	0,13	0,08	0,03
Эксплуатационные расходы	0,06	0,05	0,04	0,03
Итого	0,73	0,52	0,41	0,33
Прибыль за полученный плутоний	—0,07	—0,05	—0,03	—0,01
Стоимость нетто	0,66	0,47	0,38	0,32

Указанное снижение стоимости 1 *квт-ч* на атомных электростанциях будет достигнуто снижением стоимости оборудования и стоимости урана.

В США в 1962 г. предполагается построить атомные электростанции общей мощностью 1 млн. *квт*, к 1965 г. до 3—4 млн. *квт*

и к 1975 г. до 50—75 млн. *квт.*, с ежегодным вводом 8—12 млн. *квт.* Первая в США атомная электростанция Шиппингпорт мощностью 60 тыс. *квт.* введена в эксплуатацию в 1958 г. Реактор ее достиг критичности в декабре 1957 г.

Во Франции к 1975 г. удельный вес атомных электростанций в производстве электроэнергии достигнет 15—35%. Первая атомная электростанция в Марколе будет иметь мощность 30 тыс. *квт.*, вторая в Авуане — 60 тыс. *квт.* Далее ежегодно будет вводиться в эксплуатацию по одной атомной электростанции, причем мощность их будет постепенно увеличиваться.

В ФРГ к 1965 г. намечается построить 3—4 атомных электростанции общей мощностью 500 тыс. *квт.*

В Швеции к 1960 г. планируется постройка атомных электростанций «Адам» мощностью 60 тыс. *квт.* для теплоснабжения и «Ева» мощностью 100 тыс. *квт.* для производства электроэнергии. К 1965 г. ожидается довести мощность атомных электростанций до 800—1000 тыс. *квт.*, к 1970 г. до 3—6 млн. *квт.* и к 1975 г. до 6—12 млн. *квт.* Стоимость электроэнергии на атомных электростанциях будет в два раза ниже, чем на угольных, и равна стоимости на гидроэлектростанциях.

Норвегия, Финляндия, Дания совместно со Швецией планируют строительство атомных электростанций. В Норвегии и Финляндии будут построены реакторы для производства пара на технологические нужды.

В Бельгии в 1962—1967 гг. предполагается строительство четырех атомных электростанций общей мощностью 500—600 тыс. *квт.* с выработкой на них 15% общего количества электроэнергии.

В Швейцарии, Испании и других европейских странах также разрабатываются планы строительства атомных электростанций.

Япония закупила в Англии оборудование для атомной электростанции типа Колдер Холл мощностью 140 тыс. *квт.*, а в США — оборудование электростанции типа Шиппингпорт мощностью 134 тыс. *квт.* Разрабатываются собственные конструкции реакторов. К 1965 г. мощность атомных электростанций предполагается довести до 450 тыс. *квт.*

В Канаде планируется пуск атомной электростанции мощностью 10—20 тыс. *квт.*, а затем мощностью 100 тыс. *квт.* К 1975 г. на атомных электростанциях намечается вырабатывать 15% общего количества электроэнергии.

Оборудование атомных электростанций. На атомной электростанции АН СССР установлен урано-графитовый реактор на тепловых нейтронах с водяным охлаждением при давлении 100 *атм.* В теплообменниках вырабатывается пар 12,5 *атм.*, 260° С. Топливом служит уран, обогащенный до 5% по изотопу U-235.

В сентябре 1958 г. вступила в эксплуатацию первая очередь второй советской атомной электростанции мощностью 100 *мвт.* Полная мощность ее будет 600 *мвт.*, т. е. это будет самая крупная из строящихся в мире атомных электростанций. Реакторы

электростанции работают на тепловых нейтронах с графитовым замедлителем и водяным охлаждением.

На строящейся электростанции 420 *мвт* устанавливаются два реактора электрической мощностью по 210 *мвт.* Тепловая схема блока электростанции показана на рис. 1. Тепловая мощность реактора — 760 *мвт.* Расход воды через реактор 31 500 $\text{м}^3/\text{час}$ при температуре на входе 250° С, на выходе 275° С и давлении 105 *атм.* Вода подается шестью циркуляционными насосами бескапельного типа.

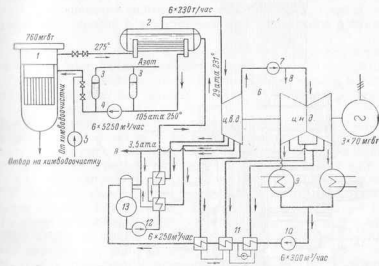


Рис. 1. Тепловая схема блока 210 *мвт* атомной электростанции мощностью 420 *мвт.*

1 — реактор; 2 — парогенератор; 3 — компенсатор объема; 4 — циркуляционный насос; 6 — подпиточный насос; 6 — паровая турбина; 7 — сепаратор влаги; 8 — пар в подогреватели сетевой воды; 9 — конденсатор; 10 — конденсатный насос; 11 — регенеративные подогреватели; 12 — питательный насос; 13 — деаэратор.

От каждого реактора вода с температурой 275° С поступает к шести парогенераторам производительностью по 230 $\text{т}/\text{час}$ сухого насыщенного пара 32 *атм.*, 235° С. Парогенераторы — горизонтальные с U-образными трубками. Каждые два парогенератора питают паром двухкорпусную турбину мощностью 70 *мвт* с промежуточной сепарацией пара между ц. в. д. и ц. н. д.

Разрез реактора этой электростанции показан на рис. 2. Теплообменные элементы из двуокиси урана размещены в активной зоне диаметром 3 м и высотой 2,5 м. Сменная корзина вмещает 349 шестигранных топливных кассет, размещенных по треугольной решетке с шагом 147 мм. Кассеты длиной 3,2 м изготовлены из циркониевых труб толщиной 2 мм; шестигранник вписан в окружность диаметром 165 мм.

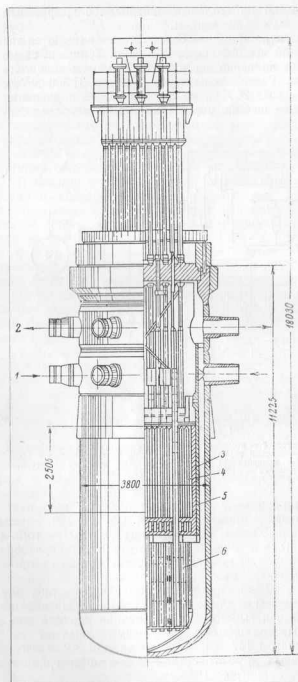


Рис. 2. Реактор с водой под давлением и качестве замедлителя и теплоносителя.

1 — вход воды; 2 — выход воды; 3 — съемная корзина; 4 — кассеты топливных элементов; 5 — шахта активной зоны; 6 — компенсирующие кассеты.

Корпус реактора диаметром 3,8 м и высотой около 12 м имеет толщину 100 мм в нижней части и 180 мм в верхней части, к которой примыкает плоская съемная крышка. Корпус изготовлен из теплоустойчивой стали с пределом текучести 50 кг/мм² при 325°С. Вес корпуса без крышки 170 т, общий вес сухого реактора 420 т.

Загрузка урана — 17 т двуокиси природного урана и 23 т двуокиси урана, обогащенного до 1,5%. Корпус защищен от действия нейтронов стальным экраном толщиной 40—90 мм и слоем воды 200 мм.

Реактор регулируется компенсирующими кассетами, содержащими поглощающий нейтроны материал. Имеются шесть кассет аварийной защиты и два стержня автоматического регулирования.

В турбину пар поступает с давлением 29 атм и перед переходом в ц. н. д. при 2,2 атм осушается в жалюзийном сепараторе.

Общий к. п. д. электростанции брутто 27,5%. Расход электроэнергии на собственные нужды 7,45%. Пуск электростанции в эксплуатацию ожидается в 1960 г.

Для второй мощной атомной электростанции (400 мвт) выбран уран-графитовый реактор. Нагретая в реакторе вода будет отдавать тепло в парогенераторе, образуя пар при давлении 90 атм. Далее пар будет перегреваться до 500°С в специальных каналах реактора. На станции будут установлены турбины мощностью по 100 мвт на стандартные параметры пара 90 атм, 500°С. Загрузка топлива 185 т урана, обогащенного до 1,2%.

Намечена постройка четырех опытных реакторов, в том числе реактора кипящего типа тепловой мощностью 300 мвт, производящего пар для турбины 50 мвт.

Реактор с графитовым замедлителем, охлаждаемый жидким натрием, рассчитан на тепловую мощность 150—180 мвт. В теплообменнике третьего контура вырабатывается пар 100 атм, 500—510°С, идущий к турбине 50 мвт.

Следующий опытный реактор тепловой мощностью 200 мвт предназначен для работы с воспроизводством плутония-239 из урана-238. Пар используется в турбине 50 мвт. Охлаждающая среда — натрий. В теплообменнике будет получаться пар 90 атм, 500°С.

Четвертый реактор — гомогенный с тяжелой водой в качестве замедлителя и раствором урановых солей в тяжелой воде в качестве топлива или взвесью порошка урана и тория. Из тория-232 будет осуществляться воспроизводство урана-233. Тепловая мощность реактора 25—35 мвт.

На первой английской атомной электростанции Колдер Холл установлены уран-графитовые реакторы, охлаждаемые CO₂, тепловой мощностью по 180 мвт.

Графитовая кладка реактора выполнена в виде 24-гранной призмы поперечником 11,9 м, высотой 8,23 м, весом 1146 т. В ней размещено 1696 вертикальных топливных каналов, сгруппи-

рованных по 16 штук. Графитовая кладка заключена в стальную оболочку, через отверстия которой проходит 0,5% расхода CO_2 для охлаждения стального корпуса.

Топливные элементы из природного урана длиной 1020 мм, диаметром 29,2 мм заключены в оболочку из магниевого сплава, имеющую поперечные ребра для улучшения теплопередачи. Тепло-

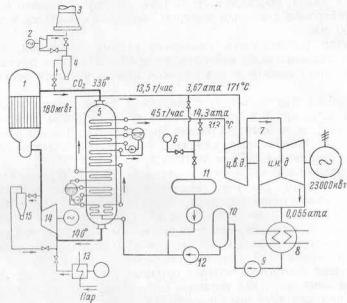


Рис. 3. Тепловая схема атомной электростанции Колдер Холл.

1 — реактор; 2 — выкаuger для отсоса CO_2 ; 3 — труба для отвода водорода CO_2 ; 4 — фильтр для выброса CO_2 при остановке; 5 — теплообменник; 6 — атмосферный клапан; 7 — турбогенератор; 8 — конденсатор; 9 — конденсатный насос; 10 — выкаuger; 11 — резервуарный конденсатор; 12 — питательный насос; 13 — бак жидкого CO_2 и испаритель; 14 — газодувка; 15 — фильтры для улавливания радиоактивных веществ.

вая защита выполнена из стальных плит толщиной 102 мм, биологическая защита — бетон толщиной 2,14 м.

Тепловая схема атомной электростанции Колдер Холл показана на рис. 3.

Углекислый газ подается в реактор с помощью четырех газодувок производительностью 227 кг/сек при мощности привода 1542 л.с. Уплотнение вала газодувки достигается контактом плавающего кольца с плоскостью торца втулки на валу машины; на поверхность контакта подается масло.

Углекислый газ из реактора поступает к четырем теплообменникам, расположенным в корпусе высотой 23,6 м с внутренним диаметром 5,28 м. В каждом корпусе расположены парогенераторы производительностью 45 т/час при 14,3 атм, 313°С и 13,5 т/час при 3,67 атм, 171°С.

Каждая пара парогенераторов питает турбины мощностью 46 мвт. В п. в. д. пар 14,3 атм срабатывается до 3,67 атм и смешивается с паром из парогенератора низкого давления, проходит через последние ступени п. в. д., а затем через двухпоточный п. в. д.

К. п. д. станции нетто равен 21—22%; при введении регенерации он может быть повышен до 25—26%.

Более мощные английские атомные электростанции проектируются также с графитовыми реакторами на природном уране и с газовым охлаждением.

Основные характеристики английских атомных электростанций, на которых устанавливаются графитовые реакторы с газовым охлаждением

Электростанция	Число реакторов	Мощность турбогенераторов, мвт	Загрузка урана на реактор, т	Давление CO_2 , кг/см ²	Общая мощность, мвт	Год окончания строительства
Колдер Холл	4	8×23	130	7	184	1958
Беркли	2	4×80	240	8,8	320	1960
Брэдуэл	2	6×52	250	10,6	312	1960
Хантерстон	2	6×60	251	10,6	360	1961
Хинкли Пойнт	2	6×93,5	300—400	12—12,5	560	1962

Реактор электростанции Брэдуэл имеет тепловую мощность около 525 мвт. В его активной зоне диаметром 15,2 м и высотой 9,15 м имеется 3000 каналов, в которых размещены урановые стержни диаметром около 25 мм в оболочках из магниевого сплава. Максимальная температура на поверхности топливных элементов 425°С, максимальная температура углекислого газа 380°С. Циркуляция CO_2 осуществляется с помощью шести газодувок. Мощность привода каждой газодувки 3000 л.с.

Графитовая кладка заключена в стальной сферический корпус диаметром 21,4 м с толщиной стенки 76 мм. Вес активной зоны — 2000 т.

Толщина биологической защиты (бетон) — 2,75 м. Расчетное выгорание урана 3000 мвт·дней/т.

Реактор электростанции Хинкли Пойнт (рис. 4) рассчитан на тепловую мощность 980 мвт. Графитовая кладка имеет форму 24-гранной призмы. Диаметр сферического корпуса 20,5 м, толщина стенки 76 мм, вес 1700 т. Тепло из реактора отводится углекислым газом в шесть парогенераторов двойного давления. Мощность привода газодувок 20—30 мвт.

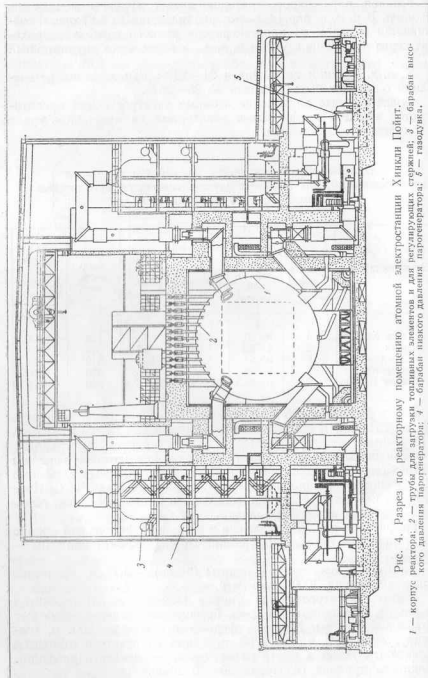


Рис. 4. Разрез по реакторному помещению атомной электростанции Хинкли Пойнт.
1 — корпус реактора, 2 — трубы для загрузки топливных элементов и для регулирующих стержней, 3 — барабан высокого давления парогенератора, 4 — барабан низкого давления парогенератора, 5 — газодувка, 6 — газодувка.

К. п. д. электростанции Хинкли Пойнт 26%, стоимость установленного киловатта — 120 *фн. ст.*, стоимость 1 *квт-часа* — 0,65 пенса.

На последующих электростанциях применение оболочек топливных элементов из бериллия позволит повысить температуру газа на выходе из реактора. Проектируется опытный реактор, в котором топливом будет служить торий и уран-233.

Реактор первой в США атомной электростанции Шиппингпорт и советский реактор (рис. 2) близки по конструкции. Тепловая мощность американского реактора — 231 *мвт*, мощность турбины — 60 *мвт*. Вода циркулирует под давлением 140 *атм* с температурой на входе 264° С и на выходе 283° С. Расход воды равен 14 000 *м³/час* и обеспечивается четырьмя циркуляционными насосами с мощностью привода по 1200 *квт*.

Корпус реактора высотой 9,5 м и диаметром 2,75 м изготовлен из углеродистой стали толщиной 216 мм. Вес корпуса — 230 *т*. Для защиты от коррозии корпус облицован изнутри листами нержавеющей стали толщиной 6,3 мм. Снаружи корпус покрыт тепловой изоляцией толщиной 100 мм из спрессованного стеклянного волокна.

Активная зона имеет форму цилиндра высотой и диаметром 1,83 м. Тепловыделяющие элементы размещены внутри тонкостенного цилиндра диаметром 2,4 м из нержавеющей стали, опирающегося на стальную нижнюю решетку. Толстостенный наружный корпус защищен от радиации двумя концентрическими стальными экранами.

Часть топливных элементов выполнена из вертикальных параллельных пластин толщиной 2 мм из сплава урана с цирконием с зазором 2 мм, установленных в квадратных циркониевых коробках. Степень обогащения урана — более 50%. Четыре коробки сварены в секции с зазором крестовидной формы, в котором может перемещаться крестовидный регулирующий стержень из гафния. Количество урана-235 в этих элементах составляет 52 кг.

Другая часть топливных элементов состоит из циркониевых трубок диаметром 10,5 мм с толщиной стенок 0,7 мм, заполненных окисью природного урана общим количеством 11 *т*. Пучки по 100 трубок приварены к циркониевым пластинам квадратной формы и образуют секцию высотой 250 мм. По высоте активной зоны 1,83 м между верхней и нижней решетками размещается по 7 таких секций.

В четырех теплообменниках вырабатывается 447 *т/час* насыщенного пара 40 *атм*, 254° С. В ц. в. д. турбины пар расширяется до 3,16 *атм*, приобретая влажность 11,6%. Влага улавливается в центробежном сепараторе, откуда пар идет в ц. н. д. с влажностью 1%. При расширении в ц. н. д. до 0,05 *атм* конечная влажность пара получается 12—13%.

Расчетный к. п. д. станции Шиппингпорт равен 26,5% без регенерации и 29,5% при наличии регенерации.

Проектная стоимость станции — 180 долл./квт, стоимость 1 квт-час — 0,4 цента.

На второй строящейся в США атомной электростанции Индиана Поинт мощностью 236 мвт только 140 мвт энергии получается за счет ядерного топлива, а остальные 96 мвт добавляются в пароперегревателе с мазутной топкой. Реактор этой электростанции того же типа, что и в Шиппингпорте.

В теплообменниках вырабатывается 860 т/час насыщенного пара 29,4 ага, 230° С, который далее перегревается до 535° С, к. п. д. станции 31,8%.

Такая комбинация ядерного и органического топлива не является удачной. Более прогрессивное решение найдено на упомянутой советской электростанции, где перегрев пара осуществляется в каналах реактора.

Из рассмотренных примеров видно, что реакторы, охлаждаемые водой под давлением, позволяют получить к. п. д. станции 20—26%. При перегреве пара в некоторой части каналов реактора к. п. д. может быть увеличен до 28—30%. Более перспективны в отношении дальнейшего повышения к. п. д. атомных электростанций реакторы, охлаждаемые жидкостями с высокой температурой кипения, так как в них при температуре теплоносителя на выходе до 400° С или выше корпус не подвергается давлению 100—150 ага. К таким высокотемпературным жидкостям относятся расплавленные металлы, сплавы металлов (натрий, натрий — калий, висмут — ртуть) или органические соединения (дифенил, дифенилоксид, терфенилы).

Физические свойства некоторых органических теплоносителей даны в следующей таблице.

Физические свойства	Теплоносители				
	дифенил	смесь изомеров терфе- нила	о-тер- фенил	m-тер- фенил	p-тер- фенил
Температура плавления, °С	69	60—145	50—55	75—85	200—215
Температура кипения, °С	255	364—418	330—344	368—378	381—388
Давление пара в ага при 325° С	3,7	0,4	0,8	0,4	0,3
при 425° С	15	2	3,4	2,0	1,5

В США строится экспериментальный реактор тепловой мощностью 45 мвт и электрической мощностью 12,5 мвт, в котором замедлителем и теплоносителем служит дифенил. В активной зоне диаметром 1,4 м и высотой 2 м размещено 138 пакетов топлив-

ных элементов квадратного сечения. В пакете содержится 10 урановых пластин в алюминиевой оболочке. Обогащение урана 1,8%.

Дифенил залит в тонкостенный бак. Вокруг активной зоны установлен лист углеродистой стали толщиной 150 мм, служащий защитой от тепловых нейтронов. Максимальная температура на поверхности топливных элементов 339° С, в центре 482° С. Реактор рассчитан на выгорание урана 3000—4000 мвт-дней/т.

Дифенил в количестве 3000 т/час протекает по каналам активной зоны сверху вниз при давлении 3,5 ага, нагреваясь до 325° С и далее отдавая тепло в двух теплообменниках, где образуется водяной пар 29 ага, 280° С, в количестве 37 т/час в каждом.

При указанных параметрах пара к. п. д. станции примерно такой же, как на станции Шиппингпорт (с реактором, охлаждаемым водой под давлением 140 ага).

Органические теплоносители позволяют несколько повысить к. п. д. по сравнению с водой. Основное же их преимущество — низкое давление при более высокой, чем в водяных реакторах, выходной температуре, что уменьшает толщину и вес корпуса реактора. Недостаток органических теплоносителей состоит в малой термической стойкости. У большинства органических соединений при температуре выше 350—400° С начинается интенсивное термическое разложение, продукты которого (смолы) ухудшают теплообмен и могут закупорить топливные каналы. Специальные устройства для удаления продуктов полимеризации (высокомолекулярных соединений) усложняют эксплуатацию и удорожают установку.

В США организовано производство органического замедлителя — изопропилдифенила. В экспериментальном реакторе применен твердый замедлитель — полиэтилен. Композиции из свинца и полиэтилена используются в защите некоторых судовых реакторов.

Более перспективны жидкометаллические теплоносители, в первую очередь натрий, калий и их сплавы. Отрицательные свойства этих металлов — взрывоопасность, пожароопасность, возможность образования продуктов химических реакций, а также необходимость обогрева контура циркуляции, так как при комнатной температуре Na и K застывают.

Висмут и сплав свинца с висмутом взрывобезопасны и пожаробезопасны, но требуют большего расхода энергии на циркуляцию и вызывают более интенсивный эрозийный износ контура циркуляции.

В нескольких странах строятся опытные реакторы с графитовым замедлителем, охлаждаемые натрием. По сравнению с газом натрий обеспечивает более высокий теплосъем с единицы веса урана. Жидкий натрий взаимодействует с графитом и ухудшает его замедляющие свойства. Поэтому графит защищают от контакта с натрием оболочкой из металла, слабо поглощающего нейтроны (например, циркония). Наличие в активной зоне металла оболочек

графита ухудшает баланс нейтронов и приводит к необходимости применения обогащенного урана. В этом состоит недостаток натриевого реактора по сравнению с газовым.

В апреле 1957 г. в США пущен экспериментальный графито-натриевый реактор тепловой мощностью 20 000 *квт*, являющийся прототипом энергетического реактора большой мощности. Активная зона и отражатель заключены в стальной корпус диаметром 3,36 м и высотой 3,8 м. Графитовый замедлитель состоит из 119 шестигранных колонн, расположенных по треугольной решетке с шагом 283 мм. Высота призмы 3,05 м, из которых 1,83 м приходится на долю активной зоны и по 0,61 м — на долю торцевых отражателей. Для защиты от воздействия натрия графитовые призмы заключены в циркониевые оболочки толщиной 0,84 мм. В центре колонны расположена циркониевая труба внутренним диаметром 67 мм с толщиной стенки 0,84 мм. Тепловыделяющие секции высотой 1,83 м размещаются внутри циркониевых труб и состоят из 7 элементов, набираемых из блоков длиной по 150 мм. Урановые блоки диаметром 19 мм заключены в трубки из нержавеющей стали толщиной 0,25 мм. Между блоком и трубкой в кольцевой зазор 0,25 мм заливается сплав Na — K, служащий для обеспечения термического контакта. Концы трубок заполнены гелием, компенсирующим термическое расширение сплава Na — K.

Между тепловыделяющими элементами каждой секции установлены дистанционирующие спирали из нержавеющей проволоки.

Натрий протекает снизу вверх внутри циркониевых труб, омывая тепловыделяющие элементы, и нагревается с 260 до 516° С. Максимальная температура в центре тепловыделяющих элементов не должна превышать 650° С. Степень обогащения урана по изотопу-235 около 3%. Натрий также охлаждает оболочку графитовых колонн. Реактивность регулируется с помощью четырех стержней, содержащих боро-никелевый сплав.

Применение натрий-графитовых реакторов будет оправдано только в том случае, если по сравнению с реакторами, охлаждаемыми газом, стоимость графитонатриевого реактора будет значительно более низкой.

Опубликовано сообщение о проектировании реактора, в котором замедлителем служит тяжелая вода, а теплоносителем — натрий. В этом реакторе должен быть предотвращен контакт натрия с тяжелой водой.

Представляет интерес идея реактора с жидкометаллическим топливом. Схема установки мощностью 210 *мвт* с таким реактором изображена на рис. 5. Активная зона состоит из графитового корпуса, внутри которого помещен графитовый цилиндр высотой 51 мм, имеющий вертикальные каналы диаметром 69 мм, расположенные по треугольной решетке с шагом 69 мм. По каналам активной зоны циркулирует сплав урана с висмутом. Расход сплава равен 80 500 *мл/час*, температура на входе в реактор

400° С, на выходе 550° С. В активной зоне выделяется 500 *мвт* тепла.

Графитовый корпус активной зоны заключен в стальной корпус высотой 4,6 м и диаметром 3,7 м. Кольцевое пространство между наружным корпусом и корпусом активной зоны заполнено графитовыми стержнями диаметром 80 мм с шагом 110 мм. Между стержнями зоны воспроизводства циркулирует сплав Th_2Bi_3 в расплавленном висмуте Bi. Расход сплава 8050 *мл/час*. Тепловая мощность зоны воспроизводства 50 *мвт*, общая тепловая мощность реактора 550 *мвт*.

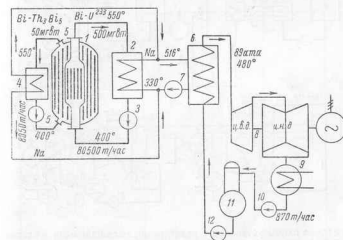


Рис. 5. Тепловая схема электростанции с реактором на жидкометаллическом топливе.

1 — реактор; 2 — теплообменник активной зоны; 3 — циркуляционный насос активной зоны; 4 — теплообменник зоны воспроизводства; 5 — циркуляционный насос зоны воспроизводства; 6 — парогенератор; 7 — циркуляционный насос промежуточного контура; 8 — паровая турбина; 9 — конденсатор; 10 — конденсатный насос; 11 — деаэрактор; 12 — питательный насос.

Для транспортных установок предполагается использовать реакторы такого типа, но при замене зоны воспроизводства графитовым отражателем.

Теплоноситель активной зоны и зоны воспроизводства нагревает натрий в теплообменниках промежуточного контура. Далее натрий отдает тепло в парогенератор, где образуется 870 *мл/час* водяного пара 89 атм, 480° С. Этот пар совершает работу в двухцилиндровой турбине мощностью 210 *мвт*. К. п. д. станции — около 33%. Стоимость установленного киловатта оценена в 238 долларов, стоимость 1 *квт-часа* 0,78 цента. В реакторе такого типа температура сплава может достигать 600° С и более, что позволяет при использовании натрия в промежуточном контуре поднять к. п. д. до 35—38%.

На рис. 6 показаны схемы установок с реакторами, охлаждаемыми жидкими металлами.

Если в промежуточном контуре вместо сплава натрия — калий (рис. 6, а) использовать ртуть (рис. 6, б), то может быть получен ртутный пар давлением 10–15 *атм* с температурой 515–550° С. По выходе из ртутно-паровой турбины ртутный пар, отдавая в конденсаторе скрытую теплоту парообразования, может гене-

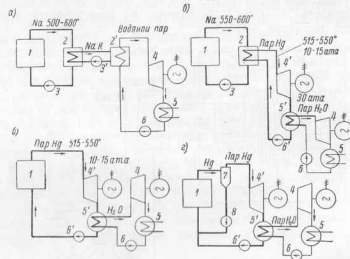


Рис. 6. Тепловые схемы установок с реакторами, охлаждаемыми жидкими металлами: а — трехконтурная с обычным паровым циклом; б — трехконтурная с бинарным ртутно-водяным циклом; в — двухконтурная с кипящим реактором на ртути и бинарным циклом; г — двухконтурная с жидкостно-ртутным охлаждением реактора и бинарным циклом.

1 — реактор; 2 и 2' — теплообменники; 3 и 3' — циркуляционные насосы; 4 и 4' — турбины водяного и ртутного пара; 5 и 5' — конденсаторы водяного и ртутного пара; 6 и 6' — конденсатные насосы; 7 — сепаратор-расширитель; 8 — циркуляционный насос.

рировать водяной пар давлением около 30 *атм*, который будет совершать работу в обычной паровой турбине.

Такая бинарная схема энергетической установки будет иметь к. п. д. 40% при температуре ртутного пара 500° С и 45% при температуре 550° С.

Применение ртути в промежуточном контуре не только повышает к. п. д. установки, но и упрощает схему, так как отпадают устройства для обогрева промежуточного контура, поскольку температура застывания ртути минус 39° С.

Ртуть в качестве охлаждающей среды была использована в первом канадском реакторе на тепловых нейтронах.

Препятствием к применению ртути в качестве охлаждающей среды теплового реактора является большое сечение поглощения нейтронов. Если бы оказалось возможным экономично выделить

из ртути изотопы Hg-200 и Hg-201, то сечение поглощения для медленных нейтронов уменьшилось бы в шесть раз.

В реакторах на быстрых нейтронах ртуть может быть применена непосредственно для отвода тепла от топливных элементов, так как по отношению к быстрым нейтронам полное нейтронное сечение у ртути такого же порядка, как у свинца или висмута (рис. 7). Верхние кривые для тепловых нейтронов, нижние — для быстрых.

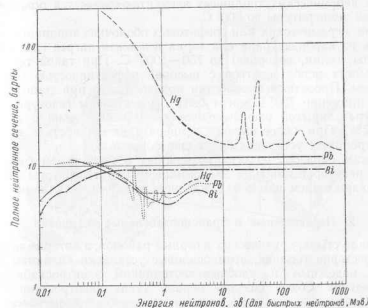


Рис. 7. Полные нейтронные сечения жидких металлов в зависимости от энергии нейтронов.

На второй международной конференции 1958 г. по мирному использованию атомной энергии советская делегация сообщила о пуске опытного реактора на быстрых нейтронах, теплоносителем в котором является ртуть.

Наиболее простой и экономичной установкой с реактором на быстрых нейтронах может быть установка по схеме, показанной на рис. 6, в. Здесь генерация ртутного пара происходит в каналах топливных элементов. Схема проточного ртутного парогенератора еще не проверена в полупромышленных или промышленных условиях. Более надежная, но несколько менее экономичная схема — по рис. 6, г, где в реакторе осуществляется многократная принудительная циркуляция ртути под избыточным давлением. Образование ртутного пара происходит в сепараторе-расширителе. Ртутный парогенератор такого типа проверен в полупромышленных условиях.

При температуре поверхности тепловыделяющих элементов порядка 650°C возможен к. п. д. ртутно-водяной бинарной установки до 50%, что недостижимо на других жидкометаллических теплоносителях. В случае газового охлаждения реакторов достигнут к. п. д. установки 23—26% при температуре поверхности тепловых элементов 400°C . При применении металлических оболочек, допускающих температуру до $600\text{--}650^{\circ}\text{C}$, к. п. д. установок с газовым охлаждением может возрасти до 30—35%. При полых керамических топливных элементах ожидается повышение рабочей температуры до 800°C .

При керамических или графитовых оболочках топливных элементов из карбида урана или тория возможен нагрев газа (углекислоты, гелия, водорода) до $750\text{--}1000^{\circ}\text{C}$. При такой температуре могут использоваться с высокой эффективностью газовые турбины. Проектные проработки показали, что при температуре газа примерно 750°C могут быть осуществлены газотурбинные агрегаты закрытой схемы мощностью 100—300 мвт с к. п. д. 40—42%. При более высоких температурах мощность и к. п. д. газотурбинных установок будут еще более высокими.

Таким образом, из всех возможных в ближайшем будущем типов реакторов наиболее экономичными будут реакторы с газовым охлаждением или с охлаждением жидкими металлами.

2. Передвижные и транспортабельные установки

Для пустынь, арктических и горных районов, в которые затруднена доставка топлива, атомосиловые установки являются наиболее надежным и удобным источником электроснабжения. В Советском Союзе создана первая такая электростанция на 2000 квт.

В США для нужд армий, береговых баз флота и баз авиации проектируются транспортабельные атомные электростанции небольшой мощности. В апреле 1957 г. пущен первый экспериментальный армейский реактор для транспортабельной электростанции мощностью 2000 квт (рис. 8). Реактор тепловой мощностью 10 000 квт охлаждается водой под давлением 85 атм с температурой на входе 220°C и на выходе 230°C . Расход воды 750 м³/час. Стальной кожух реактора облицован изнутри бетоном толщиной 0,6 м. В активной зоне размещено 40 топливных элементов поперечным сечением 42×42 мм. Активная зона находится в стальном баке диаметром 1,22 м с защитой из железа и воды толщиной 1,2 м.

Толщина биологической бетонной защиты реактора 2,85 м. Парогенератор состоит из вертикального цилиндрического корпуса, в котором размещены U-образные пучки труб, по которым циркулирует вода, охлаждающая реактор. В межтрубном пространстве генерируется около 10 м³/час пара 13,6 атм, 207°C . Противодавление турбины 0,07 атм.

Проектный к. п. д. электростанции 15%, стоимость установленного киловатта 436 долларов, стоимость 1 квт-часа около 5 центов.

Топливом служит высокообогащенный уран в оболочках из нержавеющей стали. На одну загрузку требуется 25 кг урана.

Общий вес реактора, парогенератора и вспомогательного оборудования 1300 т; вес реактора без бетонной защиты 560 т. Ставится задача снизить его до 25 т для возможности перевозки транспортным самолетом.

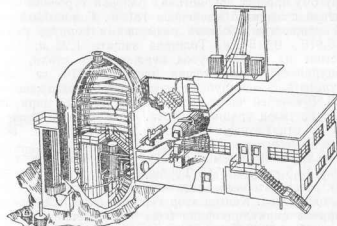


Рис. 8. Транспортабельная атомная электростанция 2000 квт (Форт-Бельвуар).

Разрабатываются более легкие типы транспортабельных армейских реакторов — кипящего типа, с газовым охлаждением и с жидкометаллическим горючим.

В Англии организуется массовое производство малогабаритных атомных реакторов, охлаждаемых водой под давлением для электростанций 10—20 мвт. Стоимость установки 10 мвт — 150 фунтов стерлингов за 1 квт. Ожидаемая стоимость электроэнергии 1—1,5 пенса/квт-час. Загрузка урана составляет 0,5—3,5 т при степени обогащения 4—12%.

Имеются сообщения о проектировании энергопоездов с атомосиловыми установками.

В печати сообщалось о разработке в СССР передвижных атомных электростанций небольшой мощности на колесном ходу для передвижения по шоссе и дорогам. Эти установки могут использоваться в районах освоения целинных земель, на строительстве и т. д.

В США проектируется атомный автопоезд для использования на Аляске. Он будет состоять из 4—5 прицепов, каждый длиной по 8 м.

3. Атомные двигатели локомотивов, автомобилей и самолетов

В ряде стран ведется разработка конструкций реакторов и силовых установок для локомотивов, автомобилей и самолетов, но реально осуществимых проектов еще не опубликовано.

В США прорабатывалась конструкция реактора для локомотива с мощностью 6900 л. с. с паровой турбиной. Вес локомотива определен в 500 т; вес атомосиловой установки 100 т или 20% от веса локомотива.

По другому проекту локомотива с паровой турбиной 8000 л. с. вес реактора с защитой получился 181 т. Гомогенный реактор тепловой мощностью 30 мвт размещен в корпусе размерами $0,305 \times 0,915 \times 0,915$ м. Толщина защиты 1,22 м. Активная зона состоит из 10 000 трубок нержавеющей стали, по которым циркулирует охлаждающая вода, и 176 кг раствора уранилсульфата в межтрубном пространстве, содержащего 9 кг урана-235. В нижней части корпуса расположен циркуляционный насос раствора уранилсульфата. Вода служит также замедлителем и отражателем нейтронов. Регулирование осуществляется кадмиевыми стержнями.

Вода из трубной системы проходит через сепаратор, где отделяется пар 17,5 атм, 204° С. Турбина через редуктор соединена с 4 электрогенераторами, питающими 12 тяговых двигателей на осях локомотива. Конденсатор турбины имеет водяное охлаждение, причем циркуляционная вода охлаждается в радиаторах на прицепной секции.

Суточный расход урана-235 равен 37 г. Раз в полгода предусмотрена перезарядка реактора горячим. Стоимость локомотива определена в 1,2 млн. долларов.

Выполнен проект реактора с газовым охлаждением для газотурбинного локомотива мощностью 3000 л. с. Тепловая мощность реактора на обогащенном уране — 15 000 л. с. При температуре газа перед турбиной 700° С к. п. д. на валу турбины составляет 20%. С учетом к. п. д. электротрансмиссии к. п. д. на ободе колеса получится 16%. Вес локомотива 174 т при длине 20,7 м и ширине 3,2 м. Эксплуатационные расходы оказались более высокими по сравнению с дизель-электрическим локомотивом. Стоимость локомотива при серийном производстве оценена в 1 млн. долларов. Вес защиты реактора 38,5 т. В описанном проекте принята одноконтурная схема воздушного охлаждения реактора.

В ФРГ выполнен проект атомного локомотива мощностью 5900 л. с. Реактор охлаждается гелием. Двигателем служит двухвальная газотурбинная установка с к. п. д. около 15%. Вес восьмисносного локомотива с электротрансмиссией 175 т, длина 35 м, стоимость 2 млн. марок. Стоимостью пробега меньше по сравнению с паровозом, но больше, чем у тепловоза.

В Японии запроктирован атомный локомотив мощностью 3000 л. с. Его длина 30 м, вес 179 т, скорость 90 км/ч. Теплоно-

сителем служат литий, замедлителем — бериллий. Продолжительность службы загрузки урана 8 месяцев, что соответствует пробегу 155 тыс. км.

Проектные проработки атомного двигателя для автомобиля пока не дали положительных результатов. Так, для грузового автомобиля грузоподъемностью 1,5 т вес атомного двигателя мощностью 100 л. с. оказался равным 50 т. Если будет найдена легкая биологическая защита, то для большегрузных автомобилей и автобусов в будущем проблема атомного двигателя будет решена.

Над созданием атомных двигателей для самолетов ведутся работы во многих странах. Наиболее вероятными вариан-

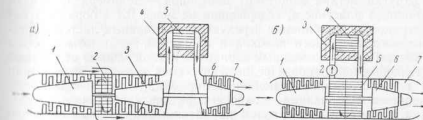


Рис. 9. Схемы турбореактивных двигателей с атомными реакторами:
а — с газовым охлаждением.

1 — компрессор низкого давления; 2 — промежуточный охладитель; 3 — компрессор высокого давления; 4 — биологическая защита; 5 — реактор; 6 — турбина; 7 — сопло;
б — с жидкометаллическим охлаждением.
1 — компрессор; 2 — циркуляционный насос; 3 — биологическая защита; 4 — реактор; 5 — теплообменник; 6 — турбина; 7 — сопло.

тами считаются турбореактивные двигатели или турбовинтовые, но турбовинтовые двигатели могут оказаться тяжелыми. Прямые реактивные двигатели могут найти применение после того, как будут созданы реакторы с высокой температурой на поверхности топливных элементов. Перспективы осуществления паротурбинных двигателей пока неясны.

На рис. 9 показаны два варианта турбореактивного двигателя для самолета. В первом варианте предусмотрены воздушное охлаждение реактора и промежуточное охлаждение воздуха в процессе сжатия. Во втором варианте реактор охлаждается жидким металлом, от которого тепло передается воздуху в теплообменнике.

При температуре воздуха перед турбиной 800° С и скорости полета, в 2—3 раза превышающей скорость звука, вес силовой установки определен в 1—1,5 кг/кг тяги при общем весе самолета 40—120 т. Реактор предполагается разместить вблизи центра тяжести самолета. Фюзеляж может иметь большую длину, чтобы удалить экипаж возможно дальше от реактора. Двигатель располагается возможно ближе к реактору. Если самолет имеет форму «летающего крыла», реактор может быть расположен на одном его конце, а экипаж на другом.

Посадочная дорожка для тяжелого атомного самолета должна быть очень прочной. Гидросамолет удобнее тем, что при аварии меньше опасность поражения окружающего пространства излучениями и не требуется взлетно-посадочной площадки.

Вес биологической защиты реактора самолета оценивается в 10—45 т. Вес реактора, защиты и турбореактивного двигателя составляет около половины веса снаряженного самолета.

Разрабатываются легкие виды биологической защиты реакторов. Защита из карбида бора и алюминия («бораль») в 100 раз эффективнее защиты из тяжелого бетона. Слой «бораль» 6 мм лучше защищает от нейтронов с высокой энергией, чем слой бетона 0,6 м.

Другая легкая защита от нейтронов — полимеризованная акриловая пластмасса, содержащая не менее 0,1 г бора на 1 см² поверхности. Комбинация чередующихся стальных листов, спрессованного древесного волокна и ацетатной целлюлозы с бором также считается возможным вариантом легкой защиты от быстрых и тепловых нейтронов. Предложена легкая защита в виде матриц из ковкого металла (алюминий, цирконий), заполненных огнеупорными материалами — окисью бора или карбидом бора. Матрица запрессовывается путем прокатки между слоями обложки из алюминия или нержавеющей стали. Содержание бора в заполнении матриц — 35—50%. Такая защита толщиной 7 мм достаточна для тепловых нейтронов. Достоверность этих данных пока неясна.

Наиболее перспективны для высокотемпературных авиационных реакторов топливные элементы из карбидов с небольшим содержанием урана. В качестве обложки элементов из окиси урана могут быть использованы тугоплавкие металлы — ниобий, вольфрам, силицид молибдена.

Разработан гомогенный реактор с активной зоной из сплава обогащенного урана и бериллия, служащего замедлителем. В другом экспериментальном реакторе керамическое топливо было помещено в графитовый замедлитель. Разработан также тепловой авиационный реактор на растворе урана в висмуте. Это гетерогенный реактор с графитовым замедлителем.

Наземные прототипы реакторов для самолетов испытывались в США с 1951 г. В 1954 г. достиг критичности экспериментальный реактор мощностью 2,5 мвт. Топливом в нем служит концентрат тетрафторида урана. Высота реактора 0,9 м.

Американские специалисты считают, что первые полеты самолета с атомным двигателем будут осуществлены в 1960 г.

4. Судовые установки

Сравнительно низкий к. п. д. обычных силовых установок морских судов требует запасов топлива, составляющих около одной трети водоизмещения. Это лимитирует возможность дальней-

шего увеличения скорости хода и автономности плавания морских судов. Усложнение схемы установок с целью повышения к. п. д. приводит к снижению расхода топлива, но одновременно, как правило, увеличивает и вес силовой установки.

Ядерное топливо решает проблему роста скорости и автономности морских судов, а также проблему снижения стоимости перевозок.

Первым в мире морским судном мирного назначения с атомносиловой установкой является советский ледокол «Ленин», предназначенный для плавания в арктических широтах. Водоизмещение его 16 000 т, скорость хода около 18 узл., мощность установки 44 000 л. с. Длина судна 134 м, ширина 27,6 м и высота борта 16,1 м.

На ледоколе установлено три водо-водяных реактора, из которых один является резервным. Биологическая защита — композиционная, из прослоек воды, железа и тяжелого бетона. Загрузки урана достаточно для нескольких лет плавания.

Для танкеров и сухогрузных судов, а также для океанских пассажирских судов применение атомносиловых установок открывает широкие перспективы дальнейшего увеличения скорости и автономности.

В Институте комплексных транспортных проблем АН СССР выполнены исследования, показавшие, что стоимость перевозок для танкера с газотурбинной установкой на ядерном топливе при скорости хода 18—20 узл. в три раза меньше, чем для танкера на нефтяном топливе. Сопоставлялись танкеры грузоподъемностью 25 000 т на нефтяном и ядерном топливе с паротурбинными установками, а также танкеры грузоподъемностью 32 000 т с газотурбинными установками.

21 января 1954 г. в США состоялся спуск на воду первой подводной лодки «Наутилус» с атомным двигателем. Водоизмещение ее в надводном положении 2980 т, в погруженном — 3180 т, длина 91,5 м, диаметр прочного корпуса 8,5 м, глубина погружения до 230 м. Запасы ядерного топлива обеспечивают дальность плавания 30 000 миль в подводном положении при скорости хода 20 узл. По официальным сообщениям подводная скорость «Наутилуса» около 20 узл. Мощность двухвальной паротурбинной установки около 20 000 л. с. Имеется резервная дизель-аккумуляторная установка. Предусмотрено специальное оборудование для извлечения кислорода из морской воды с целью регенерации воздуха в отсеках корабля. Экипаж лодки — 101 человек.

Стоимость лодки 55—75 млн. долларов, что в три раза превышает стоимость обычных лодок. Расход урана около 1,5—2 кг/год на 1000 л. с. К. п. д. силовой установки — 20%.

Реактор «Наутилуса» — на тепловых нейтронах, в котором

вода служит замедлителем и теплоносителем (подобный реактору на рис. 2). Температура воды на выходе из реактора достигает 260°C . Это позволяет получать в парогенераторе пар $18,5\text{ атм}$, 215°C . Топливные элементы реактора выполнены из сплава урана с цирконием в циркониевых оболочках. Обогащение по урану-235 около 40%. Диаметр активной зоны 2,7 м. Диаметр реактора с защитой 4,5 м. Защита из слоя воды и свинцовых плит с органическим наполнителем. Загрузка урана около 20 т. Длительность службы загрузки 2—2,5 года. Регулирующие стержни — из гафния. На пуск реактора и доведение его до полной мощности требуется около двух часов.

Наладка атомосиловой установки «Наутилуса» продолжалась длительное время. К апрелю 1957 г. лодка прошла на начальной загрузке урана 56 000 миль. В апреле 1957 г. активная зона реактора демонтирована и заменена новой, наладка которой происходила в июле — августе. Были случаи сильного облучения экипажа. Для этой подводной лодки характерны значительные габариты и вес установки, низкий к. п. д., недостаточная маневренность, высокий уровень шума.

Вторая американская подводная лодка «Си Вулф» спущена на воду 21 июля 1955 г. Ее водоизмещение в погруженном состоянии 3260 т, длина 99 м, диаметр прочного корпуса 9,2 м. Вступила в строй в 1957 г. Численность экипажа около 100 человек. Мощность паротурбинной установки — 25 000—30 000 л. с., проектная скорость подводного хода — 25 узлов.

Реактор «Си Вулф» работает на промежуточных нейтронах и охлаждается жидким натрием. Это позволило повысить параметры пара до 36 атм , 400°C , чему соответствует к. п. д. установки 25—27%.

Во избежание распространения активности при аварии теплообменник выполнен по системе «труба в трубе». По внутренней трубе протекает радиоактивный натрий, наружная труба омывается водой. Колеевое пространство между трубами заполнено сплавом натрий — калий, причем давление Na — К больше давления Na, что предотвращает проникновение радиоактивного натрия в водяную полость.

Большие термические напряжения в сложной трубной системе и коррозионное воздействие натрия на сталь привели к образованию трещин в местах закрепления трубков в трубную доску пароперегревателя и частично испарителя. Пароперегреватель пришлось удалять, что снизило мощность установки на 20%. Вследствие неплотностей в теплообменнике первичного контура и разрыва трубок вторичного контура произошла утечка радиоактивного натрия. В результате аварий были человеческие жертвы.

Предполагается демонтировать реактор с натриевым охлаждением и установить реактор такого же типа, как и на «Наутилусе». Данное решение следует считать преждевременным, так

как натриевый реактор «Си Вулф» более прогрессивен по сравнению с реактором «Наутилуса».

В мае 1957 г. спущена на воду третья подводная лодка «Скейт» с водо-водяным реактором. Ходовые испытания ее начались в ноябре 1957 г.

Пять подводных лодок водоизмещением по 3000 т рассчитаны на скорость хода свыше 30 узл. Из них одна по типу лодки «Альбакор» имеет обтекаемый каплевидный корпус, напоминающий по форме тело кита. Такая форма корпуса повышает маневренность корабля и скорость хода. Эти лодки могут использоваться в качестве истребителей подводных лодок противника. На пикетной лодке «Тритон» водоизмещением 5450 т будет установлено два реактора. Лодка «Хейлибат» водоизмещением 2800 т предназначена для запуска управляемых снарядов. В декабре 1956 г. достиг критичности прототип реактора для подводной лодки малого водоизмещения.

В США строится легкий крейсер «Лонг Бич» класса «Бостон» водоизмещением 14 000 т, длиной 210 м, предназначенный для запуска управляемых снарядов. На нем будет установлено два реактора с водой под давлением в качестве замедлителя и теплоносителя. Предполагается начать строительство корабля водоизмещением 85 000 т, с восемью реакторами, обеспечивающими скорость хода 33 узла. Силовая установка четырехвальная, на каждый вал будут работать по два реактора и по две турбины.

С 1960 г. все новые корабли будут проектироваться только с атомными двигателями.

Начинаются работы по созданию пассажирских и грузовых судов с атомосиловыми установками. Разрабатываются реакторы с органическим замедлителем, с газовым охлаждением и ГТУ на гелии, с графитовым замедлителем и ГТУ, а также реактор кипящего типа. Принято решение о постройке в США первого товаро-пассажирского судна с атомной установкой для перевозки 100 пассажиров и 12 000 т груза. Реактор с водой под давлением, мощность установки 20 000 л. с., скорость 21 узел, длина судна 166 м.

Танкер грузоподъемностью около 30 000 т при мощности установки 16 000 л. с. и скорости хода 18,6 узла за рейс 8500 миль расходует 3800 т нефти. Предполагается построить танкер грузоподъемностью 38 000 т, длиной 212 м с реактором, охлаждаемым газом. Топливом будет служить слабо обогащенный уран. Температура газа перед турбиной принята 700°C . Подчеркивается, что при всех нагрузках ГТУ будет работать с высоким к. п. д. Стоимость рейса атомного танкера будет не выше, чем у танкера на нефтяном топливе. По другому проекту танкер водоизмещением 56 000 т при длине 205 м и ширине 30 м имеет грузоподъемность 36 000 т. Паротурбинная установка мощностью 20 000 л. с. работает на насыщенном паре 34 атм и обеспечивает скорость хода 19 узл. По предварительным расчетам стоимость такого танкера

с атомной установкой на 50% превышает стоимость обычного танкера. Стоимость самой атомной установки в 2,5—3 раза выше стоимости установки на нефтяном топливе. Однако судно с атомной установкой может брать оплачиваемого груза на 10% больше по сравнению с обычным танкером равного водоизмещения. Опубликованы данные об атомной паротурбинной установке мощностью 22 000 л. с. для танкера.

Реактор водо-водяной, тепловой мощностью 85 мвт. Активная зона состоит из 32 тепловыделяющих элементов высотой около 2,3 м, размещенных в решетке диаметром 1,67 м. Каждый тепловыделяющий элемент содержит 200 стержней диаметром 12,7 мм из диоксида урана с оболочкой из нержавеющей стали. Активная зона окружена кольцевым водяным отражателем, в котором расположена тепловая защита — стальные плиты. Толщина отражателя 0,38 м. Корпус реактора диаметром 2,5 м выполнен из углеродистой стали с внутренней облицовкой из нержавеющей стали. Снаружи корпус имеет оболочку из нержавеющей стали толщиной 76 мм.

Вода поступает в реактор при давлении 122 атм с температурой 243°С и нагревается в активной зоне до 258°С. Четыре циркуляционных насоса подают ее к двум парогенераторам. Электродвигатели насосов имеют вспомогательную обмотку, питаемую от резервного источника тока. Парогенераторы с естественной циркуляцией.

Общая максимальная мощность турбин высокого и низкого давления 22 000 л. с. Обе турбины через двухступенчатую зубчатую передачу связаны с гребным валом. Давление пара перед турбиной 29 атм, вакуум в конденсаторе 71 мм рт. ст.

Предусмотрено два дизель-генератора мощностью по 750 квт. В случае аварии реактора ход судна обеспечивается электродвигателем мощностью 750 л. с.

Проектный срок службы загрузки урана около 3 лет.

Скорость самых быстроходных пассажирских океанских судов увеличилась с 26 узл. в 1924 г. до 35 узл. в 1952 г. Океанское пассажирское судно «Соединенные Штаты» водоизмещением 45 000 т имеет скорость хода 35,5 узла при мощности установки 17 500 л. с. Часовой расход нефти составляет на нем 50 т. Предполагается построить судно водоизмещением 53 000 т, длиной 300 м, рассчитанное на 2000 пассажиров. Атомносиловая установка позволит получить скорость свыше 36 узл.

В Англии размещены заказы на строительство первой подводной лодки и танкера с атомными двигателями. Для подводной лодки строится реактор с водой под давлением. Спуск на воду намечается на 1960 г. Разрабатывается реактор с органическим замедлителем для другой подводной лодки. Силовая установка будет выполнена по паро-газовой схеме или со специальной газовой турбиной. Прорабатывается вариант реактора с газовым охладителем.

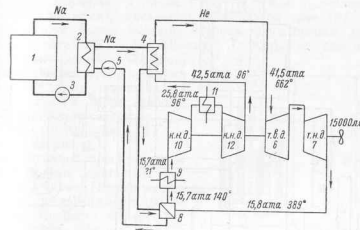


Рис. 10. Схема судового газотурбинного устройства на ядерном топливе.

1 — реактор; 2 — теплообменник первичного контура; 3 — циркуляционный насос первичного контура; 4 — теплообменник промежуточного контура; 5 — циркуляционный насос промежуточного контура; 6 — турбина высокого давления; 7 — турбина низкого давления; 8 — регенератор; 9 — охладитель газа; 10 — компрессор низкого давления; 11 — промежуточный охладитель; 12 — компрессор высокого давления.

нием по типу Колдер Холл, электрической мощностью 16 000—24 000 л. с.

В Англии выполнен проект атомной газотурбинной установки 15 000 л. с. для судна. Схема ее представлена на рис. 10. Реактор охлаждается жидким натрием. По другому проекту для судового газотурбинного устройства 17 500 л. с. предусмотрен реактор с газовым охлаждением при температуре гелия за реактором 870°С. Во втором контуре максимальная температура гелия 760°С. Расчетный к. п. д. установки — 42%. Натрий пожароопасен и имеет неограниченную активность, требующую усиленной биологической защиты по сравнению с газом и водой. Для ГТУ более перспективны реакторы с газовым охлаждением. Однако в реакторах на быстрых и промежуточных нейтронах благоприятные физические свойства натрия могут компенсировать его недостатки.

Для танкера водоизмещением свыше 80 000 т со скоростью хода 25—30 узл. прорабатывались варианты реактора с жидкотеплоносительным и органическим теплоносителями. Реактор с органическим замедлителем и теплоносителем оказался дешевле жидкотеплоносительного на 20—25%, но к. п. д. установки с жидкотеплоносительным теплоносителем более высок.

Фирма Эшер-Висс выполнила проект атомной ГТУ мощностью 20 000 л. с. для танкера, тепловая схема которой дана на рис. 11. Приводом компрессорной группы служит турбина высокого давления осевого типа. Две радиальные турбины низкого давления

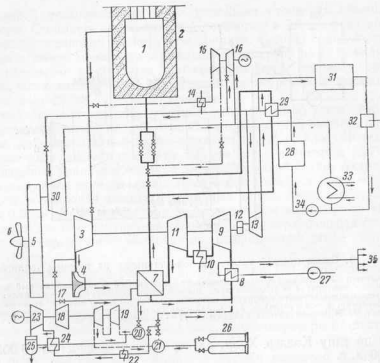


Рис. 11. Схема атомной ГТУ мощностью 20 000 л. с. для танкера.

1 — реактор; 2 — первичная защита; 3 — газовая осевая турбина высокого давления; 4 — газовые радиальные турбины низкого давления; 5 — редуктор; 6 — гребной винт; 7 — регенератор; 8 — концевой охладитель газа; 9 — компрессор низкого давления; 10 — промежуточный охладитель газа; 11 — компрессор высокого давления; 12 — ре-актор; 13 — пусковая паровая турбина; 14 — охладитель газа системы расхолаживания реактора; 15 — вентилятор системы расхолаживания; 16 — паровой привод вентилятора; 17 — байпасное редукционное устройство; 18 — паровой дуктор пусковой турбины; 19 — компрессор; 20 — аккумулятор низкого давления; 21 — аккумуля-тор высокого давления; 22 — охладитель газа; 23 — турбодетандер; 24 — тепло-мулятор высокого давления; 25 — охладитель газа; 26 — баллоны подпитки азотом; 27 — насос заборной воды; 28 — паровой котел; 29 — пароперегреватель; 30 — резер-вная силовая паровая турбина; 31 — система обогрева грузовых танков; 32 — вспомо-гательное конденсационное устройство; 33 — конденсатор резервной турбины; 34 — конденсатный насос; 35 — горячая вода для промывки танков.

(на схеме показана одна из них) через редуктор соединены с гребным валом. Через редуктор может осуществляться привод гребного винта от резервной паровой турбины, питаемой перегретым паром. В качестве пускового двигателя также принята паровая турбина. Паровой привод имеет и вентилятор системы расхолаживания реактора.

Реверс может осуществляться винтом регулируемого шага или реверсивными радиальными турбинами.

В качестве теплоносителя в этой установке выбран азот. Расчетами определены оптимальные параметры: степень по-

вышения давления в цикле ГТУ — $\epsilon = 4 \div 5$, давление газа $p = 28 \div 63 \text{ кг/см}^2$, начальная температура газа $675-750^\circ \text{C}$. Установка с более высокой степенью повышения давления более дорога и менее надежна. Улавливание газообразных продуктов деления (ксенон) осуществляется путем пропуска некоторой доли потока азота из цикла ГТУ через турбодетандер и фильтр-сепаратор.

Разрез и план этой ГТУ показаны на рис. 12.

Во Франции проектируются две подводные лодки с атомными установками. Первая из них будет спущена на воду в 1960—1961 гг. Скорость и маневренность лодки меньше, чем у «Наутилуса». Эта лодка будет использована для обучения личного состава.

К 1961 г. предполагается построить лайнер «Франс» водоизмещением 55 000 т со скоростью хода около 30 узл. Котельная установка впоследствии будет заменена реакторной установкой.

В ФРГ разрабатывается проект атомного танкера грузо-подъемностью 22 000 т, длиной 182 м. Паротурбинная установка 10 000 л. с. рассчитана на скорость хода около 16 узл. Схема установки дается на рис. 13.

Реактор — на тепловых нейтронах; замедлителем и теплоносителем служит вода под давлением. Топливные элементы — из обогащенного урана. Вес загрузки урана — 2400 кг. Тепловая мощность реактора 30,5 мвт, вес его 40 т.

Активная зона имеет тепловою защиту из листового нержавеющей стали толщиной 50 мм. Прочный корпус реактора диаметром 1,7 м и высотой 5,6 м выполняется из теплоустойчивой стали с внутренней облицовкой из нержавеющей стали. Давление воды

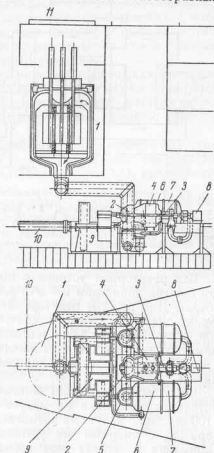


Рис. 12. Разрез и план ГТУ мощностью 20 000 л. с. для танкера.

1 — реактор; 2 — турбина высокого давления; 3 — компрессор низкого давления; 4 — компрессор высокого давления с встроенным охладителем; 5 — силовая турбина низкого давления; 6 — регенератор; 7 — охладитель; 8 — пусковая турбина; 9 — редуктор; 10 — гребной вал; 11 — съемные листы для выема активной зоны реактора.

в контуре циркуляции 160 *атм*, температура воды на входе в реактор 270° С и на выходе из него 290° С. Расход воды — 1020 *м*³/*час*.

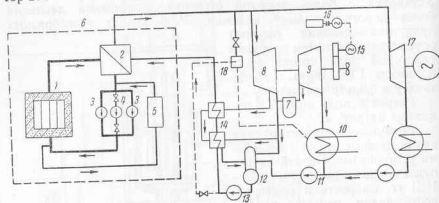


Рис. 13. Тепловая схема паротурбинной установки 10 000 л. с. для танкера.

1 — реактор; 2 — парогенератор; 3 — циркуляционный насос первичного контура; 4 — резервный циркуляционный насос; 5 — фильтр для улавливания продуктов дестилляции; 6 — контейнер; 7 — паросепаратор; 8 — турбина высокого давления; 9 — турбина низкого давления; 10 — конденсатор; 11 — конденсатный насос; 12 — деаэрактор; 13 — питательный насос; 14 — регенеративные подогреватели; 15 — электродвигатель; 16 — дизель-генератор; 17 — турбогенератор; 18 — редукционно-охладительная установка.

Вся реакторная установка помещается в стальном защитном контейнере диаметром 9,6 м и длиной 12,6 м с толщиной стенок 60 мм. Для защиты реакторной установки от толчков и ударов между корпусом судна и контейнером предусмотрен амортизатор — стальные листы на расстоянии 500 мм и заполнение между ними из дубовых досок. Биологическая защита имеет толщину 1,1 м. В состав ее входят свинцовые плиты и органический наполнитель.

Вес атомной установки танкера определен в 2000 *т*. Машинокотельная установка на мазуте для такого танкера имеет вес 1100 *т*. Запас мазута на пятидневный рейс равен 2200 *т*. Таким образом, суммарный вес установки с топливом будет 3300 *т*. Благодаря меньшему весу атомной установки полезная грузоподъемность танкера увеличивается.

Двухцилиндровая турбина рассчитана на использование насыщенного пара давлением около 40 *атм*. Между цилиндрами предусмотрена сепарация капельной влаги. К. п. д. установки определен в 22%. В случае перегрева пара до 480° С с помощью мазута к. п. д. может быть повышен до 24%. В машинокотельной установке на мазуте к. п. д. равен 25%.

В Швеции намечается постройка двух судов водоизмещением 45 000 *т* с атомными двигателями.

Фирмой Лаваль разработан проект двухконтурной атомной паротурбинной установки для судна с реактором кипящего типа на обычной воде.

Основное преимущество реактора кипящего типа — простота и малый вес коммуникаций между реактором и турбиной — в этой установке не реализовано. Давление в корпусе реактора кипящего типа ниже, чем в реакторе, охлаждаемом водой под давлением. Толщина стенок корпуса и вес его меньше по сравнению с водяным реактором. Преимуществом реактора кипящего типа является возможность саморегулирования мощности и большая стабильность работы на переменных режимах.

Паротурбинная установка не имеет специфических особенностей. Предусмотрен вспомогательный паровой котел с мазутной топкой для питания турбогенераторов и для отопления. При выходе из строя реактора котел может питать паром силовую турбину, обеспечивая ход судна.

В Норвегии планируется постройка атомного танкера водоизмещением 32 000 *т* со скоростью 18 узл. Тепловая мощность реактора 64 *мвт*, вес его 1000 *т*. Замедлителем служит D₂O, теплоносителем — H₂O, загрузка урана 15 *т*.

В Японии проектируется подводный танкер водоизмещением 30 000 *т*, длиной 65 м, шириной 21 м. Скорость в погруженном состоянии — 23 узла, мощность установки 20 000—30 000 л. с. Проектируется второй танкер, данные о котором не опубликованы.

Атомные установки позволяют создать новый тип пассажирского или грузового океанского судна, способного совершать рейсы как в надводном, так и в погруженном состоянии.

При обеспечении очень гладкой наружной поверхности корпуса подводного корабля можно уменьшить сопротивление его на 70%. Предполагается обеспечить ламинарный режим обтекания водой корпуса корабля специальной системой гидродинамического управления пограничным слоем.

Краткий обзор развития стационарных и транспортных атомных установок показывает, что реакторы с жидкотеплоносителями позволяют получить к. п. д. установки в пределах 25—35%, а в случае применения ртутно-водяного биарного цикла до 40—45%. Реакторы с водяным и органическим теплоносителями обеспечивают к. п. д. установки 20—30%. С жидкотеплоносителями могут конкурировать только газовые теплоносители, позволяющие получить к. п. д. до 40%, но при более высокой температуре по сравнению с жидкотеплоносителями.

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

СВОЙСТВА ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

Настоящий раздел содержит некоторые сведения, необходимые при использовании ряда жидких металлов (натрий Na, калий K, литий Li, галлий Ga, свинец Pb, висмут Bi, ртуть Hg, олово Sn) и некоторых их сплавов в качестве теплоносителей.

ГЛАВА I

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

1. Натрий (Na)

Натрий представляет собой серебристо-белый металл, который быстро тускнеет на воздухе, взаимодействуя с водяными парами и кислородом и покрываясь слоем окиси и гидрата окиси. Он настолько мягок и пластичен, что при обычной температуре легко режется ножом и с помощью ручных приспособлений из него может быть протянута проволока или лента. Натрий относится к числу легких металлов — плотность его меньше плотности воды; из металлов только литий и калий обладают меньшим удельным весом. По распространенности в земной коре натрий занимает шестое место после кислорода, кремния, алюминия, железа и кальция и составляет 2,85% ее общего веса. Натрий является вторым после лития элементом группы щелочных металлов периодической системы, но по своим свойствам он ближе к элементам этой группы, имеющим больший атомный вес, — калию (K), рубидию (Rb), цезию (Cs).

Атомный номер натрия — 11, атомный вес — 22,997. Природный натрий состоит только из Na^{23} . Существуют искусственные радиоактивные изотопы с массами ядер 20, 21, 22, 24 и 25. Характеристики изотопов натрия даны в табл. 1.

Натрий обладает широкой областью жидкого состояния при сравнительно низких для металлов температурах. Он плавится при 97,8° С, превращаясь в серебристо-белую жидкость, и кипит при 883° С, образуя пары голубого цвета. Удельная теплота плавления Na составляет 27,05 ккал/кг; удельная теплота испарения

Таблица 1

Радиоактивные изотопы натрия

Изотоп	Период полураспада	Испускаемые частицы	Энергия частиц, Мэв
Na^{20}	0,385 сек.	Позитрон	3,5—7,3
Na^{21}	2,28 сек.	Позитрон	2,5
Na^{22}	2,6 года	Позитрон	0,54
		γ -частица	1,28
Na^{24}	15 час.	β -частица	1,39
		β -частица	4,2 (0,003% β -частиц)
		γ -частица	1,37
		γ -частица	2,755
		γ -частица	3,7 (0,04% γ -частиц)
Na^{25}	58 сек.	β -частица	3,7 (~55% β -частиц)
		β -частица	2,7 (~45% β -частиц)
		γ -частица	~0,5

1038 ккал/кг. Объем натрия в процессе плавления при атмосферном давлении увеличивается на 2,71%. Данные по изотермической сжимаемости Na в температурном интервале от точки плавления до 272° С следующие:

Температура t , °С	97,8	100	160	200	240	272
Изотермическая сжимаемость, $\text{см}^3/\text{дн} \times 10^{12}$	19,11	19,16	20,19	20,89	21,61	22,19

Удельный вес твердого натрия. Томсон и Гарелис предложили уравнение для определения удельного веса твердого натрия в зависимости от температуры:

$$\gamma = 972,5 - 0,2011t - 0,00015t^2 \quad (1)$$

где γ — удельный вес, кг/м^3 ;
 t — температура, $^{\circ}\text{C}$.

Величины удельного веса, полученные из уравнения (1), согласуются с экспериментальными данными с точностью 0,03% для температур до $96,6^{\circ}\text{C}$ и несколько хуже для более высоких температур. Практически формула (1) может применяться вплоть до точки плавления. Соответствующие формуле (1) значения удельного веса приведены ниже:

Температура t , $^{\circ}\text{C}$	0	10	20	30	40	50
Удельный вес γ , кг/м^3	972,5	970,5	968,4	966,3	964,2	962,1
Температура t , $^{\circ}\text{C}$	60	70	80	90	97,8	—
Удельный вес γ , кг/м^3	959,9	967,7	955,5	953,2	951,4	—

Удельный вес жидкого натрия (рис. 14). Удельный вес жидкого натрия может быть определен из уравнения Томсона и Гарелиса:

$$\gamma = 949,0 - 0,223t - 0,0000175t^2, \quad (2)$$

или из уравнения Эпштейна

$$\gamma = 951,4 - 0,2392t, \quad (3)$$

где γ — удельный вес, кг/м^3 ;
 t — температура, $^{\circ}\text{C}$.

Удельный вес жидкого натрия

Температура t , $^{\circ}\text{C}$	Удельный вес γ , кг/м^3		
	Экспериментальные данные	По уравнению (2)	По уравнению (3)
100	927	927	927
200	904	904	904
300	882	880	881
400	859	856	857
500	834	831	833
600	809	808	809
700	783	784	—
800	757	760	—

Из табл. 2 можно видеть, насколько хорошо согласуются с экспериментальными данными значения удельного веса, рассчитанные по этим уравнениям.

Вязкость натрия (рис. 15 и 16). Жидкий натрий почти также текуч, как и вода. От температуры плавления до 400°C вязкость натрия находится в том же диапазоне значений, что и вязкость воды в интервале температур от 40°C до точки кипения.

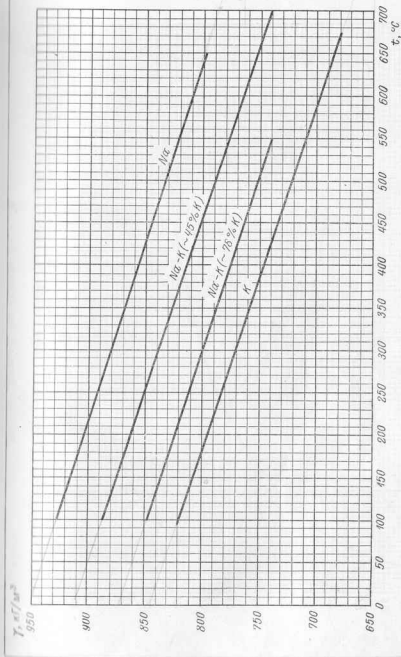


Рис. 14. Удельный вес Na, K и сплавов Na—K.

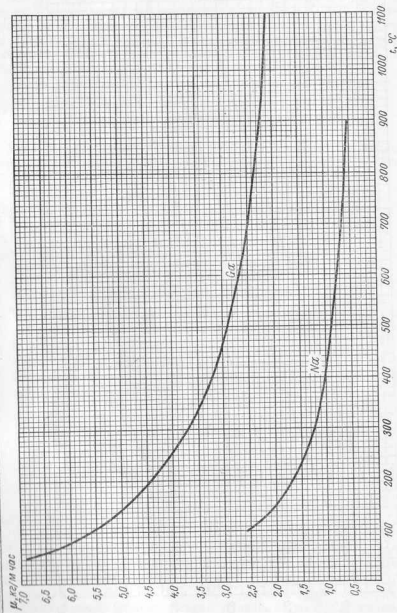


Рис. 15. Динамическая вязкость Na и Ga.

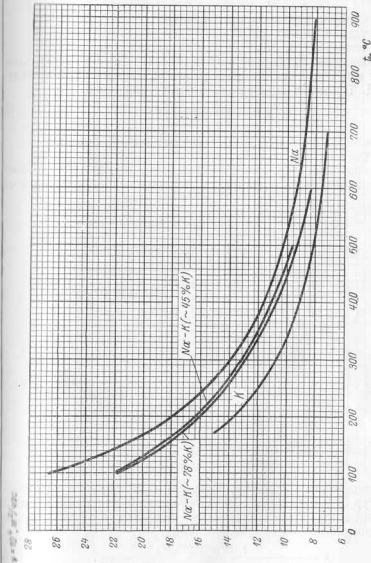


Рис. 16. Кинематическая вязкость Na, K и сплавов Na—K.

Изменение динамической вязкости μ в зависимости от температуры достаточно точно выражается уравнением Андраэ:

$$\mu = 0,0412 \cdot \gamma^{\frac{1}{3}} e^{0,74 \frac{T}{T}}, \quad (4)$$

где μ — коэффициент вязкости, $\text{кг/м}\cdot\text{час}$;

γ — удельный вес, кг/м^3 ;

T — температура, $^{\circ}\text{K}$.

Поверхностное натяжение натрия (рис. 17). Экспериментальные значения коэффициента поверхностного натяжения натрия, полученные Д. Тейлором [160], подчиняются уравнению:

$$\sigma = 200,12 - 0,00833t, \quad (5)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения, дн/см ;

t — температура, $^{\circ}\text{C}$.

Теплопроводность жидкого натрия (рис. 18). В табл. 3 даны опытные значения коэффициента теплопроводности жидкого

Таблица 3
Коэффициент теплопроводности жидкого натрия

Температура $t, ^{\circ}\text{C}$	Коэффициент теплопроводности $\lambda, \text{ккал/м}\cdot\text{час}\cdot^{\circ}\text{C}$	
	Экспериментальные данные	По уравнению (6)
200	70,2	69,6
300	65,2	65,0
400	61,3	61,1
500	57,4	57,8
600	53,9 *	55,0
700	50,8 *	52,5
800	47,1 *	50,2

* Величины, полученные экстраполяцией

натрия, полученные Эвингом, Грандом и Миллером в интервале температур от 200 до 500°C . Возможная ошибка измерения оценивается ими в 1%. В табл. 3 даны также значения теплопроводности, рассчитанные по формуле Эпштейна:

$$\lambda = \frac{2,102(t + 273,16)}{6,8393 + 3,3873 \cdot 10^{-2}t + 1,7235 \cdot 10^{-5}t^2}, \quad (6)$$

где λ — коэффициент теплопроводности, $\text{ккал/м}\cdot\text{час}\cdot^{\circ}\text{C}$;

t — температура, $^{\circ}\text{C}$.

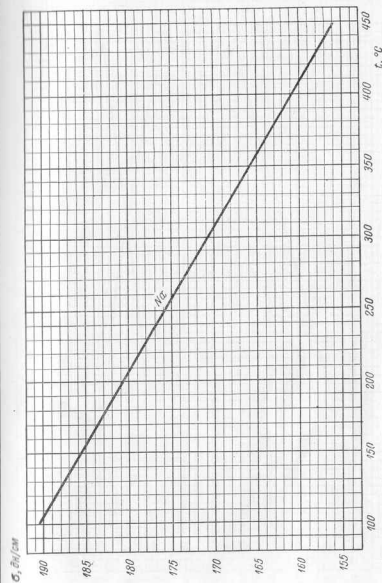


Рис. 17. Поверхностное натяжение Na.

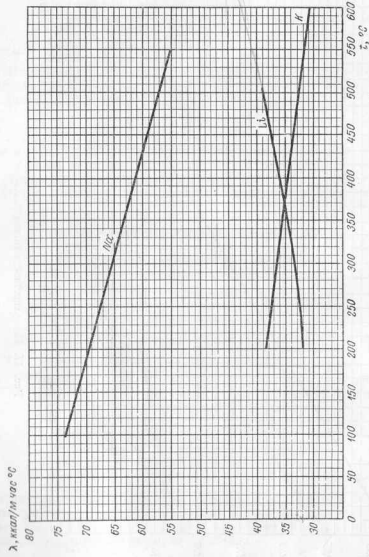


Рис. 18. Теплопроводность Na, K и Li.

Рис. 19

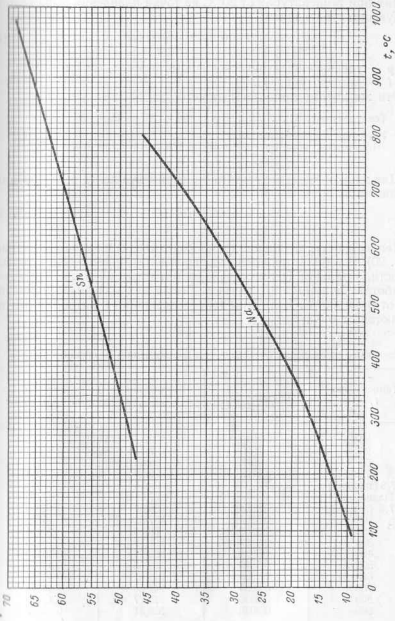


Рис. 19. Удельное электрическое сопротивление Na и Sn.

Удельное электрическое сопротивление натрия (рис. 19). По данным Нортрупа, электрическое сопротивление твердого натрия при температурах от 20° С до точки плавления выражается следующим уравнением:

$$\rho = 4,477 + 0,01932t + 0,00004t^2, \quad (7)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление, $\text{ом} \cdot \text{см} \times 10^9$;
 t — температура, °С.

Эти же данные приведены ниже:

Температура t , °С 0 20 40 60 80 97,8

Удельное электрическое сопротивление ρ , $\text{ом} \cdot \text{см} \times 10^9$ 4,477 4,879 5,314 5,780 6,279 6,749

Для жидкой фазы результаты экспериментальных исследований выражаются уравнением:

$$\rho = 6,225 + 0,0345t. \quad (8)$$

Теплоемкость, энтальпия (теплосодержание) и энтропия натрия (рис. 20). В табл. 4 приведены экспериментальные значения теплоемкости, энтальпии (теплосодержания) и энтропии Na, полученные в работах Гиннингса, Дугласа и Болла для интервала температур от 0 до 900° С. Величины теплосодержания и энтропии отсчитываются от 0° С.

Таблица 4

Удельная теплоемкость, энтальпия (теплосодержание) и энтропия натрия

Температура t , °С	Удельная теплоемкость c_p , ккал/кг°С	Энтальпия i , ккал/кг	Энтропия s , ккал/кг°С
0	0,2865	0	0
25	0,2920	7,23	0,02530
50	0,2999	14,63	0,04915
75	0,3123	22,28	0,07096
97,8 (твердый)	0,3258	29,55	0,09219
Плавление		27,05	0,07290
97,8 (жидкий)	0,3308	56,60	0,16508
100	0,3305	57,32	0,16703
200	0,3200	89,83	0,24424
300	0,3116	121,39	0,30480
400	0,3055	152,23	0,35440
500	0,3015	182,56	0,39640
600	0,2998	212,61	0,43298
700	0,3003	242,60	0,46548
800	0,3030	272,77	0,49496
900	0,3079	303,31	0,52216

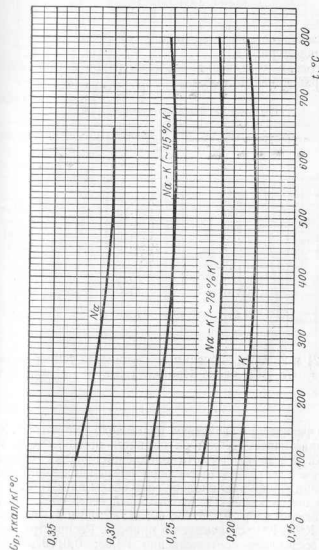


Рис. 20. Теплоемкость Na, K и сплавов Na—K.

Давление насыщенных паров натрия. По данным измерений давления насыщенных паров Na, произведенных Макензи, Мунделем и Селке [125] в температурном интервале от 620 до 1135° С, может быть составлено следующее уравнение:

$$\lg p = 4.521 - \frac{5220}{T}, \quad (9)$$

где p — давление насыщенных паров, кг/см^2 ;

T — температура, °К.

Табл. 5 содержит значения давлений паров натрия, соответствующие уравнению (9).

Таблица 5

Давление насыщенных паров натрия

Температура		Давление насыщенных паров	
$t, ^\circ\text{C}$	$T, ^\circ\text{K}$	$p, \text{кг/см}^2$	$p, \text{мм рт. ст.}$
127	400	$3,85 \cdot 10^{-9}$	$2,83 \cdot 10^{-4}$
227	500	$1,57 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-3}$
327	600	$6,85 \cdot 10^{-4}$	$5,03 \cdot 10^{-2}$
427	700	$1,20 \cdot 10^{-2}$	0,881
527	800	$10,25 \cdot 10^{-2}$	7,53
627	900	$5,44 \cdot 10^{-2}$	39,98
727	1000	0,202	148,5
827	1100	0,617	453,7
927	1200	1,53	1127,8
1027	1300	3,43	2522,4
1127	1400	6,39	4696,8

На рис. 21 и 22 даны значения коэффициента температуропроводности ($a = \lambda/c_p \gamma$) и числа Прандтля ($Pr = \nu/a$) для натрия.

2. Калий (К)

По своим физическим свойствам калий похож на натрий. Калий несколько пластичнее натрия; он плавится при 63,7° С и кипит при 753,8° С. Удельная теплота плавления калия составляет 2,26 ккал/кг, а удельная теплота парообразования 496,5 ккал/кг. При плавлении калий увеличивает свой объем на 2,41%.

Атомный номер калия 19, его атомный вес 39,096. Он имеет изотопы с массами ядер 37; 38; 39; 40; 41; 42; 43 и 44, из которых только K^{39} , K^{40} и K^{41} встречаются в природе. Распространенность последних составляет соответственно 93,08; 0,0119 и 6,91%.

Характеристики радиоактивных изотопов калия даны в табл. 6. Значения физических свойств калия приводятся на рисунках: 14 (γ), 16 (ν), 18 (λ), 20 (c_p), 21 (a), 22 ($Pr = \nu/a$), 23 (μ), 24 (ρ).

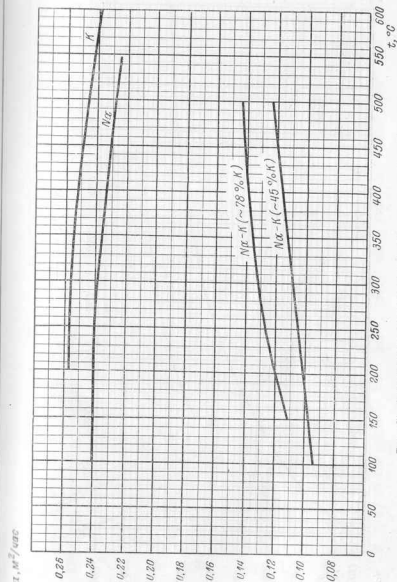


Рис. 21. Температуропроводность Na, К и сплавов Na—К.

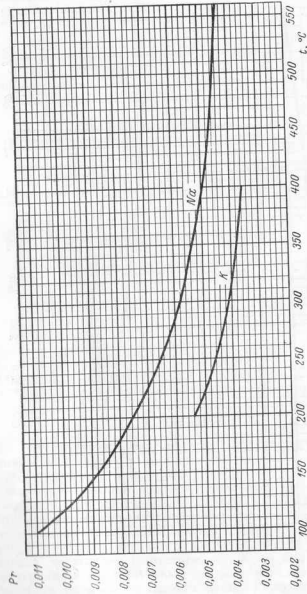


Рис. 22. Число $Pr = \frac{\nu}{a}$ для Na и K .

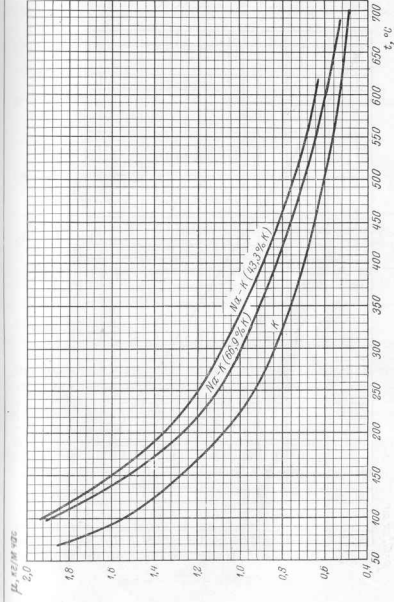


Рис. 23. Динамическая вязкость K и сплавов $Na-K$.

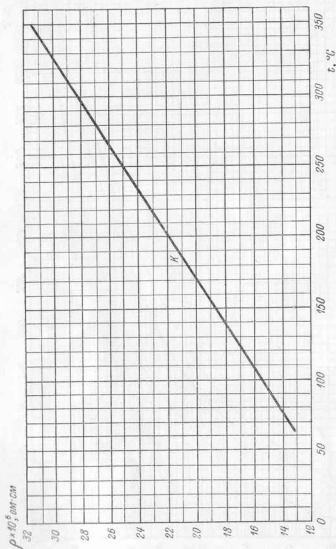


Рис. 24. Удельное электрическое сопротивление К.

Изотопы калия

Изотоп	Период полураспада	Испускаемые частицы	Энергия частиц, Мэв
K^{41}	1,3 сек.	Позитрон	4,6
K^{40}	7,7 мин.	Позитрон	2,8
		γ -частица	2,16
K^{40}	$1,32 \cdot 10^9$ лет	β -частица	1,33
		γ -частица	1,46
K^{42}	12,44 часа	β -частица	3,58 (75% β -частиц)
		β -частица	2,04 (25% β -частиц)
		γ -частица	1,51
K^{43}	22,4 часа	β -частица	0,81 и 0,24
K^{44}	18 мин.	β -частица	—

Поверхностное натяжение калия. Данные по поверхностному натяжению калия, полученные различными авторами, расходятся между собою. В области температур от точки плавления до 250° С коэффициент поверхностного натяжения лежит в пределах 90—120 дн/см.

Давление насыщенных паров калия. Ниже показана зависимость давления насыщенных паров калия от температуры:

Температура t , °С	342	443	581	635	696
Давление насыщенных паров p , мм рт. ст.	1,0	10	100	200	400

Эти данные описываются следующим уравнением, которое имеет точность 5% в пределах температур 600—1100° К и 20% в более широких пределах 350—1200° К:

$$\lg p = -\frac{4552}{T} - 0,5 \lg T + 8,793. \quad (10)$$

где p — давление паров, мм рт. ст.;
 T — температура, °К.

3. Сплавы натрий — калий (Na—K)

На рис. 25 показана диаграмма состояния сплавов Na—K. Сплавы с содержанием калия от 40 до 90%* представляют собой при комнатной температуре серебристо-белые жидкости, причем наименьшую температуру плавления ($-12,3^{\circ}\text{C}$) имеет сплав, содержащий 77,2% K (эвтектика). При изменении состава сплава по сравнению с эвтектическим температура его плавления постепенно увеличивается до температур плавления чистых компонентов с небольшим переделом левой ветви кривой в точке образования перитектики Na_2K .

Так как натрий и калий входят в одну и ту же группу периодической системы и близки по физическим и химическим свойствам, изменение в свойствах при переходе от чистых металлов к сплавам подчиняется обычным закономерностям, а именно: повышается химическая активность, уменьшается электро- и теплопроводность; некоторые характеристики приобретают промежуточные значения (теплоемкость, теплосодержание, вязкость, упругость насыщенных паров и удельный вес).

Поскольку приращение объема при плавлении компонентов сплава одинаковы и составляют $\sim 2,5\%$, можно предположить, что увеличение объема сплавов равно той же величине.

Исследования физических свойств проводились на сплавах различного состава, преимущественно на эвтектике (77,2% K). Комплексные данные по какому-либо сплаву в литературе отсутствуют.

Удельный вес сплавов Na—K (см. рис. 14). Удельный объем сплава может быть определен по следующей формуле:

$$V = M_K V_K + M_{\text{Na}} V_{\text{Na}}, \quad (11)$$

где V — удельный объем сплава, $\text{м}^3/\text{кг}$;
 V_K — удельный объем K, $\text{м}^3/\text{кг}$;
 V_{Na} — удельный объем Na, $\text{м}^3/\text{кг}$;
 M_K — молярная доля K в сплаве;
 M_{Na} — молярная доля Na в сплаве.

В табл. 7 приведены экспериментальные значения удельных весов натрия, калия и их сплава двух составов. Для сравнения в этой же таблице приведены расчетные значения γ , полученные в соответствии с формулой (11).

Вязкость сплавов Na—K (см. рис. 16 и 23). На рис. 23 даны значения динамической вязкости сплавов Na—K, найденные Эвингом, Грандом и Миллером [79]. Изменение вязкости с температурой достаточно точно выражается следующим уравнением Андраде:

$$\mu = A \tau^{0,333} e^{\frac{C\tau}{T}}. \quad (12)$$

* Здесь и в дальнейшем состав сплава указывается в весовых процентах.

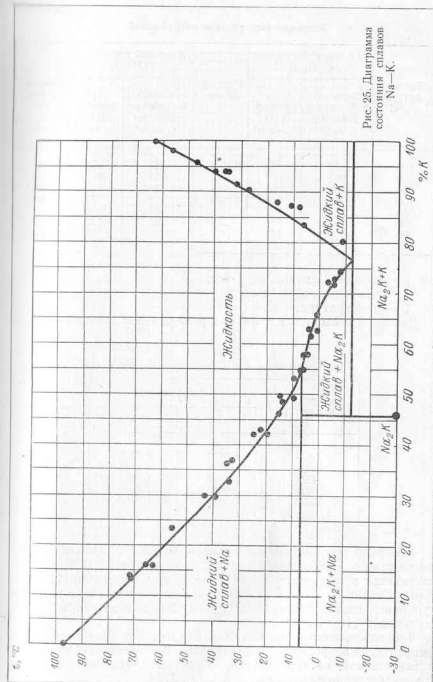


Рис. 25. Диаграмма состояния сплавов Na—K.

Таблица 7

Удельные веса сплавов натрий-калий

Температура $t, ^\circ\text{C}$	Удельный вес сплава 43,4% К		Расхождение, %	Удельный вес сплава 78,6% К		Расхождение, %
	Экспериментальные значения $\gamma, \text{кг/м}^3$	По формуле (11) $\gamma, \text{кг/м}^3$		Экспериментальные значения $\gamma, \text{кг/м}^3$	По формуле (11) $\gamma, \text{кг/м}^3$	
100	887	890	0,3	847	850	0,3
200	862	867	0,6	823	827	0,4
300	838	843	0,6	799	802	0,3
400	814	818	0,5	775	778	0,4
500	789	794	0,6	751	754	0,7
600	765	771	0,8	727	732	0,7
700	740	745	0,7	703	705	0,3

где η — вязкость сплава, $\text{кг/м} \cdot \text{час}$;

γ — удельный вес, кг/м^3 ;

T — температура, $^\circ\text{K}$.

Значения постоянных A и C для ряда сплавов даны в табл. 8.

Таблица 8

Коэффициенты A и C уравнения Андраэ

Содержание калия, %	Коэффициент	
	A	C
0	0,0412	0,7398
28,3	0,0377	0,7433
43,3	0,0379	0,7223
69,9	0,0381	0,6940
100	0,0349	0,7160

Поверхностное натяжение сплавов Na—K. Коэффициент поверхностного натяжения сплава, содержащего 78% калия, изменяется в пределах 100—110 дин/см при изменении температуры от точки плавления до 250° C. В этом же интервале температур поверхностное натяжение сплава, содержащего 56% калия, составляет 110—120 дин/см .

Теплопроводность сплавов Na—K (рис. 26). Значения коэффициента теплопроводности сплава Na—K, нанесенные на график в зависимости от его состава, образуют U-образную кривую, сравнительно пологую в средней части [78].

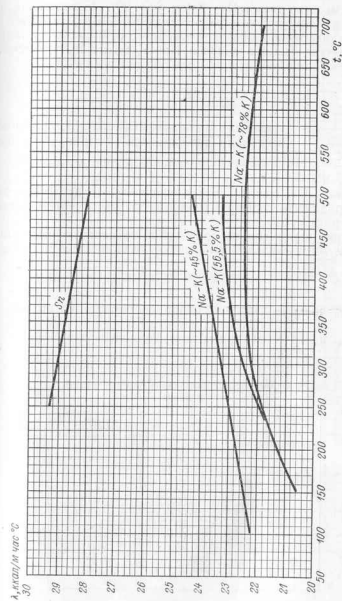


Рис. 26. Теплопроводность Sn и сплавов Na—K.

Электрическое сопротивление сплавов Na—K. Значения удельного электрического сопротивления, полученные Рахизером, Вернером и Джексоном, приводятся на рис. 27.

Теплоемкость сплавов Na—K (см. рис. 20). Исследования, проведенные в Национальном бюро стандартов США Дугласом, Боллом и Гиннингсом в диапазоне температур от 0 до 800° С, показывают, что теплоемкость сплавов Na—K может быть рассчитана по теплоемкостям компонентов следующим образом:

$$c_p = W_{Na}c_{pNa} + W_Kc_{pK}, \quad (13)$$

где c_p — удельная теплоемкость сплава, ккал/кг °С;
 c_{pNa} — удельная теплоемкость натрия, ккал/кг °С;
 c_{pK} — удельная теплоемкость калия, ккал/кг °С;
 W_{Na} , W_K — весовые доли Na и K в сплаве.

Давление насыщенных паров сплавов Na—K. Температура кипения ряда сплавов натрия — калий при атмосферном давлении показана на рис. 28.

Давление паров сплава при данной температуре подчиняется закону Рауля и, следовательно, может быть найдено по формуле:

$$p = M_{Na}p_{Na} + M_Kp_K, \quad (14)$$

где p , p_{Na} и p_K — давление паров соответственно сплава, чистого Na и чистого K;

M_{Na} и M_K — молярные доли компонентов в сплаве.

Таблица 9

Давление насыщенных паров сплавов натрия и калия

Температура t , °С	Давление насыщенных паров p , мм рт. ст.	
	Сплав 56% K	Сплав 78% K
227	0,00157	0,00181
327	0,0573	0,0614
427	3,53	5,06
527	23,0	31,87
627	101,35	136,50
627	328,7	431,85
827	864,2	1009,52

В табл. 9 даются рассчитанные таким образом величины давления паров. Входящее в формулу (14) давление паров натрия

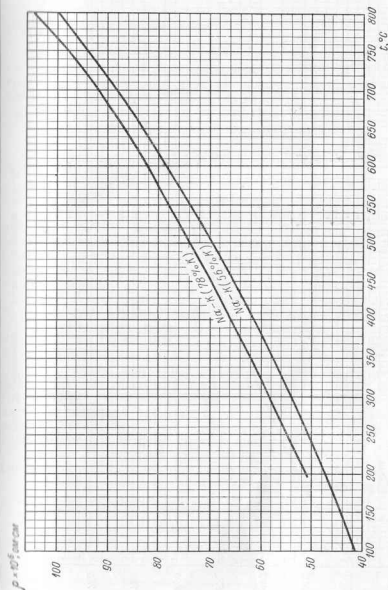
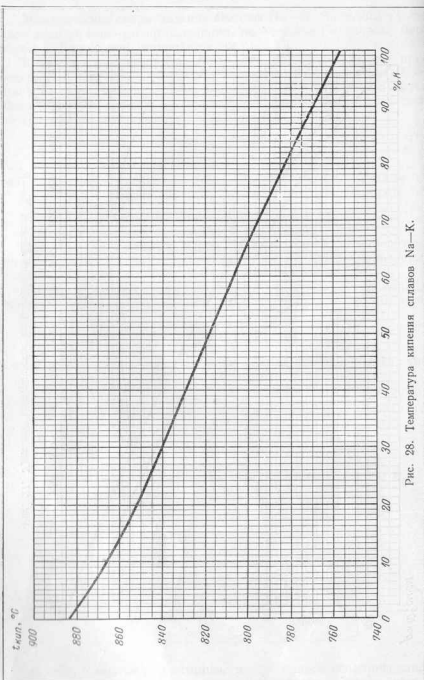


Рис. 27. Удельное электрическое сопротивление сплавов Na—K.



находится из табл. 5, а давление паров калия определяется из уравнения ¹:

$$\lg p_K = 4.100 - \frac{4207}{T}, \quad (15)$$

где p_K — давление паров, кг/см²;
 T — температура, °K.

Соотношение (15) выражает результаты измерений, проведенных Маккензи и др. в области температур 850—1280° K.

Данные по физическим свойствам сплавов Na—K даются также в виде графиков на рис. 21 ($\alpha = \lambda/c_p \tau$) и 29 ($Pr = \nu/a$).

4. Литий (Li)

Металлический литий мягок и тягуч. Он тверже натрия, однако легко коется при комнатной температуре.

Литий плавится при $\sim 186^\circ \text{C}$, имея скрытую теплоту плавления, равную 32,8 ккал/кг. Увеличение объема при плавлении составляет 1,5%. Температура кипения лития равна 1317° C. Скрытая теплота парообразования Li, определенная расчетным путем из данных по упругости его паров, составляет ~ 5000 ккал/кг.

Значения физических свойств лития приводятся на рисунках: 18 (λ), 30 (ν), 31 (γ), 32 (τ), 33 (c_p), 34 ($\alpha = \lambda/c_p \tau$), 35 ($Pr = \nu/a$).

Теплопроводность лития. В точке плавления она составляет примерно 35 ккал/м·час °C; а при температуре 250° C — 43 ккал/м·час °C².

Электрическое сопротивление лития. В области температур 200—300° C оно равно в среднем $45 \cdot 10^{-6}$ ом·см.

Удельная теплоемкость лития. Среднее значение теплоемкости лития в диапазоне температур 430—730° C можно принимать равным 1,081 ккал/кг °C, а в диапазоне температур 730—1230° C — 1,008 ккал/кг °C.

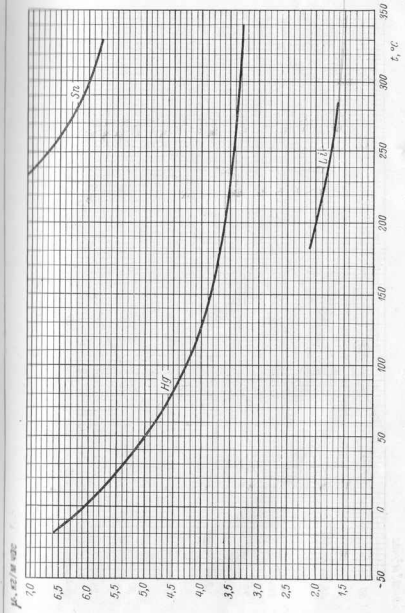
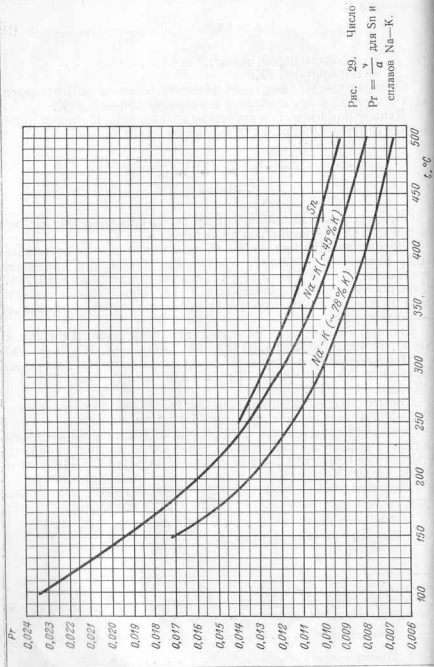
Давление насыщенных паров лития. В зависимости от температуры давление насыщенных паров будет следующим:

Температура t , °C	745	890	1084	1156	1236
Давление насыщенных паров p , мм рт. ст.	1.0	10	100	200	400

¹ Или из уравнения (10).

² В книге М. А. Михеева, Основы теплопередачи, 1956, приводятся следующие данные по теплопроводности лития (рис. 18):

Температура, °C	200	300	400	500
Теплопроводность, ккал/м·час °C	32,0	33,5	36,0	39,0



16.350
300 32.7
1.10 $\frac{1}{\text{cm}}$
73.4-500°C

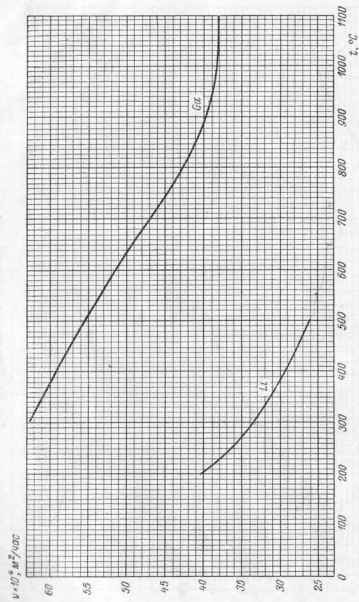


Рис. 31. Кинематическая вязкость Li и Ga.

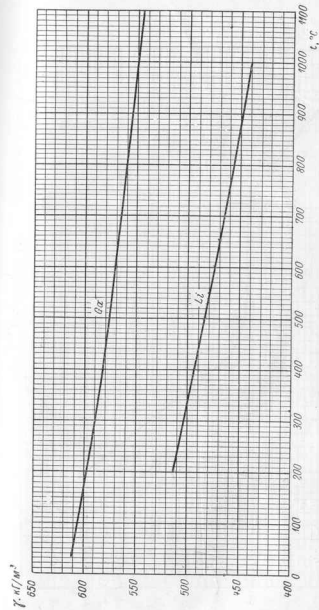


Рис. 32. Удельный вес Li и Ga.

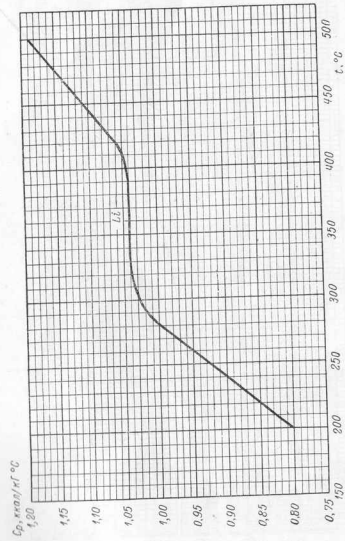


Рис. 33. Теплоемкость Li.

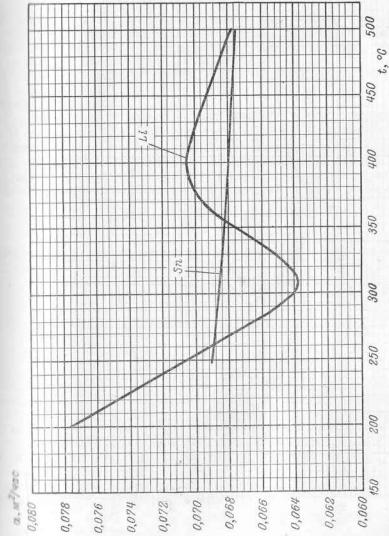


Рис. 34. Температуропроводность Li и Sn.

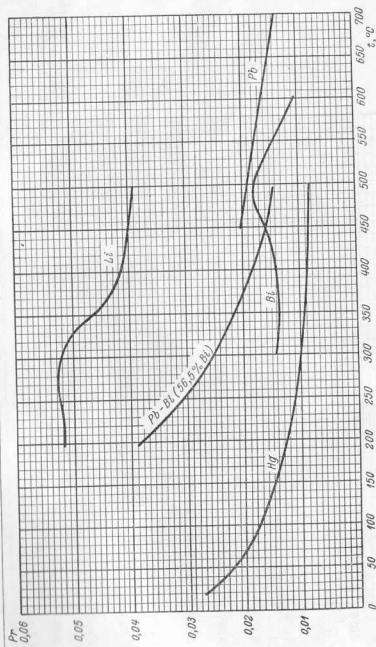


Рис. 35. Число $Pr = \frac{\gamma}{a}$ для Li, Hg, Pb, Bi и сплава Pb-Bi.

Данным значениям упругости паров соответствует уравнение, справедливое с точностью до 10% в диапазоне температур 1100—1400° K и с точностью до 30% в диапазоне 700—1600° K:

$$\lg p = -\frac{8143}{T} + 8,0 \quad (16)$$

где p — давление паров, мм рт. ст.;
 T — температура, °K:

5. Галлий (Ga)

Галлий плавится при 29,78° C, кипит при 1933° C. Скрытые теплоты плавления и парообразования Ga составляют соответственно 19,16 ккал/кг и 1014 ккал/кг. Уменьшение объема металла при плавлении равно 3,1%.

Значения физических свойств галлия приводятся на рисунках: 15 (и), 30 (и), 32 (и).

Теплопроводность галлия. Полученная расчетным путем для области температур, близких к точке плавления, она составляет 96—32 ккал/м·час °C.

Удельная теплоемкость галлия. В интервале температур 12,5—900° C меняется мало, составляя в среднем 0,082 ккал/кг °C.

Давление насыщенных паров галлия. Зависимость давления насыщенных паров галлия от температуры приведена ниже:

Температура t , °C	1315	1497	1726	1807	1895
Давление насыщенных паров p , мм рт. ст.	1,0	10	100	200	400

Экспериментальным данным по давлению паров галлия соответствует следующее уравнение

$$\lg p = -\frac{15450}{T} + 6,861, \quad (17)$$

где p — давление насыщенных паров, кг/см²;
 T — температура, °K.

6. Ртуть (Hg)

Физические свойства ртути изучены достаточно хорошо. Ртуть плавится при —38,87° C и кипит при 357° C, имея скрытую теплоту плавления 2,8 ккал/кг и скрытую теплоту парообразования 60,5 ккал/кг. Увеличение объема при плавлении составляет 3,6%.

Значения физических свойств ртути приводятся на рисунках: 30 (и), 35 (и), 36 (и), 37 (и), 38 (и), 39 (и), 40 (и), 41 (и), 42 (и).

Давление насыщенных паров ртути. Зависимость давления ртутных паров от температуры приведена ниже:

Температура t , °C	126,2	184,0	261,7	290,7	323,0
Давление насыщенных паров p , мм рт. ст.	1,0	10	100	200	400

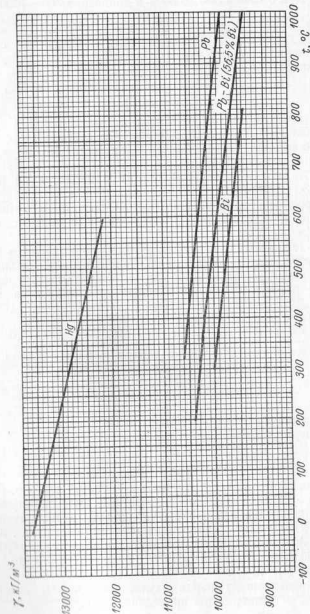


Рис. 36. Удельный вес Hg, Pb, Bi и сплава Pb—Bi.

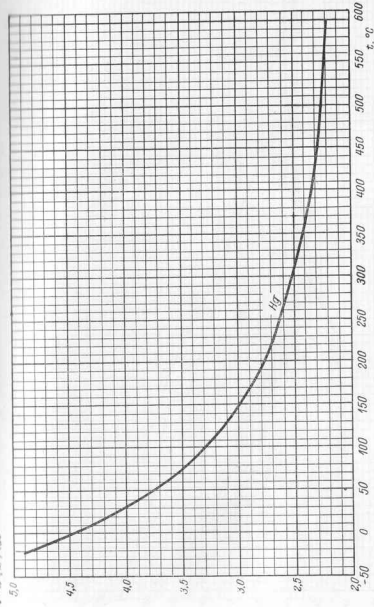
 $\eta \cdot 10^{-2}, \text{м}^2/\text{сек}$ 

Рис. 37. Кинематическая вязкость Hg.

$\lambda, \text{ккал/м}^2 \text{с}^{\circ}\text{C}$

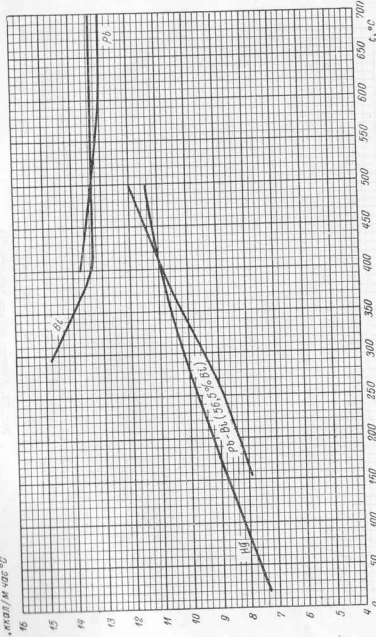


Рис. 38. Теплопроводность Hg, Pb, Bi и сплава Pb-Bi.

$C_p, \text{ккал/кг}^{\circ}\text{C}$

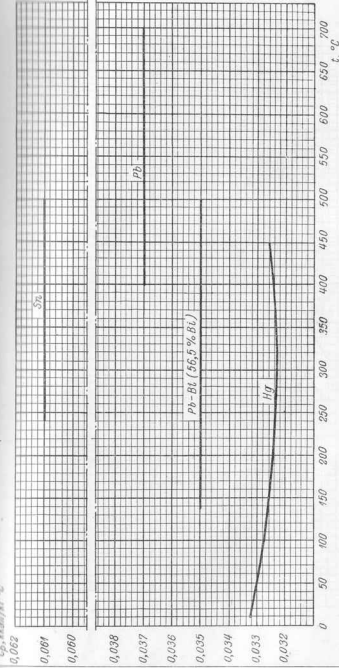


Рис. 39. Теплоемкость Hg, Sn, Pb и сплава Pb-Bi.

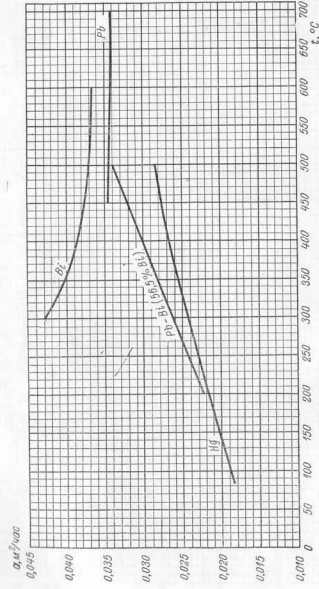


Рис. 40. Температуропроводность Hg, Pb, Bi и сплава Pb—Bi.

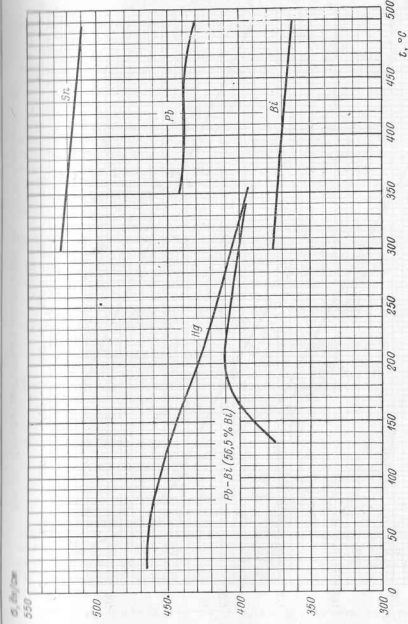


Рис. 41. Поверхностное натяжение Hg, Sn, Pb, Bi и сплава Pb—Bi.

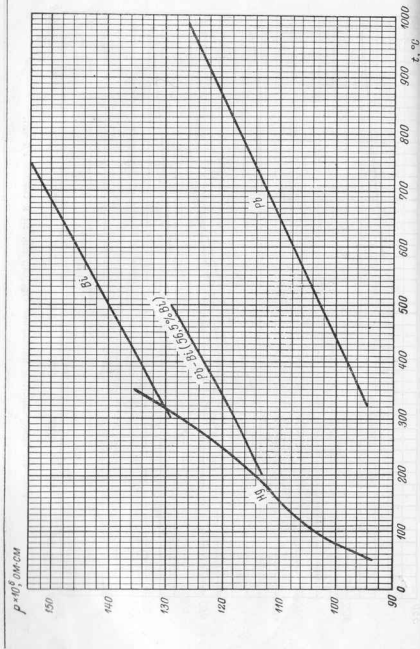


Рис. 42. Удельное электрическое сопротивление Hg, Pb, Bi и сплава Pb—Bi.

Эта зависимость выражается следующим уравнением:

$$\lg p = -\frac{3308}{T} - 0.8 \lg T + 10.3736, \quad (18)$$

где p — давление паров, мм рт. ст.;

T — температура, °K.

Уравнение (18) в интервале температур 400—800° K имеет точность до 2%, а в интервале 230—850° K — до 5%.

7. Олово (Sn)

Температура плавления олова 231,9° C; температура кипения 2270° C. Скрытая теплота плавления равняется 14,5 ккал/кг, теплота парообразования 573 ккал/кг. При плавлении олово увеличивает объем на 2,6%.

Значения физических свойств олова приводятся на рисунках: 19 (ρ), 26 (λ), 29 (Pг = √α), 30 (μ), 34 (α), 39 (с_p), 41 (σ), 43 (γ), 44 (ν).

Удельная теплоемкость олова. При температурах, близких к точке плавления, теплоемкость олова составляет ~ 0,059 ккал/кг °C. С повышением температуры теплоемкость увеличивается, достигая 0,0758 ккал/кг °C при $t = 1100^\circ$ C. Среднее значение теплоемкости в диапазоне 250—1000° C можно принимать равным 0,061 ккал/кг °C.

Давление насыщенных паров олова. Зависимость давления паров олова от температуры следующая:

Температура t , °C	1492	1703	1968	2063	2169
Давление насыщенных паров p , мм рт. ст.	1,0	10	100	200	400

Приведенной зависимости соответствует уравнение:

$$\lg p = -\frac{16.63}{T} + 6.556, \quad (19)$$

где p — давление паров, кг/см²;

T — температура, °K.

8. Висмут (Bi)

Висмут плавится при 271,0° C. Величины скрытой теплоты его плавления по данным различных авторов значительно расходятся между собой (в пределах 12—14 ккал/кг). Объем металла при плавлении уменьшается на 3,32%. Точка кипения висмута равна 1477° C; скрытая теплота парообразования 204,3 ккал/кг.

* По Герцу $\lg p = 9.907 - \frac{3276.6}{T} - 0.652 \lg T$. Таблицы ртутного пара вычислялись Шелдоном, а также Эком (А. Н. Ложкин и А. А. Канаяев, Бинарные установки, Машгиз, 1946). Ред.

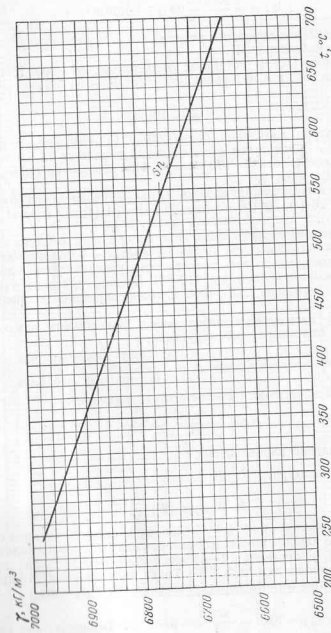


Рис. 43. Удельный вес Sn.

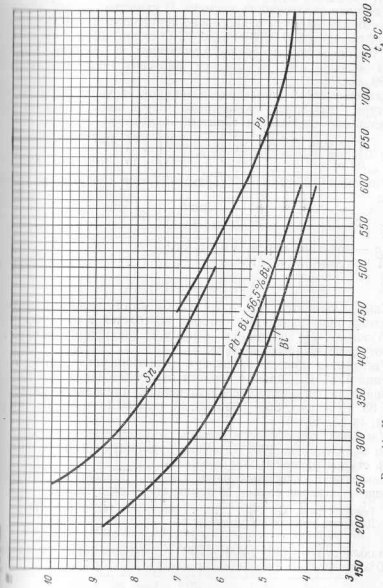


Рис. 44. Кинематическая вязкость Sn, Pb, Bi и сплавов Pb-Bi.

Значения физических свойств висмута приводятся на рисунках: 35 (Pr = $\sqrt{a}$), 36 (γ), 38 (λ), 40 ($a = \lambda/c_p \gamma$), 41 (σ), 42 (ρ), 44 (ν), 45 (μ), 46 (c_p).

Удельная теплоемкость висмута. В качестве средней величины теплоемкости висмута в диапазоне температур $t = 300 \div 600^\circ \text{C}$ можно принимать $0,0373 \text{ ккал/кг}^\circ \text{C}$ (с очень небольшим повышением против истинного среднего значения). В области температур $t = 271 \div 1027^\circ \text{C}$ среднее значение теплоемкости равно $0,0359 \text{ ккал/кг}^\circ \text{C}$.

Давление насыщенных паров висмута. В зависимости от температуры давление насыщенных паров висмута может быть представлено следующим образом:

Температура $t, ^\circ \text{C}$	917	1067	1257	1325	1400
Давление насыщенных паров p , мм рт. ст.	1,0	10	100	200	400

Указанная зависимость характеризуется следующим уравнением:

$$\lg p = -\frac{10660}{T} + 8,976. \quad (20)$$

где p — давление паров, мм рт. ст.;
 T — температура, $^\circ \text{K}$.

9. Свинец (Pb)

Свинец плавится при $327,4^\circ \text{C}$. Скрытая теплота плавления по измерениям различных авторов колеблется в пределах $4,9 \div 6,5 \text{ ккал/кг}$. По последним данным, можно принимать скрытую теплоту плавления $5,5 \text{ ккал/кг}$.

Увеличение объема свинца при плавлении равно $3,6\%$. Точка кипения 1737°C . Скрытая теплота парообразования 203 ккал/кг . Значения физических свойств свинца приводятся на рисунках: 35 (Pr = $\sqrt{a}$), 36 (γ), 38 (λ), 39 (c_p), 40 ($a = \lambda/c_p \gamma$), 41 (σ), 42 (ρ), 44 (ν), 45 (μ).

Удельная теплоемкость свинца. В интервале температур от точки плавления до 1000°C можно принимать среднюю теплоемкость свинца равной $0,0328 \text{ ккал/кг}^\circ \text{C}$.

Давление насыщенных паров свинца. Зависимость давления насыщенных паров свинца от температуры следующая:

Температура $t, ^\circ \text{C}$	987	1167	1417	1508	1611
Давление насыщенных паров p , мм рт. ст.	1,0	10	100	200	400

В области температур $900 \div 1200^\circ \text{K}$ давление паров с точностью до 20% может быть представлено следующей формулой:

$$\lg p = -\frac{9870}{T} + 7,85, \quad (21)$$

где p — давление паров, мм рт. ст.;
 T — температура, $^\circ \text{K}$.

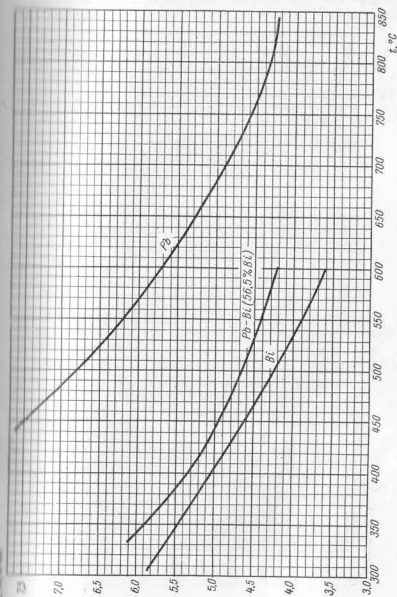


Рис. 45. Динамическая вязкость Pb, Bi и сплавов Pb—Bi.

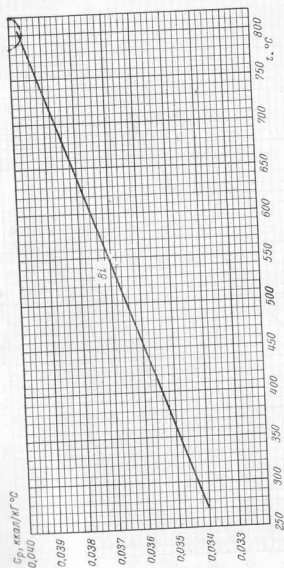


Рис. 46. Теплоемкость Bi.

10. Эвтектический сплав свинца и висмута

На рис. 47 показана диаграмма состояния системы свинец—висмут. Температура плавления сплава, соответствующего эвтекти-

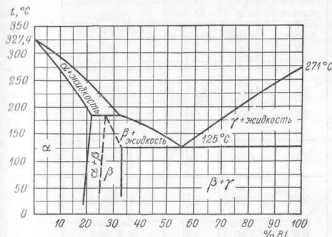


Рис. 47. Диаграмма состояния системы Pb—Bi.

ческой точке диаграммы (43,5% Pb; 56,5% Bi), составляет 125° С. Точка кипения сплава 1670° С. Увеличение объема сплава при плавлении составляет 1,3%.

Таблица 10

Удельный вес сплавов свинец—висмут,
близких по составу к эвтектике

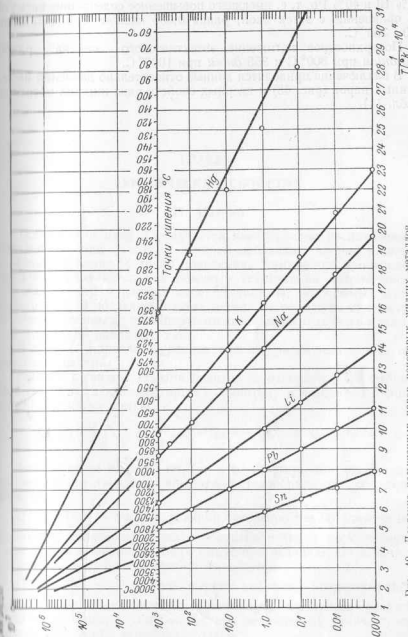
Температура $t, ^\circ\text{C}$	Удельный вес γ , кг/м ³
305	10 160 (44,5% Pb; 55,5% Bi)
200	10 300 (40% Pb; 60% Bi)
300	10 200 (40% Pb; 60% Bi)
400	10 100 (40% Pb; 60% Bi)
500	10 020 (40% Pb; 60% Bi)

Значения физических свойств эвтектического сплава приводятся в табл. 10, а также на рисунках: 35 ($\rho = \gamma/a$), 36 (γ), 38 (λ), 39 (c_p), 40 ($a = \lambda/c_p \gamma$), 41 (α), 42 (ρ), 44 (γ), 45 (μ).

Таблица 11

Ядерные свойства некоторых жидких металлов [44]

Изотопы	Относительное содержание, %	Сечение поглощения тепловых нейтронов, барны	Образующиеся изотопы	Период полураспада	Излучаемая энергия и вид частиц, Мэв
Литий 6 7	7,5 92,5	65 870 0,033	$\text{He}_4^2 + \text{H}_1^1$ Li_3^3	31 год 0,85 сек.	0,015 β 13,0 β 1,4 β
Натрий 23	100	0,45	Na_{24}^{11}	14,8 часа	1,4 β ; 1,38 β ; 2,76 β
Калий 39 40 41	93,4 0,01 6,6	1,97 1,87 ~ 70 1,19	K_{40}^{19} A_{40}^{10} K_{42}^{20}	$1,3 \times 10^9$ лет Устойчив 12,4 часа	1,46 γ 1,36 β — 3,6 β 1,9 β 1,51 γ
Ртуть 196 198 199 200 201 202 204	0,15 10,1 17,0 23,3 13,2 29,6 6,7	430 3100 20 2500 60 60 2,4 0,34	Hg_{197}^{80} Hg_{199}^{80} Hg_{200}^{80} Hg_{201}^{80} Ng_{202}^{80} Ng_{203}^{80} Ng_{204}^{80}	64 часа 23 часа Устойчив Устойчив Устойчив Устойчив 47 дней 5,5 мин.	0,08 } изомериче- 0,16 } ские формы
Свинец 204 206 207 208	1,5 23,6 22,6 52,3	0,2 Очень мало	Активность пренебрежимо мала	—	
Висмут 209	100	0,015	RaE_{210} Окончательно Po_{210}	5 дней	1,17 β 5,3 α



Удельная теплоемкость. Теплоемкость сплава, содержащего 60% Вi и 40% Pb, т. е. имеющего повышенное содержание висмута по сравнению с эвтектикой, равна 0,035 ккал/кг °С в диапазоне 150—350° С.

Поверхностное натяжение эвтектического сплава равно 370 дн/см при 800° С и 355 дн/см при 1000° С.

В заключение приводятся данные относительно давления насыщенных паров (рис. 48) и ядерных свойств ряда жидких металлов (табл. 11).

ГЛАВА II

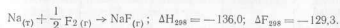
ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

11. Натрий

Технический натрий получается электролизом расплавленной поваренной соли (NaCl), к которой добавляют хлорид кальция с целью снижения ее точки плавления. Химической промышленностью изготавливается как обычный технический натрий чистотой 99,8%, так и натрий высокой чистоты, получаемый путем фильтрации. В последнем случае металл на всем пути от электролитической ванны до транспортного контейнера находится в защитной атмосфере инертного газа.

В табл. 12 приводятся данные анализа различных сортов технического натрия.

Реакции с газами. Натрий инертен по отношению к благородным газам: гелию, неону, аргону, криптону и ксенону. Во фторе натрий воспламеняется:



Здесь и далее индексы (т), (ж) и (г) приняты для обозначения соответственно твердого, жидкого и газообразного состояния вещества.

$\Delta H \left[\frac{\text{ккал}}{\text{моль}} \right]$ — теплота реакции, численно равная увеличению энтальпии (теплосодержания) продуктов реакции по сравнению с исходными веществами. Знак минус при величине ΔH означает, что теплота в процессе реакции выделяется.

$\Delta F \left[\frac{\text{ккал}}{\text{моль}} \right]$ — свободная энергия реакции, представляющая разность термодинамических потенциалов продуктов реакции и исходных веществ. Знак минус при величине ΔF означает, что термодинамический потенциал убывает.

Величины ΔH и ΔF отнесены к температуре 298° К и давлению 1 атм.

Таблица 12

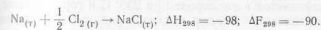
Содержание примесей в натрии
(в десятичных долях процента)

Название элемента или соединения	Натрий			дистиллированный	фильтрованный
	обычный технический				
	США (условия поставки)	США (данные анализа)	Английские данные		
Калий	—	<100	450	—	—
Кальций	120	190	125	<50	<10
Барий	—	2(с)	—	—	—
Медь	—	2(с)	5	10	5
Железо	20	2,5(к)	500	5	—
Магний	—	<10(с)	1750	25	10
Кремний	70	<5(к)	—	—	—
Стронций	—	<5(с)	1750	<10	<10
Хлориды	—	<5(к)	—	—	—
Свинец	—	5(с)	25	—	<5
Фосфор	50	1(к)	—	<10	<10
Литий	—	<10	—	—	—
Никель	4	20	—	10	<10
Бор	500	2(с)	—	—	—
Алюминий	10	<0,5(к)	—	—	—
Сера	90	4(с)	—	—	—
Бериллий	—	1(к)	125	2	2
Кислород	—	10(с)	—	—	—
Кадмий	—	7(к)	—	—	—
Марганец	—	15	—	—	—
Серебро	—	—	25	60	60
Ванадий	—	<1(с)	—	—	—
Хром	—	<2(с)	—	—	—
Кобальт	—	<1(с)	—	—	—
Цезий	—	<5(с)	—	—	—
Водород	—	<1(к)	—	—	—
Углерод	—	<5(с)	—	—	—
Уран	—	2(с)	—	—	—
	—	<10	—	—	—
	—	60	—	—	—
	—	30	—	—	—
	—	<5	—	—	—

Примечание. (с) — данные спектрального анализа;
(к) — данные колориметрического анализа.

Примечание. (с) — данные спектрального анализа;
(к) — данные колориметрического анализа.

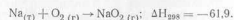
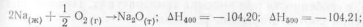
Реакция натрия с хлором при комнатной температуре протекает медленно, но расплавленный натрий воспламеняется в хлоре:



Натрий легко горит на воздухе с образованием плотных паров окиси (Na_2O). Расплавленный натрий может самопроизвольно воспламениться на воздухе. Кислород, тщательно просушенный пропусканием через P_2O_5 , вступает при комнатной температуре в реакцию с твердым натрием, однако окисляется из-за образования пленки окиси на поверхности металла. В атмосфере чистого кислорода жидкий натрий горит желтым пламенем, образуя смесь окиси (Na_2O) и перекиси (Na_2O_2). Исследование кинетики реакции паров натрия с кислородом при низких давлениях и температуре $\sim 250^\circ\text{C}$ свидетельствует о первоначальном образовании высшего окисла (NaO_2), а затем перекиси (Na_2O_2). Оба соединения нестабильны в присутствии жидкого натрия и переходят в окись (Na_2O).

Как показывают расчетные и экспериментальные данные [100], максимальные величины давления и температуры, достигаемые при взаимодействии натрия с кислородом воздуха в замкнутом сосуде, соответственно равны $\sim 3 \text{ атм}$ и 100°C (независимо от количества натрия и размеров сосуда). Зависимость мгновенного максимального давления от концентрации кислорода в газе показана на рис. 49.

Реакции окисления натрия описываются следующими уравнениями:



Растворимость кислорода в натрии показана на рис. 50.

В реакцию с водородом расплавленный натрий вступает лишь при температурах, больших 200°C , образуя гидрид:

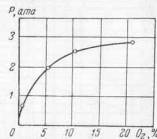


Рис. 49. Зависимость мгновенного максимального давления, развивающегося при реакции $\text{Na} + \text{O}_2$, от содержания кислорода в газе.

Гидрид натрия представляет собой гигроскопичный серовато-белый порошок, разлагающийся при температуре $\sim 430^\circ\text{C}$. Он воспламеняется в кислороде при 230°C и горит в присутствии других окислителей. Гидрид является сильным восстановителем. Кривая растворимости NaH в натрии в зависимости от температуры показана на рис. 51.

С азотом натрий, по-видимому, не вступает в реакцию, по крайней мере, в области температур, представляющей практический интерес. Тем не менее, по некоторым данным, в среде азота, акти-

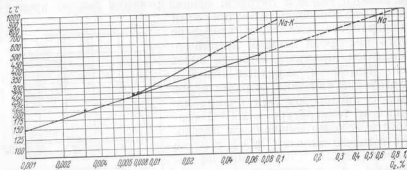


Рис. 50. Растворимость кислорода в натрии и сплаве Na—K.

вированного электрическим разрядом, натрий образует нитрид или азид. В присутствии углерода натрий может вступать в реакцию с азотом, образуя цианид натрия.

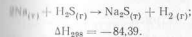
Реакция натрия с углеводородами заключается в замещении водорода металлом и образовании натриевой соли. Из всех газообразных углеводородов только парафины (предельные углеводороды) инертны по отношению к Na. Натрий слабо реагирует с фтористым водородом при комнатной температуре, а с хлористым водородом — даже при температуре плавления. В то же время все галогенозамещенные углеводороды взаимодействуют с ним бурно, в особенности при высоких температурах. Ниже приводятся уравнения соответствующих реакций:

	ΔH_{298}	ΔF_{298}
$\text{Na}_{(r)} + \text{HF}_{(r)} \rightarrow \text{NaF}_{(r)} + \frac{1}{2} \text{H}_{2(r)}$	-71,80	-64,60
$\text{Na}_{(r)} + \text{HCl}_{(r)} \rightarrow \text{NaCl}_{(r)} + \frac{1}{2} \text{H}_{2(r)}$	-76,17	-69,02
$\text{Na}_{(r)} + \text{HBr}_{(r)} \rightarrow \text{NaBr}_{(r)} + \frac{1}{2} \text{H}_{2(r)}$	-81,37	—
$\text{Na}_{(r)} + \text{HI}_{(r)} \rightarrow \text{NaI}_{(r)} + \frac{1}{2} \text{H}_{2(r)}$	-75,04	—

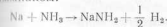
Реакция взаимодействия натрия с водяным паром подчиняется уравнению:

	ΔH	ΔF
$\text{Na}_{(m)} + \text{H}_2\text{O}_{(r)} \rightarrow \text{NaOH}_{(r)} + \frac{1}{2} \text{H}_{2(r)}$		
при $T = 400^\circ\text{K}$	-45,56	-34,40
при $T = 500^\circ\text{K}$	-44,87	-28,91

Натрий вступает в реакцию с сероводородом при обычной температуре, а находясь в расплавленном состоянии, горит в нем:



Натрий растворяется в жидком аммиаке. Медленная реакция образования амида катализируется солями железа, кобальта или никеля. Когда температура достигает 300°C , натрий энергично взаимодействует с аммиаком:



При более высоких температурах амид разлагается, образуя смесь натрия, гидроксида натрия, азота и водорода. При температурах, больших 425°C , взаимодействие натрия с аммиаком маловероятно, так как последний разлагается на азот и водород.

При взаимодействии натрия с ацетиленом образуется ацетилид натрия (Na_2C_2) и водород:



Газы, содержащие галогены, как правило, взаимодействуют с Na с замещением радикала и образованием соли. Окиси галогенов бурно реагируют с расплавленным натрием, однако эти реакции мало изучены. Шестифтористая сера не вступает в реакцию с натрием при температурах вплоть до точки его кипения. Раствор натрия в жидком аммиаке является единственным известным веществом, который вступает в реакцию с фтористым водородом при комнатной температуре. Четырехфтористый кремний при нагревании взаимодействует с Na, образуя кремний и фторид

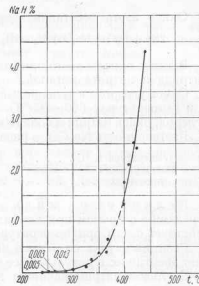
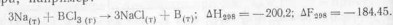


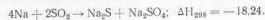
Рис. 51. Растворимость NaH в натрии.

натрия. Для получения чистого бора используется реакция между измельченным натрием и галогеносодержащими соединениями бора, например:



Газы, содержащие кислород, при взаимодействии с Na образуют или окиси натрия, или его соли.

При реакции Na с двуокисью серы получаются сульфид и сульфат металла:



Окись азота восстанавливается натрием:



Высшие окислы азота при взаимодействии с Na образуют смеси нитрида и нитрата металла.

Окись углерода и углекислый газ вступают в реакцию с натрием при температурах 600—800° С. При этом получаются свободный углерод, окись натрия и сода (Na_2CO_3).

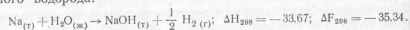
Растворимость Na_2CO_3 в расплавленном натрии показана ниже:

Температура t , °С	150	200	300	385
Растворимость в весовых процентах	0,002	0,005	0,016	0,027

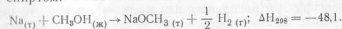
Реакции с жидкостями. Натрий не вступает в реакцию с бромом при комнатной температуре и слабо взаимодействует с ним при температуре ~ 200° С.

Реакция натрия со ртутью является экзотермической и протекает энергично; в результате ее образуется амальгама Na.

Со льдом натрий начинает заметным образом взаимодействовать при температурах, больших —98° С; реакция его с водой носит бурный характер и сопровождается выделением газообразного водорода:



Со спиртом натрий реагирует несколько медленнее, чем с водой, причем скорость реакции уменьшается с переходом от низших спиртов к высшим. В качестве примера приведем реакцию с метиловым спиртом:



По отношению к жидким предельным углеводородам натрий инертен.

Кипящая хлористая сера (точка кипения 138° С) не вступает в реакцию с натрием, в то время как хлористый тионил (SOCl_2)

полностью поглощается им при температуре, близкой к точке плавления металла.

Твердый натрий взаимодействует с пятихлористым фосфором при комнатной температуре, но реакция быстро прекращается вследствие образования на поверхности металла пленки из NaCl. Расплавленный натрий мгновенно воспламеняется при соприкосновении с пятихлористым фосфором; при этом образуется треххлористый фосфор или, при избытке металла, фосфид натрия. Треххлористый фосфор вступает в реакцию с натрием, описываемую следующим уравнением:



При температурах, равных точке плавления Na и выше, эта реакция носит взрывной характер. Взаимодействие натрия с четыреххлористым углеродом также имеет характер взрыва.

Расплавленный натрий воздействует на все органические соединения, кроме парафинов (предельных углеводородов); галогены переходят в галоиды натрия, азот — в цианистый натрий, сера — в сернистый натрий, а кислород — в окись натрия или Na_2CO_3 .

Галоиды кремния, а также многих металлов (TiCl_4 , ZrCl_4 , AlCl_3 и т. д.) восстанавливаются при взаимодействии с натрием.

Разбавленные водные растворы всех кислот взаимодействуют с Na со взрывом, однако реакция с концентрированной серной кислотой протекает менее бурно, чем с водой. Дымящаяся азотная кислота вызывает воспламенение натрия.

Расплавленный Na восстанавливает жидкий сероуглерод до сульфида натрия.

Реакции с твердыми веществами. Натрий сплавляется с иодом без заметного взаимодействия, но все же в интервале температур 300—360° С на поверхности слое металла может происходить следующая реакция:



При взаимодействии с серой, селеном и теллуром Na воспламеняется, образуя сульфиды, селениды и теллуриды.

Взаимодействие натрия с фосфором без доступа воздуха приводит к образованию фосфидов. На воздухе реакция сопровождается воспламенением и продуктом ее является фосфат натрия.

Интенсивность реакции натрия с углеродом зависит от состояния, в котором находится углерод. Имеются данные о взаимодействии с углеродом в виде сажи, однако известно, что алмаз совершенно инертен по отношению к натрию, а графит высокой плотности не вступает с ним в химическую реакцию при температурах вплоть до 850—900° С.

Кремний не реагирует с натрием даже при температурах, близких к точке кипения последнего; аналогичным образом ведет себя бор.

Образование сплавов натрия

Данные относительно образования сплавов натрия с некоторыми элементами приведены в табл. 13. На рис. 52 и 53 показаны кривые растворимости металлов в натрии.

Растворимости твердого алюминия в натрии не обнаружено. Выше точки плавления алюминия (657°С) Al и Na представляют две несмешивающиеся жидкости.

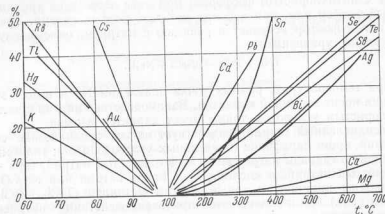


Рис. 52. Растворимость некоторых металлов в натрии.

Растворимость сурьмы в жидком натрии при температурах до 700°С

$$W = -7,1 + 0,073t, \quad (22)$$

здесь и далее W — весовое содержание данного металла в сплаве, %;
 t — температура, °С.

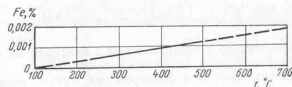


Рис. 53. Растворимость железа в натрии.

Растворимость висмута в Na вплоть до температур порядка 600°С выражается уравнением

$$W = 0,0129t + 0,000133t^2. \quad (23)$$

Кадмий образует с натрием эвтектику, содержащую 2,6% Cd и имеющую температуру плавления 95,5°С. Зависимость растворимости от температуры выражается уравнением

$$W = -36,5 + 0,410t \text{ при } t < 250^\circ\text{C}. \quad (24)$$

Элемент	Данные о сплавах и о растворимости в натрии	Элемент	Данные о сплавах и о растворимости в натрии
Алюминий	Не образует	Никель	Не образует
Барий	Не образует	Ниобий	Не образует
Бериллий	Не образует	Олово	С/П
Ваннадий	Не образует	Осмий	Нег сведений
Висмут	С/П *	Палладий	СН
Вольфрам	Не образует	Платина	СН
Золото	СН **	Полоний	Нег сведений
Германий	СН	Ртуть	С/П
Железо	Не образует	Рубидий	С/П
Зинк	С/П	Свинец	С/П
Иридий	Нег сведений	Серебро	С/П
Кадмий	С/П	Стронций	Нег сведений
Кальций	ЧС ***	Сурьма	С/П
Кобальт	Не образует	Тантал	Не образует
Калий	С/П	Теллур	Нег сведений
Лантан	ЧС	Таллий	С/П
Магний	ЧС	Торий	Образует сплавы
Марганец	Образует	Хром	Не образует
Молибден	Не образует	Уран	Не образует
Медь	Образует	Цинк	ЧС
Мышьяк	С/П	Цезий	С/П
		Цирконий	Нег сведений

* С/П — смешивается в любых пропорциях

** СН — смешивается незначительно

*** ЧС — частично смешивается

Растворимость кальция в Na при температурах до 700°С определяется выражением:

$$\lg W = 2,5629 - \frac{1545,6}{T}, \quad (25)$$

где T — температура, °К.

Возможная погрешность формулы (25) составляет $\pm 0,14\%$. Добавка цезия снижает точку плавления Na. Для сплавов, содержащих до 50% цезия (сплав 50% Cs имеет точку плавления 80°С), растворимость

$$W = 233 - 2,29t. \quad (26)$$

Добавка золота также снижает точку плавления Na. Сплав эвтектического состава содержит 22,5% золота и плавится при 82°С. Растворимость в интервале температур между точками

плавления натрия и эвтектики может быть определена из выражения

$$\lg \left(1 - \frac{W}{100} \right) = 2.5094 - \frac{930.25}{T}. \quad (27)$$

Индий образует с натрием эвтектику, содержащую от 1,2 до 2,0% In и имеющую температуру плавления 96,1° С. Известно также химическое соединение этих элементов (InNa).

Растворимость железа в Na выражается в области температур 225—500° С уравнением:

$$W \cdot 10^4 = -1,1 + 0,02767t. \quad (28)$$

Эвтектика свинец — натрий близка по составу к чистому Na; температура ее плавления 97° С. Растворимость свинца выражается следующим уравнением, действительным вплоть до температуры 250° С, соответствующей содержанию свинца в сплаве, равному 40%:

$$W = -25,6 + 0,262t. \quad (29)$$

Эвтектика литий — натрий содержит около 0,5% Li и имеет точку плавления примерно на 2° С ниже точки плавления чистого Na. Большое количество лития в сплаве приводит к повышению температуры плавления. При температуре 162° С в натрий растворяется около 3% Li.

Эвтектика магний — натрий очень близка по своему составу к чистому Na. Растворимость магния определяется уравнением, справедливым до температуры 700° С, соответствующей содержанию магния в сплаве, равному 1,67%:

$$W = -0,27 + 0,002775t. \quad (30)$$

Эвтектика ртуть — натрий содержит 60,5% Hg, температура ее плавления составляет 21,5° С; ниже этой температуры растворимость ртути в натрии может быть определена из уравнения:

$$\lg \left(1 - \frac{W}{100} \right) = 1,5642 - \frac{579,85}{T}. \quad (31)$$

Диаграмма состояния системы Na—Hg приводится на рис. 54. Растворимость никеля в Na определяется выражением

$$W \cdot 10^4 = -0,085 + 0,0358t. \quad (32)$$

Добавка палладия в натрий в количестве 2,8% снижает точку плавления последнего на 0,4° С.

В жидком натрии растворяются только следы платины, однако известно, что пары Na оказывают сильное коррозионное воздействие на Pt. Температура плавления Na не меняется при добавке в него Pt в количестве до 1,5%.

Диаграмма состояния системы натрий—калий, представленная на рис. 25, указывает на существование нестабильного химиче-

ского соединения Na₂K. Растворимость калия в Na возрастает линейно с уменьшением температуры до 7° С и может быть выражена следующим уравнением:

$$W = 57,1 - 0,586t. \quad (33)$$

Добавка рубидия снижает температуру плавления Na. Растворимость рубидия определяется уравнением

$$W = 132,2 - 1,356t, \quad (34)$$

действительным в области температур от точки плавления натрия до 61° С.

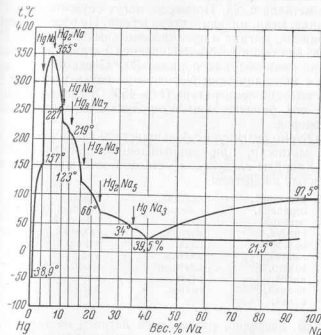


Рис. 54. Диаграмма состояния системы натрий — ртуть.

Растворимость селена в Na определяется уравнением

$$W = -8,4 + 0,0858t \quad (35)$$

при $t < 680^\circ \text{C}$.

Растворимость серебра в Na определяется выражением:

$$W = -2,4 + 0,018t - 0,00007007t^2 \quad (36)$$

при $t < 650^\circ \text{C}$.

Растворимость теллура в Na выражается уравнением:

$$W = -8,1 + 0,083t \quad (37)$$

при $t < 700^\circ \text{C}$.

Эвтектика таллий—натрий содержит 40,8% Тl. Температура ее плавления составляет 64° С. Растворимость Тl в Na определяется уравнением:

$$\lg \left(1 - \frac{W}{100} \right) = 2,2917 - \frac{849,5}{T}, \quad (38)$$

при $t < 64^\circ \text{C}$.

Растворимость олова в Na может быть найдена по формуле

$$W = 7,9 - 0,141t + 0,000616t^2. \quad (39)$$

Натрий восстанавливает окиси многих металлов, причем продукт восстановления может быть как чистым металлом, так и сплавом металла с Na. Примером могут служить окиси индия, железа, цинка, меди, никеля, титана и бора. Не восстанавливаются окиси алюминия, магния и щелочноземельных элементов. Гидраты окисей ряда металлов восстанавливаются натрием до чистых элементов. При температурах порядка 300° С едкий натр вступает в реакцию с металлическим Na, образуя окись и гидрид натрия. При более высокой температуре ($t > 450^\circ \text{C}$) гидрид разлагается, в связи с чем окончательными продуктами реакции являются Na_2O и водород.

Натрий бурно реагирует с большинством галоидов, что используется, в частности, при промышленном производстве калия и титана. Хлориды следующих металлов восстанавливаются натрием до чистых элементов:

алюминий,	кальций,	селен,
бериллий,	кобальт,	серебро,
ванадий,	литий,	стронций,
висмут,	магний,	таллий,
вольфрам,	медь,	торий,
железо,	никель,	уран,
золото,	платина,	цинк,
индий,	ртуть,	цирконий,
кадмий,	свинец,	хром.
калий,		

Сульфиды, очевидно, разлагаются натрием не так легко, как хлориды, поскольку при восстановлении сульфатов обычно образуются сульфиды, а не чистые металлы.

Металлический натрий не реагирует со стеклом пирекс вплоть до температуры 300° С, однако разрушает его при более высоких температурах. Фарфор и асбест вступают с Na во взаимодействие, что ограничивает их применение в качестве теплоизоляционных материалов для натриевых систем (см. гл. V).

12. Калий

В химическом отношении калий близок к натрию, но более активен. Находясь в контакте с кислородом, калий окисляется до тетраоксида K_2O_4 , которая устойчива при комнатной температуре, в отличие от перекиси натрия Na_2O_2 , образующейся при

нагревании окиси Na_2O до температуры 200—300° С в присутствии водорода и нестабильной в присутствии натрия.

По мнению некоторых исследователей, часто отмечавшихся в практике работы с калием взрывы связаны с образованием перекиси на поверхности металла.

В отличие от натрия, калий при непосредственном взаимодействии с окисью углерода образует карбонил (взрывоопасное соединение). Взаимодействуя с водородом при температурах порядка 450° С, калий образует гидрид, имеющий вид порошка белого цвета. При нагревании гидрид разлагается, причем давление его диссоциации может быть представлено уравнением:

$$\lg p = -\frac{6175}{T} + 11,69. \quad (40)$$

Уже p выражается в мм рт. ст. При 427° С давление равно одной атмосфере; КН является сильным восстановителем.

С углеродом (графитом) калий, как и более тяжелые щелочные металлы, образует твердые растворы, в которых атомы металла внедрены между частицами графита.

Тепловые эффекты и изменения свободных энергий для некоторых реакций с участием калия

	$\Delta H_{298}, \text{ ккал/моль}$	$\Delta F_{298}, \text{ ккал/моль}$
$2\text{K}(r) + \frac{1}{2} \text{O}_2(r) \rightarrow \text{K}_2\text{O}(r)$	-86,14	—
$2\text{K}(r) + \frac{3}{2} \text{O}_2(r) \rightarrow \text{K}_2\text{O}_3(r)$	-125	—
$\text{K}(r) + \text{H}_2\text{O}_{(ж)} \rightarrow \text{KOH}(r) + \frac{1}{2} \text{H}_2(r)$	-33,46	
$2\text{K}(r) + \text{O}_2(r) \rightarrow \text{K}_2\text{O}_2(r)$	-118	
$\text{K}(r) + \text{O}_2(r) \rightarrow \text{KO}_2(r)$	-67	
$\text{K}(r) + \frac{1}{2} \text{H}_2(r) \rightarrow \text{KH}(r)$	-13,6	
$\text{K}(r) + \frac{1}{2} \text{Cl}_2(r) \rightarrow \text{KCl}(r)$	-104,2	-97,6
$\text{K}(r) + \frac{1}{2} \text{F}_2(r) \rightarrow \text{KF}(r)$	-134,46	-127,42
$\text{K}(r) + \text{CH}_3\text{OH}_{(ж)} \rightarrow \text{KOCH}_3 + \frac{1}{2} \text{H}_2(r)$	-51,1	
$\text{K}(r) + \text{NH}_3(r) \rightarrow \text{KNH}_2(r) + \frac{1}{2} \text{H}_2(r)$	-17,3	
$\text{K}(r) + \text{Hg}_{(ж)} \rightarrow \text{KHg}(r)$	-11,6	
$\text{K}(r) + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}_{(ж)} \rightarrow \text{KOC}_2\text{H}_5 + \frac{1}{2} \text{H}_2(r)$	-49,7	

13. Сплавы натрий — калий

Сплавы натрий—калий могут быть получены сплавлением чистых металлов. Диаграмма состояния системы Na—K показана на рис. 25. Данные относительно теплоты образования сплавов различных составов приведены в табл. 14. Основные примеси, содержащиеся в дистиллированном сплаве 78% K, следующие:

Примесь	Железо	Медь	Кремний
Содержание в десяти тысячных долях процента . . .	20	20	20
Примесь	Алюминий	Магний	Кальций
Содержание в десяти тысячных долях процента . . .	40	10	20

Не определялось содержание элементов: В, Mn, Sn, Cd, Ag, Zn, Ti, Zr, Ni, Cr, Co, Pb, Br, Sr, Bi.

Таблица 14

Теплота образования сплавов (ккал/моль)

Температура t , °C	Содержание калия, %		
	46,5	63,5	77,5
25	2130	1440	2130
110	540	370	540

Сплав Na—K в химическом отношении близок к натрию, отличается, однако, от него несколько большей активностью. В сплаве Na—K натрий окисляется избирательно, причем состав сплава, по-видимому, не влияет существенно на растворимость кислорода. Данные по растворимости кислорода в Na—K приведены на рис. 50.

14. Литий

Литий получают электролизом расплавленного хлорида лития (LiCl), а также вакуумтермически. По ряду химических свойств он близок к натрию и калию. При комнатной температуре взаимодействие лития с влагой и кислородом воздуха протекает медленно. Li можно обрабатывать на воздухе и хранить в чистом осушенном керосине или минеральном масле. Во влажном воздухе поверхность лития быстро тускнеет, покрываясь окисно-нитридной пленкой.

Твердый литий взаимодействует с водой, вытесняя водород. Эта реакция происходит не так бурно, как между натрием и водой, и выделяющегося тепла недостаточно, чтобы расплавить металл, на поверхность которого образуется пленка LiOH, малорастворимого в воде. Расплавленный литий взаимодействует с водой более энергично.

В отличие от Na и K, литий реагирует с азотом воздуха, образуя нитрид (Li_3N) в виде порошка черного цвета. Эта реакция происходит даже при комнатной температуре и заметным образом ускоряется при подогреве металла. В связи с этим инертные газы, служащие для предохранения поверхности жидкого лития от окисления, должны быть очищены не только от кислорода и водяных паров, но и от азота.

При нагреве до температуры, близкой к точке плавления (186°C), литий может воспламениться на воздухе и горит интенсивным белым пламенем, образуя едкий белый дым окиси лития (Li_2O). Взаимодействуя с водородом при $\sim 700^\circ\text{C}$, литий дает химически устойчивый гидрид (LiH). Подобно гидридам других щелочных металлов, LiH окрашен в белый цвет и является сильным восстановителем. При температуре 680°C LiH плавится.

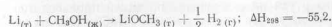
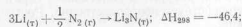
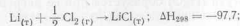
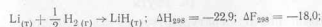
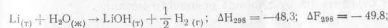
Реакция лития с углекислым газом приводит к образованию окиси лития, карбоната лития (Li_2CO_3) и свободного углерода.

Литий активно взаимодействует с галогенами, образуя галонды, и с газообразным аммиаком, образуя амид.

Основной примесью в поставляемом промышленностью техническом литии является натрий (от 0,25 до 1%). В меньших количествах присутствуют калий, кальций, железо, никель и медь. Азот присутствует в литии в виде нитрида; процентное содержание последнего колеблется от 0,02 до 0,05%.

Особо чистый металл получается путем вакуумной дистилляции технического лития. При этом относительное содержание натрия в литии снижается до 0,001% (максимально допустимое количество — 0,02%), калия — до 0,005%, кальция — до 0,01%.

Тепловые эффекты и изменения свободных энергий для некоторых реакций с участием лития



15. Галлий

По химическим свойствам галлий близок к алюминию.

При взаимодействии с кислородом галлий окисляется только с поверхности, даже при температурах 600—800° С. С водой галлий не взаимодействует; в атмосфере водяных паров его поверхность остается блестящей в течение длительного промежутка времени.

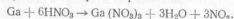
Галлий слабо растворяется в минеральных кислотах. Отмечено, что в растворе соляной кислоты твердый галлий растворяется значительно быстрее, чем жидкий.

Взаимодействие галлия с водным раствором КОН сопровождается выделением водорода, что указывает на амфотерный характер металла.

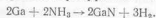
Галлий непосредственно соединяется с хлором, бромом и йодом, образуя трехгаллоидные соединения. Интенсивность взаимодействия максимальна для хлора и минимальна для йода.

Реагируя с пятидесятипроцентным раствором плавиковой кислоты, галлий и его окись образуют фтористый кристаллогидрат $\text{GaF}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

Галлий пассивен по отношению к холодной азотной кислоте, но взаимодействует с ней при нагревании:



Нитрид галлия (GaN) образуется в результате взаимодействия металла с аммиаком при температуре 900—1000° С:



Так как галлий окисляется на воздухе лишь с поверхности, проба металла может быть отобрана на анализ без специальной защиты от окисления.

Отделение галлия от примесей при анализе основано на хорошей растворимости хлорида галлия (GaCl_2) в этиловом эфире, насыщенном газообразным хлористым водородом (HCl). В то же время хлориды алюминия (Al — основная примесь в галлии) и некоторых других металлов нерастворимы в эфире, что позволяет отделить их от хлорида основного металла.

16. Ртуть

При комнатной температуре ртуть не взаимодействует с кислородом. Окись ртути (HgO) образуется при ее нагреве до ~ 350° С в атмосфере, содержащей кислород, и разлагается при дальнейшем повышении температуры. С галогенами, серой и сероводородом ртуть взаимодействует непосредственно. Растворимость газов в ртути ничтожна.

Анализ ртути на содержание примесей производится следующим образом. Проба весом примерно 1355 г (100 мл ртути) подвергается вакуумной дистилляции в стеклянной аппаратуре.

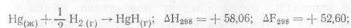
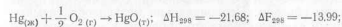
Остающееся после дистилляции вещество растворяют в азотной кислоте, добавляя к ней перекись водорода с целью достижения полного растворения. Раствор подвергают спектрографическому анализу. О содержании данного элемента в ртути можно судить, сравнивая плотности обнаруженных при анализе линий спектра с плотностью линий для раствора этого элемента при известной его концентрации.

Техническая ртуть содержит номинально 99,7% чистого металла и 0,3% примесей (медь, серебро, марганец, железо, магний, свинец, хром, никель и алюминий). Найдено, что некоторые примеси, присутствующие в ртути даже в очень малых количествах, заметно изменяют внешний вид ее поверхности. Если после фильтрации поверхность ртути в течение длительного времени не тускнеет, то можно быть уверенным в том, что содержание благородных металлов в ней не превышает 0,0001%.

Особая чистая ртуть готовится путем обработки технического металла раствором азотной кислоты (одна часть кислоты на четыре части воды) с последующим продуванием воздуха через промытую водой ртуть. Дальнейшая очистка заключается в дистилляции металла при пониженных давлениях и температуре порядка 250° С. Дистилляция позволяет очистить ртуть от примесей благородных металлов. Заключительной стадией очистки является фильтрация ртути через стеклянную вату, приготовленную из стекла пирекс. Фильтрацию следует производить после длительной выдержки дистиллированного металла в спокойном состоянии, во время которой часть примесей всплывает на его поверхность.

Содержание ртути в очищенном таким образом металле составляет по данным спектрографического анализа 99,99998—99,99999%. Ртуть высокой степени чистоты не смачивает стекло, но образует в стеклянном капилляре значительно более плоский мениск по сравнению с технической ртутью.

Тепловые эффекты и изменения свободных энергий для некоторых реакций с участием ртути



17. Олово

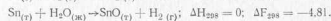
Поверхность олова остается блестящей в течение длительного его пребывания в атмосфере сухого воздуха при обычной температуре. Во влажном воздухе поверхность металла постепенно покрыв-

вается серой пленкой, состоящей из окиси и гидрата окиси олова. Аналогичная пленка окиси олова, имеющая вид пены, образуется на поверхности расплавленного металла в том случае, если плавление производится на воздухе. Образование пленки ускоряется с повышением температуры. При нагреве до температур выше 1500° С олово горит ярким белым пламенем.

Водород, азот, аргон, гелий, окись углерода и углекислый газ нерастворимы в твердом и жидком металле. Однако при температурах, превышающих ~ 550° С, углекислый газ обладает способностью окислять олово.

Минимальное содержание основного металла в техническом олове составляет 99,98%.

Тепловые эффекты и изменения свободных энергий для некоторых реакций с участием олова



18. Висмут

Висмут окисляется с поверхности во влажном воздухе при комнатной температуре, образуя пленку, защищающую металл от дальнейшего окисления. Скорость окисления резко увеличивается при нагреве висмута до температур, превышающих точку его плавления. При дальнейшем повышении температуры металла воспламеняется и горит, образуя трехокись (Bi_2O_3).

Висмут непосредственно взаимодействует с серой и галогенами. Водяной пар в присутствии висмута, нагретого до 600—800° С, разлагается, а углекислый газ восстанавливается до чистого углерода.

Водород, азот, аргон и гелий нерастворимы в висмуте; эти газы могут быть использованы для защиты поверхности жидкого металла от окисления.

Очистка висмута от металлических примесей производится следующим образом. Первоначально металл обрабатывается расплавленным едким натром, что приводит к удалению из него теллура и мышьяка. Затем следует извлечение цинка и свинца с помощью обработки висмута хлором, после чего в нем остается не более 0,03% свинца. Заключительной стадией очистки является продувка воздуха через расплавленный металл. Полученный таким путем висмут содержит примерно 99,99% основного металла.

Очистка жидкого висмута от кислорода производится пропусканием через него пузырьков водорода с последующей фильтрацией. При этом содержание O_2 в металле снижается до 0,0002—0,0004%. Используемые для очистки висмута фильтры изготавливаются из нержавеющей стали типа 410 и имеют отверстие пор ~ 35 м.

Для очистки Bi может применяться также вакуумная дистилляция.

Растворимость железа в расплавленном висмуте может быть выражена уравнением

$$\lg C = 6,41 - \frac{4110}{T}, \quad (41)$$

где C — концентрация растворенного железа, в десятичных долях процента;

T — температура, °K.

Уравнение (41) имеет точность $\pm 15\%$ в диапазоне температур от 450 до 650° С. Такую же точность в области температур 300—625° С имеет следующее уравнение, выражающее растворимость циркония в висмуте

$$\lg C = 6,66 - \frac{2760}{T}, \quad (42)$$

где обозначения те же, что и в (41).

Аналогичным образом может быть представлена зависимость растворимости хрома в висмуте от температуры

$$\lg C = 6,26 - \frac{3580}{T}, \quad (43)$$

Последнее выражение имеет точность $\pm 15\%$ в диапазоне температур 400—635° С.

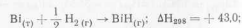
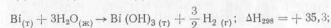
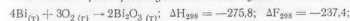
Растворимость урана в висмуте может быть выражена уравнением

$$\lg C = 3,13 - \frac{2550}{T}, \quad (44)$$

где C — весовая концентрация урана в жидком металле, десятичные доли процента;

T — температура, °K.

Тепловые эффекты и изменения свободных энергий для некоторых реакций с участием висмута



19. Свинец

При обычных температурах свинец не окисляется в атмосфере сухого воздуха. Если воздух влажный, то в присутствии углекислого газа на поверхности свинца образуется тонкий слой карбо-

ната ($PbCO_3$), предохраняющий металл от дальнейшего воздействия воздуха. Скорость окисления твердого свинца на воздухе быстро возрастает с повышением температуры. При $t \sim 300^\circ C$ на поверхности металла, находящегося в сухом воздухе, быстро возникает плотная пленка окиси, после чего скорость окисления уменьшается.

Нагрев металла до $700-900^\circ C$ приводит к резкому увеличению скорости окисления и плавлению окиси. При дальнейшем повышении температуры свинец начинает испаряться, воспламеняется и горит белым пламенем.

В присутствии воздуха и углекислого газа свинец раздается водяным паром; пар также окисляет металл, нагретый до $1200-1400^\circ C$.

Углерод нерастворим в свинце и в связи с этим может быть использован (в виде графита) как материал контейнеров для жидкого металла. Водород, азот, окись углерода и углекислый газ очень мало растворимы в твердом и в жидком свинце. Сернистый газ разъедает поверхность свинца при температурах, превышающих $300^\circ C$.

Растворимость гелия и аргона в свинце при любых температурах равна нулю.

Для защиты поверхности расплавленного свинца от окисления могут быть использованы водород, азот, окись углерода, аргон и гелий.

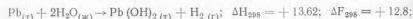
Тепловые эффекты и изменения свободных энергий для некоторых реакций с участием свинца



(красная окись свинца)



(желтая окись свинца)



20. Эвтектический сплав свинца и висмута

Химические свойства сплава $Pb-Bi$ близки к свойствам его компонентов. Диаграмма состояния системы висмут—свинец показана на рис. 47.

Джонсоном, Хартнетом и Клабаухом приводятся данные химического анализа эвтектики $Pb-Bi$, проводившегося в условиях эксплуатации экспериментального контура.

Во время опытов по теплоотдаче к сплаву периодически производился химический анализ на содержание в нем металлических примесей. Помимо этого, анализировались висмут и свинец в отдельности (перед приготовлением сплава) и шлак (окислившийся сплав), накопившиеся в загрузочном баке системы после $50-100$ часов ее работы. Отбор проб во время работы установки производился из полости циркуляционного насоса. Проба шлака была взята с поверхности жидкого металла в загрузочном баке. Результаты некоторых анализов приводятся в табл. 15.

Таблица 15

Данные химического анализа свинца, висмута, сплава висмут-свинец и шлака (окислившегося сплава)

Образец	Содержание, %							
	Pb	Bi	Sn	Fe	Cu	Ag	Ni	Cr
Висмут (коммерческий)	Следы	99,94	—	0,005	0,001	0,0005	—	—
Свинец (коммерческий)	99,94	—	—	<0,002	0,05	0,005	0,005	—
Эвтектический сплав (сразу же после приготовления)	44,02	55,86	0,008	0,005	—	—	—	—
Шлак (окислившийся сплав)	42,1	53,1	—	—	—	—	—	—

Как следует из сравнения тепловых эффектов и изменений свободных энергий реакций окисления Pb и Bi , свинец, входящий в состав эвтектики $Pb-Bi$, должен окисляться более энергично, чем висмут. Эти соображения подтверждаются практикой работы жидкометаллических установок: отклонение состава сплава от эвтектического определяется в основном снижением концентрации в нем свинца, превращающегося в окись (см., например, табл. 15, где приведены данные химического анализа окислившегося сплава).

ГЛАВА III

ГИДРАВЛИКА И ТЕПЛОБМЕН В ЖИДКИХ МЕТАЛЛАХ

С точки зрения гидравлики жидкие металлы не отличаются от обычных жидкостей. В частности, гидравлическое сопротивление при течении металлов в трубах, как показали опыты, может быть рассчитано по формулам для воды, воздуха и т. д. В отношении теплопередачи жидкие металлы существенно отличаются от прочих жидкостей. Поэтому экспериментальные формулы для расчета теплообмена в воде, воздухе, масле и других средах непригодны для использования в данном случае.

21. Гидравлика потока жидкого металла

В этом разделе даются в удобном для расчетов виде некоторые данные, позволяющие определять гидравлические характеристики потока жидких металлов.

Диаграмма, представленная на рис. 55, служит для определения числа Рейнольдса при течении натрия в круглой трубе. Там же дана величина поправочного множителя (a), необходимого для определения числа Re при течении в трубе сплавов натрий—калий.

Потеря давления в прямой трубе находится аналогично с помощью диаграммы, изображенной на рис. 56.

На рис. 57 и 58 показаны графики, построенные на основе двух предыдущих диаграмм и позволяющие рассчитывать мощность насоса, потребную для перекачивания натрия и сплава натрий—калий через участок прямой горизонтальной трубы данной длины. Если труба имеет некоторый уклон вверх или вниз, то по соответствующим уклону приращению или падению напора рассчитывается поправка к величине мощности насоса. Потери напора, обусловленные местными сопротивлениями, определяются обычным образом и также учитываются при окончательном определении потребной мощности.

Сходство гидравлических характеристик потоков жидких металлов и воды позволяет производить исследование движения металлических жидкостей на моделях. В табл. 16 приведены данные,

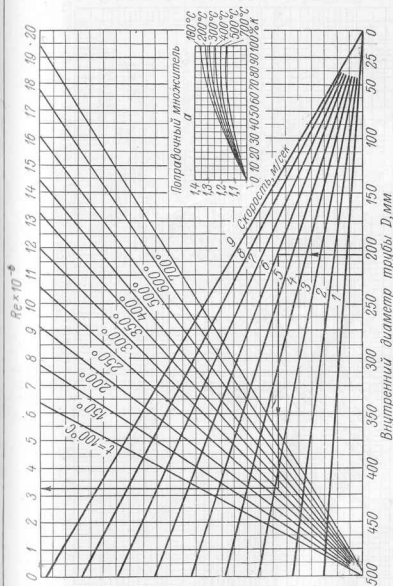


Рис. 55. Число Re при течении Na и сплавов Na—K в круглых трубах.

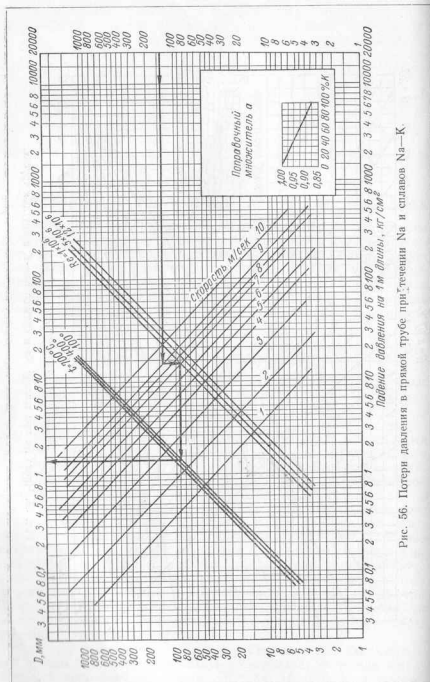


Рис. 56. Потери давления в прямой трубе при течи Na и сплавов Na—K

позволяющие подбирать температуру воды при моделировании так, чтобы ее кинематическая вязкость была равна вязкости расплавленных щелочных металлов.

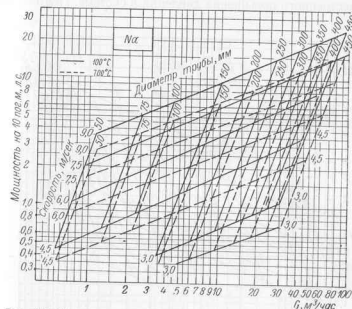


Рис. 57. Мощность насоса, необходимая для перекачивания Na.

Скорости движения жидких металлов в контурах обычно берут небольшими, так как их теплопередающие свойства удовлетворительны и при низких скоростях. Переход на значительные

Эквивалентные температуры воды Таблица 16

Температура жидкого металла t , °C	Эквивалентная температура воды t , °C		
	для Na	для Na—K (56% K)	для Na—K (78% K)
150	46	58	62
205	58	70	76
260	68	83	88
315	78	92	99
370	87	61	108
425	94	109	116

скорости (более 5—10 м/сек) нецелесообразен также потому, что приводит к ухудшению стойкости конструкционных материалов.

Рабочее давление в жидкометаллических контурах, как правило, сравнительно невелико. Это объясняется тем, что жидкометаллические теплоносители обладают высокой температурой кипения и могут использоваться в широком интервале температур без существенного повышения давления в системе. Поэтому макси-

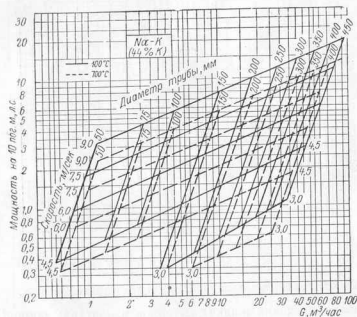


Рис. 58. Мощность насоса, необходимая для перекачивания сплава Na—K (44% K).

мальное рабочее давление в системе определяется ее гидравлическим сопротивлением и необходимым давлением на входе в циркуляционные насосы. Большая часть сопротивления приходится на долю участков, где осуществляется подвод тепла (реактор, теплообменники и т. д.). Эти участки вследствие высокой интенсивности теплоотдачи в них имеют сравнительно небольшую протяженность, что способствует снижению их гидравлического сопротивления.

Выбор оптимальных величин рабочего давления и скорости течения металла определяется, кроме того, условиями возникновения кавитации в тех местах системы, где давление может стать равным давлению паров жидкости при данной температуре, например, на всасывании насосов. К местам, опасным с точки зрения возникновения кавитации, рекомендуется подводить инертный газ под давлением примерно 1 атм.

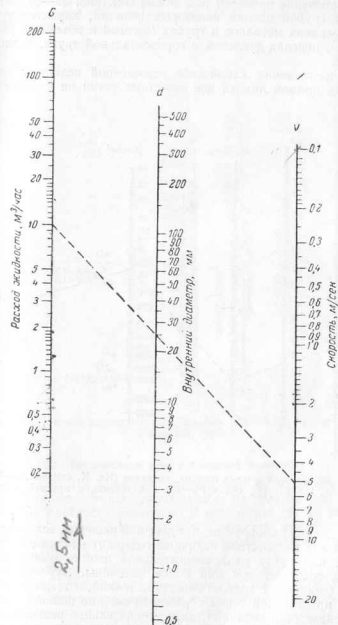


Рис. 59. Объемный расход жидкости при течении в круглой трубе.

В заключение приведем ряд номограмм (рис. 59—64), пригодных для грубой оценки некоторых величин, характеризующих течение жидких металлов в трубах (весовой и объемный расходы жидкости, перепад давления в горизонтальной трубе, число Рейнольдса).

Для нахождения какой-либо неизвестной величины следует соединить прямой линией две известные точки на параллельных

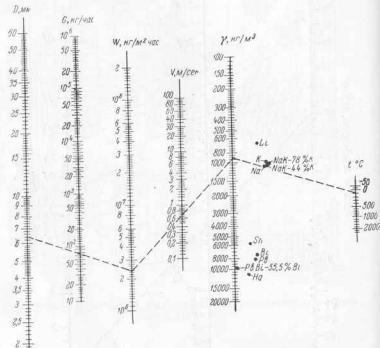


Рис. 60. Весовой расход жидких металлов (Na, K, сплавы Na—K, Li, Sn, Hg, Bi, Pb, сплав Pb—Bi) при течении в круглой трубе.

шкалах данной номограммы, что дает или решение, если расчетная формула для неизвестной величины содержит не более двух переменных, или точку на вспомогательной шкале, если расчетная формула содержит три или более величины. Эту точку затем следует соединить с третьей известной точкой, и тогда место пересечения проведенной таким образом прямой со шкалой, где отложена неизвестная величина, даст окончательное решение задачи.

Пример. Сплав натрия — калий (56% K) течет по трубе диаметром 15 мм при 260° С со скоростью 4,5 м/сек.

1. Падение давления на длине трубы, равной 6 м. По номограмме рис. 60 $\Delta p = 0,56 \text{ кг/см}^2$; по расчету $\Delta p = 0,546 \text{ кг/см}^2$.

2. Число Re. По номограмме рис. 64 $Re = 200\ 000$; по расчету $Re = 202\ 000$.
3. Весовой расход. По номограмме рис. 61 $G = 2680 \text{ кг/час}$; по расчету $G = 2692 \text{ кг/час}$.

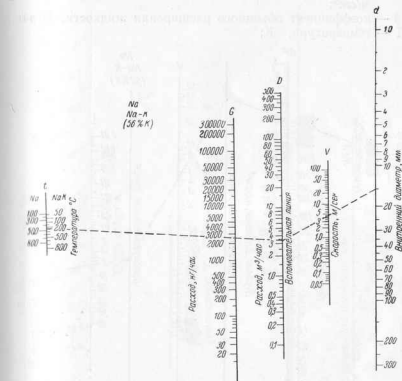


Рис. 61. Весовой расход Na и сплава Na—K (56% K) при течении в круглой трубе.

22. Теплообмен при свободной конвекции

Известно, что в поле сил тяжести объемы жидкости перемещаются один относительно другого, если их температуры, а следовательно, и плотности различны. В результате такого перемещения, называемого естественной или свободной конвекцией, происходит перенос тепла из более «горячих» областей жидкости в более «холодные».

В атомной энергетической установке, использующей в качестве охлаждающей среды расплавленный металл, свободная конвекция применяется для охлаждения некоторых частей установки в случае вынужденного прекращения работы перекачивающих насосов.

Математически свободная конвекция характеризуется дополнительным членом в уравнении количества движения жидкости. Этот член выражается следующим образом:

$$(\rho - \rho_0) g_z = -\rho_0 \beta (T - T_0), \quad (45)$$

где ρ — плотность жидкости, $\text{кг} \cdot \text{сек}^2 / \text{м}^4$;
 g_i — составляющая ускорения силы тяжести в направлении i , м/сек^2 ;
 β — коэффициент объемного расширения жидкости, $1/\text{град}$;
 T — температура, $^\circ\text{K}$;

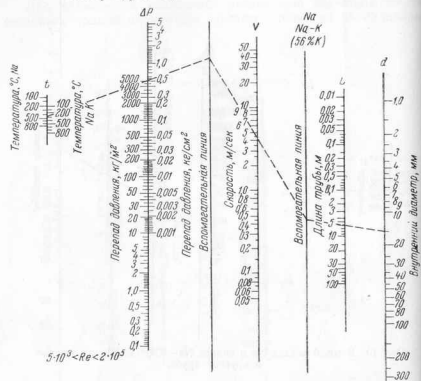


Рис. 62. Потери давления при течении Na и сплава Na—K (56% K) в круглой трубе.

Индекс «0» используется для обозначения некоторых исходных значений величин, которые могут быть выбраны в зависимости от условий протекания теплообмена.

Анализ уравнений количества движения и энергии показывает, что свободную конвекцию характеризуют следующие безразмерные комплексы:

$$Gr = g_i \frac{\beta (T - T_0) l^3}{\nu^2} \quad (\text{число Грасгофа});$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} \quad (\text{число Прандтля}),$$

где l — длина, принятая в качестве определяющего размера;
 ν — коэффициент кинематической вязкости;
 a — температуропроводность жидкости.

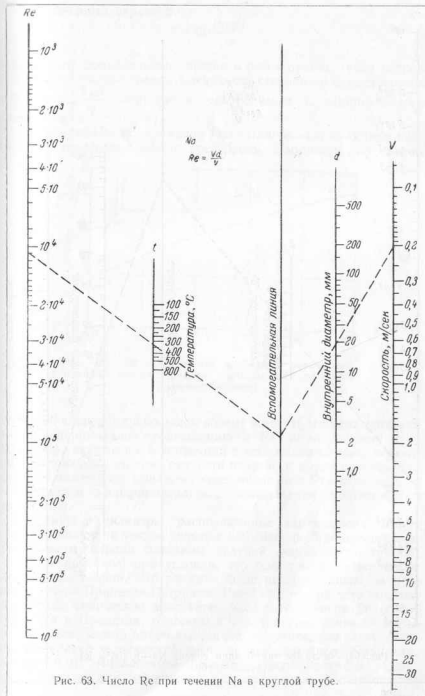


Рис. 63. Число Re при течении Na в круглой трубе.

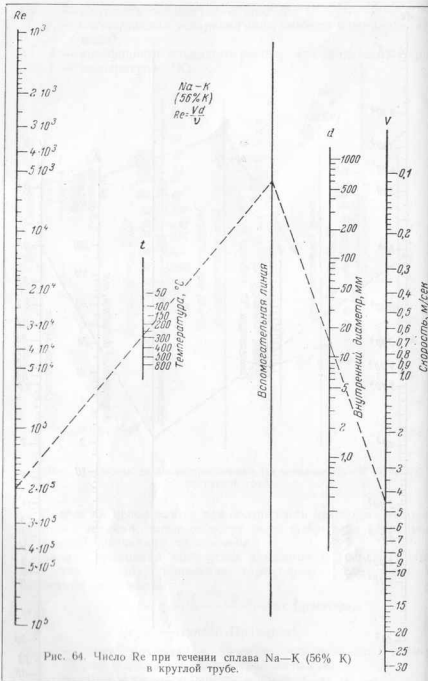


Рис. 64. Число Re при течения сплава $Na-K$ (56% K) в круглой трубе.

Безразмерный параметр

$$K = Gr \cdot \frac{Pr^{\frac{1}{2}} g d}{c_p}$$

должен быть дополнительно введен в рассмотрение, если нагрев за счет внутреннего трения в жидкости становится существенным и комплекс $\frac{\beta g d}{c_p}$ становится соизмеримым с единицей или превышает ее.

Для жидких металлов число Прандтля мало и влиянием вязкости на теплообмен можно пренебречь. Например, для случая

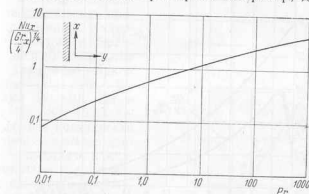


Рис. 65. Теплоотдача при свободном ламинарном течении жидкости вдоль вертикальной пластины (решение Остраха).

свободной конвекции в большом объеме жидкого металла тепловой поток пропорционален произведению $Gr \cdot Pr^{\frac{1}{2}}$, не зависящему от ν . Однако при естественной конвекции в небольшом объеме, ограниченном стенками, влияние вязкости заметно и интенсивность теплообмена может быть выражена через числа Gr и Pr в отдельности.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают эти выводы.

Пластины и цилиндры, расположенные вертикально. Шмидт и Бекман получили точное решение для свободной конвекции воздуха у вертикальной пластины (случай ламинарного течения в пограничном слое) при условии, что температура поверхности пластины постоянна. Это решение было распространено на различные числа Прандтля Острахом. Результат его расчета показан на рис. 65; физические константы, входящие в числа Грасгофа, Нуссельта и Прандтля, отнесены к температуре, имеющей место у поверхности пластины. На рис. 66 приведены распределения температур и скоростей, вычисленные для числа Прандтля, равного 0,01. Аналогичное решение было получено Спэрроу и Грэггом для равномерного распределения интенсивности

теплового потока по высоте пластины. В этом случае коэффициент теплоотдачи α примерно на 10% превышает величину α , найденную для условия $T_{ст} = \text{const}$, причем число Грасгофа определяется через переменную температуру $T_{ст}$:

$$Gr = \frac{\rho g \beta^3 (T_{ст} - T_0)}{\nu^2}.$$

Теоретические решения, представленные на рис. 65 и 66, получены при условии, когда местное число Грасгофа не превышает

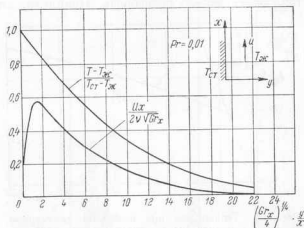


Рис. 66. Профили температур и скоростей у поверхности вертикальной пластины при свободном ламинарном течении жидкого металла.

10^8 , так как при $Gr_x > 10^8$ течение у стенки становится турбулентным.

Для расчета теплоотдачи при турбулентном течении жидкости вдоль вертикальной пластины, температура которой постоянна, Эккерт и Джексон получили следующее уравнение:

$$Nu_x = 0,0295 Gr_x^{0,4} Pr^{0,47} \frac{1}{(1 + 0,494 Pr^{0,67})^{0,4}}. \quad (46)$$

Согласно формуле (46), тепловой поток на поверхности пропорционален $Pr^{-0,67}$. Несмотря на то, что эта пропорциональность может не сохраняться при низких числах Прандтля, выражение (46) можно использовать в практических расчетах. При постоянном тепловом потоке на поверхности уравнение (46) приобретает вид:

$$Nu_x = 0,0295 Gr_x^{0,4} Pr^{0,47} \frac{1}{(1 + 0,444 Pr^{0,67})^{0,4}}. \quad (47)$$

Приведенные выше теоретические результаты могут быть использованы для расчета теплоотдачи цилиндра, расположенного вертикально.

Пластины и цилиндры, расположенные горизонтально. Леви рассмотрел ламинарное и турбулентное свободное течение вблизи горизонтальной поверхности. Кривая для вычисленного им среднего по окружности цилиндра коэффициента теплоотдачи при малых числах Прандтля показана на рис. 67. Там же показана теоретическая кривая, полученная Хайменом, Бониллой и Эрликом, и экспериментальные точки для ряда жидких металлов (Hg, Pb, Bi, эвтектики Pb—Bi, Na и сплава Na—K). Если течение вблизи поверхности ламинарно, опытные данные по теплоотдаче к жидким металлам для цилиндров с диаметром d , лежащих в пределах 5—40 мм, могут быть представлены в виде зависимости:

$$Nu_d = 0,53 (Gr_d Pr)^{0,25}. \quad (48)$$

Для горизонтальной пластины, обращенной вверх, Маустеллером и Мак-Гоффом были получены следующие выражения для ламинарного (49) и турбулентного (50) течения:

$$Nu_x = 0,371 (Gr_x Pr)^{0,2} \frac{1}{(0,763 + Pr)^{0,2}}; \quad (49)$$

$$Nu_x = 0,0727 Gr_x^{0,36} Pr^{0,27} \frac{1}{(1 + 0,441 Pr^{0,67})^{0,36}}. \quad (50)$$

В литературе нет опытных данных, которые могли бы быть сопоставлены с формулами (49) и (50).

Трубы или параллельные пластины, расположенные вертикально. Если свободная конвекция происходит внутри вертикальной трубы или в пространстве между двумя вертикальными плоскостями, теоретический анализ теплообмена становится затруднительным. Очевидно, наиболее простым с аналитической точки зрения является случай a (рис. 68) — две бесконечные вер-

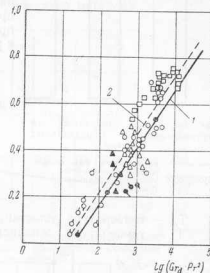


Рис. 67. Теплоотдача при ламинарном свободном течении жидкого металла вблизи поверхности горизонтального цилиндра.

1 — решение Леви; 2 — решение Хаймена и др.
● — Pb—Bi; ◻ — Na; ◐ — Na—K; ◑ — Bi;
▲ — Pb; ◒ — Hg (опытные точки Хаймена и др.).

тикальные пластины, нагретые до некоторой температуры. Острах нашел точное решение для ламинарного течения жидкости между пластинами при наличии и отсутствии источника тепла между ними, когда температуры по высоте пластин постоянны, но не обязательно равны друг другу.

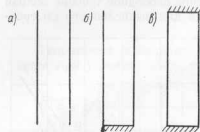


Рис. 68. Схемы теплообмена для вертикальных параллельных пластин.

— нагреваемая или охлаждаемая поверхность.
 // — теплоизолированная поверхность.

$T_{ст}$ — температура пластин, °C;
 $T_{ж}$ — температура жидкости, °C.

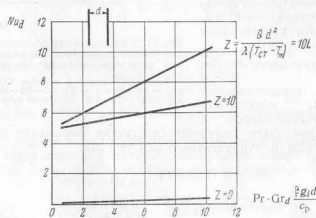


Рис. 69. Теплоотдача при свободном ламинарном течении жидкости между двумя вертикальными параллельными пластинами, имеющими одинаковую температуру.

Острах и Литике нашли аналогичное решение для случая, когда одна пластина равномерно нагревается, а другая равномерно охлаждается извне. Результаты расчета показаны на рис. 70, где по оси ординат отложено отношение действительного перепада

Результаты расчета при одинаковой температуре поверхности приведены на рис. 69. Различные прямые на рисунке относятся к различным значениям параметра

$$Z = \frac{Qd^2}{\lambda(T_{ст} - T_{ж})},$$

где Q — тепловая нагрузка на единицу объема между пластинами, ккал/м³·с;
 d — расстояние между пластинами, м;
 λ — коэффициент теплопроводности жидкости, ккал/м·с·°C;

температур между пластинами к тому перепаду, который существовал бы при переносе тепла чистой теплопроводностью.

Лайтхилл и Леви решили задачу о конвективном теплообмене для условий, когда пространство внутри трубы или между пластинами ограничено стенкой с одной стороны, а температура всех стенок постоянна (случай б, рис. 68).

Результаты данных работ могут быть использованы для приближенных расчетов теплоотдачи в жидких металлах.

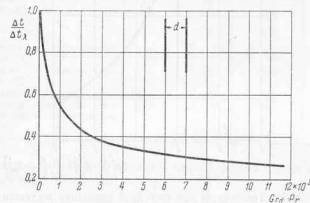


Рис. 70. Свободное ламинарное течение между двумя вертикальными параллельными пластинами, имеющими различные температуры.

Процесс теплообмена еще более осложняется при свободной конвекции в пространстве, замкнутом со всех сторон (рис. 68, в). Решение задачи для этого случая при наличии источников тепла и при температуре ограничивающих поверхностей, одинаковых во всех точках, было получено Острахом. Найденная им кривая приведена на рис. 71.

При очень малых величинах расстояния d расчет теплообмена может быть основан на результатах работы Тимо по теплообмену в узких кольцевых щелях, о которых будет сказано ниже.

Узкие кольцевые щели, расположенные горизонтально и вертикально. Экспериментальное изучение свободной конвекции в жидком натрии, находящемся внутри вертикально расположенной кольцевой щели, было проведено рядом исследователей (Тимо, Маустеллер и Мак-Гофф, Паулидж). Боковые поверхности щели были теплоизолированы, металл обогрелся снизу и охлаждался сверху, причем полость, в которой развивался процесс естественной конвекции, была замкнутой со всех сторон.

Экспериментальные данные указанных авторов приведены в табл. 17.

Естественная конвекция в узких вертикальных кольцевых щелях

Наименование	Обозначение	Автор		
		Тимо	Маустейллер, Мак-Гофф	Паулидж
Диаметр, мм	D	1520	250	75
Высота, мм	H	760	130	140
Ширина щели, мм	d	2,5	2,0	3,2
Отношение $\frac{H}{D}$	—	1/2	1/2	~2
Минимальная температура вверх щели, °C	—	75 ± 98	58 ± 98	60 ± 98
Максимальная температура вниз щели, °C	—	195	480	550
Температурный перепад, °C	—	97	380	457
Общий поток тепла за счет свободной конвекции, ккал/час	Q	11 100	2040	3020

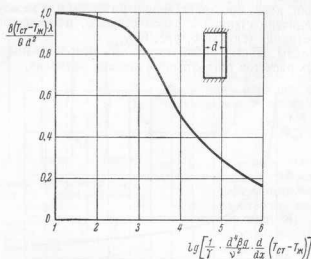


Рис. 71. Теплоотдача при свободной конвекции жидкости в пространстве, замкнутом со всех сторон.

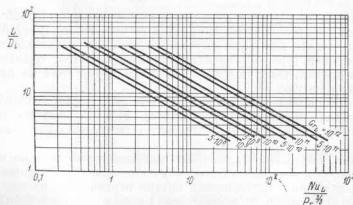


Рис. 72. Теплоотдача в узких вертикальных каналах при естественной конвекции натрия.

Результаты их опытов могут быть представлены в виде следующей эмпирической формулы:

$$Nu = \frac{\alpha D}{\lambda} = 6.5 \cdot 10^{-6} (Gr_d Pr)^{0.73}, \quad (51)$$

где α — эффективный коэффициент теплоотдачи, рассчитанный через полный температурный напор, ккал/м²·час °C;

D — диаметр кольцевой щели, м;

Gr — число Грасгофа, рассчитанное через ширину щели (d).

Найдено, что при установке в кольцевой щели диаметром 250 мм по высоте пяти горизонтальных перегородок с промежутками в 25 мм общий тепловой поток оказывается в 25 раз меньшим по сравнению со щелью без перегородок.

Ханеман произвел измерения теплоотдачи при естественной конвекции в узких вертикальных каналах, используя в качестве рабочих жидкостей ртуть, воду и масло.

В пересчете на натрий его данные могут быть представлены формулой:

$$\frac{Nu_L}{Pr_L^{0.67}} \left(0.139 \frac{L}{D_i} \right)^{1.84} = 0.00284 \cdot Gr_L^{0.37}, \quad (52)$$

где L — длина обогреваемого участка канала, м;

D — внутренний диаметр канала, м.

Эти же данные представлены на рис. 72.

Свободная конвекция в жидкометаллических контурах. При охлаждении атомных энергетических установок естественная конвекция может быть использована наряду с вынужденной, причем в зависимости от режима работы может оказаться преобладающей

Охлаждение вертикальных пучков труб в теплообменниках слявом натрия—калия

роль того или иного процесса. Средняя скорость течения жидкости в контурах, где существует естественная и вынужденная циркуляция, определяется из совместного решения уравнения баланса гидравлических напоров и уравнения теплового баланса для циркуляционной петли. Вид зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости будет определяться тем, какой характер движения (естественный или вынужденный) является преобладающим.

Теплоотдача при смешанном режиме движения жидкости в условиях ламинарного течения в короткой вертикальной трубе при постоянной температуре стенки была теоретически исследована

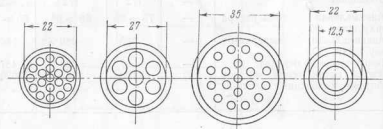


Рис. 73. Схемы расположения труб в кожухах теплообменников, исследованных Мак-Гоффом и Маустеллером.

Мартинелли и Боултером. В результате ими было получено следующее выражение для числа Нуссельта:

$$NuD = 1.75 \sqrt{\frac{\pi}{4} Re_D Pr \frac{D}{L} \pm 0.0722 \left(Gr_D Pr \frac{D}{L} \right)^{0.7}}, \quad (53)$$

где L — длина трубы, м;

D — диаметр трубы, м.

Знак «плюс» в подкоренном выражении выбирается в том случае, когда направления потоков естественной и вынужденной конвекции совпадают; знак «минус» — когда эти направления противоположны. Уравнение (53) справедливо, если профиль скорости жидкости является линейным и интенсивность теплообмена определяется в основном условиями протекания процесса вблизи стенок трубы. Для жидких металлов эти допущения часто оказываются несправедливыми.

Мак-Гофф и Маустеллер изучали теплоотдачу в межтрубном пространстве одно- и многотрубных теплообменников, расположенных вертикально и не имеющих каких-либо внутренних перегородок. В качестве теплоносителя использовался сплав натрия и калия (56% К). Наряду с естественной, исследовалась и вынужденная циркуляция жидкого металла в межтрубном пространстве. Соответствующие экспериментальные данные приведены в табл. 18.

Схемы расположения труб в кожухах теплообменников показаны на рис. 73.

Число труб		17 *	7	19	1	
Наружный диаметр труб D , мм		3,0	6,5	3,0	12,5	
Длина трубы l , мм		305	412	305	722	
Поперечное сечение потока F , м ²		$2,32 \cdot 10^{-4}$	$3,37 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-4}$	$2,56 \cdot 10^{-4}$	
Свободная конвекция	Re_D	min	480	1 050	500	4 000
		max	5 400	7 400	2 000	20 000
	α	min	1 760	2 250	5 370	8 050
		max	5 600	4 880	11 050	1 590
	Pe_D	min	12	23	10	85
		max	54	68	20	170
	Nu_D	min	0,23	0,56	0,82	4,20
		max	0,67	1,30	1,40	7,10
Вынужденная конвекция	Re_D	min	2 000	5 520	2 100	15 000
		max	27 000	43 000	15 000	120 000
	α	min	3 500	4 400	11 250	11 250
		max	16 100	11 700	24 900	16 700
	Pe_D	min	38	40	27	210
		max	320	460	135	1100
	Nu	min	0,58	0,60	1,20	6,50
		max	2,40	3,00	3,40	8,20

* Из девятнадцати труб две были заглушены

Для многотрубных теплообменников ими была получена одна общая эмпирическая формула для свободной и для вынужденной конвекции

$$Nu_D = \frac{aD}{\lambda} = 24.0 \left[\left(\frac{F_1}{F_2} \right)^{1.8} Re_D Pr \right]^{0.6}, \quad (54)$$

где D — наружный диаметр труб;

F_1 — площадь сечения для прохода жидкого металла;

F_2 — поверхность теплообмена.

Опытные данные по свободной конвекции для однотрубного теплообменника этой зависимости не подчиняются.

23. Теплообмен при вынужденной конвекции

Под теплообменом при вынужденной конвекции понимается перенос тепла между твердой поверхностью и соприкасающейся с ней жидкостью, приводимой в движение насосом.

При турбулентном течении жидкости вблизи какой-либо поверхности (например, в круглой трубе) вся область течения может быть условно разделена на три части:

Ламинарный подслои, непосредственно прилегающий к поверхности твердого тела, в котором сильно сказывается тормозящее действие стенки; здесь частицы жидкости движутся упорядоченным образом, и завихрений потока самопроизвольно не образуется.

Турбулентное ядро — основная центральная область потока, характеризующаяся развитым неупорядоченным движением частиц жидкости.

Промежуточная, или переходная, область, лежащая между ламинарным подслоем и турбулентным ядром.

Перенос тепла в потоке происходит как за счет молекулярной теплопроводности жидкости (λ), так и за счет турбулентного перемешивания ее объемов (молей).

Интенсивность молекулярного переноса тепла в жидкости может быть охарактеризована величиной ее температуропроводности $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$. Аналогично возникающий благодаря внутреннему трению в жидкости перенос количества движения характеризуется величиной кинематического коэффициента вязкости $\nu = \frac{\mu}{\rho}$. Безразмерное отношение этих величин носит название числа Прандтля:

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{c_p \mu}{\lambda}.$$

Если обычные жидкости (вода, воздух) имеют числа $Pr \approx 0,7$ —200, то жидкие металлы характеризуются очень малыми значениями Pr , лежащими в пределах 0,005—0,1 (рис. 74), что связано с их высокой теплопроводностью (рис. 75). В отличие от неметаллических жидкостей, теплообмен в потоке которых в основном

осуществляется за счет молярного переноса, в жидких металлах большую роль может играть молекулярный перенос тепла (даже в области турбулентного ядра).

Роль ламинарного подслоя в общем сопротивлении переносу тепла в жидких металлах меньше, чем в обычных жидкостях, так как подслои в данном случае относительно тонки (ν мало) и теплопроводны (λ велико). Эти соображения иллюстрируются рис. 76, где показано распределение температур в турбулентном потоке жидкости при разных числах Pr .

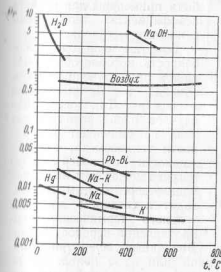


Рис. 74. Значения чисел Pr для различных теплоносителей.

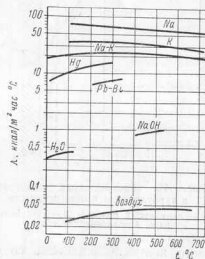


Рис. 75. Коэффициент теплопроводности различных теплоносителей.

При турбулентном течении жидких металлов отношение потока тепла, переносимого молекулярной теплопроводностью, к потоку тепла, переносимому за счет турбулентного перемешивания, может быть приблизительно оценено следующим образом. При значениях

$$Pe = \frac{Wd}{a} < 100,$$

где W — скорость жидкости;

d — характерный геометрический размер;

a — температуропроводность жидкости;

преобладает механизм передачи тепла молекулярной теплопроводностью. При числах Pe порядка 1000 роль молекулярного и турбулентного механизмов переноса тепла приблизительно одинакова, и лишь при $Pe > 50\,000$, т. е. при очень высоких скоростях течения, в ядре потока преобладает турбулентный перенос тепла и относительная величина термического сопротивления ламинарного подслоя сильно возрастает, составляя большую часть

общего сопротивления переносу тепла, как это и имеет место для обычных жидкостей. Опытные данные ([47], [105]) полностью подтверждают специфический характер распределения температур в потоке жидкого металла.

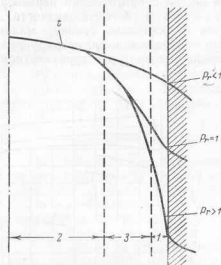


Рис. 76. Распределение температур в турбулентном потоке жидкости.

1 — ламинарный подслой; 2 — турбулентное ядро; 3 — переходная область.

Отметим еще одну особенность, которая обнаруживается при изучении теплообмена в металлических жидкостях. Так как в ряде случаев расплавленный металл не смачивает поверхность нагрева, контакт жидкости с поверхностью нагрева может быть не вполне удовлетворительным, что приводит к созданию дополнительного термического сопротивления переносу тепла.

Возникшее вследствие плохого контакта жидкости со стенкой или из-за появления на поверхности раздела слоя каких-либо загрязнений, окислов и т. д. термическое сопротивление может в сильной степени снизить коэффициент теплоотдачи α .

Турбулентное течение жидкого металла в круглой трубе. Результаты теоретического решения этой задачи при условии постоянства величины теплового потока вдоль стенки трубы [120] может быть в удовлетворительной степени точности представлен в следующем виде (формула Мартинелли-Лайона):

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = 7 + 0,025 Re^{0,8} \quad (55)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, $\text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}$.

Себан и Шимазаки [148] решили ту же задачу при условии постоянства температуры стенки трубы и получили уравнение:

$$Nu = 5 + 0,025 Re^{0,8} \quad (56)$$

Справедливость уравнений (55) и (56) подтверждается некоторыми опытами, проведенными с натрием и сплавом натрий—калий. В табл. 19 и на рис. 77 и 78 приводятся опытные данные Лайона, Вернера, Кинга и Тидбола по теплоотдаче к щелочным металлам.

Таблица 19

Условия проведения некоторых опытов по теплоотдаче к натрию и сплаву натрий—калий

Автор	Тип экспериментальной установки	Рабочая жидкость	Внутренний диаметр трубы, мм	Материал стенки	Пределы температур, $^\circ\text{C}$	Диапазон чисел Рейнольдса
Лайон	Концентрические трубы	Сплав 52% Na—48% K	11 и 18	Никель	105—125	15 000—90 000
Вернер, Кинг и Тидбол	Концентрические трубы	Сплав 56% Na—44% K и сплав 22% Na—78% K	18	Никель	150—650	33 000—230 000 35 000—280 000

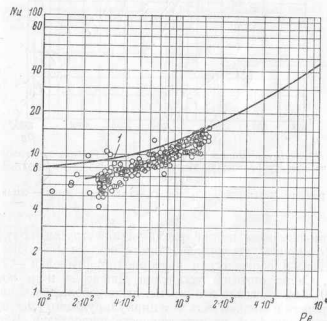


Рис. 77. Опытные данные Лайона по теплоотдаче при турбулентном течении сплава Na—K (48% K) в круглой трубе. 1 — решение Мартинелли — Лайона.

Опытные данные для других жидких металлов (ртуть, сплав свинец — висмут) обнаруживают значительное расхождение

с теорией, причем экспериментально найденные значения коэффициентов теплоотдачи, как правило, меньше теоретических. Рассмотрим результаты работ некоторых авторов.

Опыты по теплоотдаче к ртути [109] и к эвтектическому сплаву висмута и свинца [110] были проведены Джонсоном, Хартнетом и Клабуахом. В условиях турбулентного течения жидкости и при

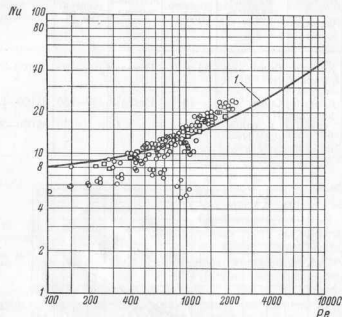


Рис. 78. Опытные данные Вернера, Кинга и Тидбола по теплоотдаче при турбулентном течении сплавов Na—K в круглой трубе.

1 — решение Мартинелли — Лайона; ○ — сплав 44% K; □ — сплав 77% K.

постоянным тепловым потоке вдоль стенки трубы, полученные ими коэффициенты теплоотдачи оказались на 25—35% ниже рассчитанных в соответствии с теорией Мартинелли — Лайона (рис. 79). Схема опытной установки Джонсона и др. показана на рис. 80. Как показали эти опыты, даже небольшие количества газа, попавшего в жидкий металл и циркулирующего вместе с ним, могут сильно повлиять на интенсивность теплоотдачи. В данном случае таким газом был гелий, засасываемый центробежным насосом в систему из дыхательного бака (рис. 80). Наличие газа приводило к снижению коэффициента теплоотдачи к сплаву Pb—Bi примерно в два раза. После того, как находящаяся в нижней части дыхательного бака перегородка была установлена таким образом, что она препятствовала образованию

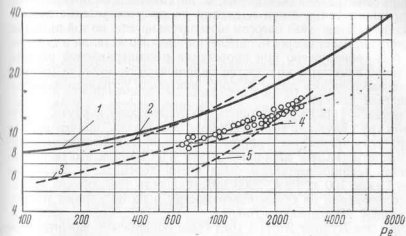


Рис. 79. Некоторые опытные данные по теплоотдаче к ртути и сплаву Pb—Bi при турбулентном течении в трубах.

1 — решение Мартинелли — Лайона; 2 — опыты Исакова и Дрю (ртути); 3 — опыты Пейсзена (ртути); 4 — опыты Себана (эвтектика Pb—Bi); 5 — опыты Любарского (эвтектика Pb—Bi); ○ — опыты Джонсона и др. (эвтектика Pb—Bi).

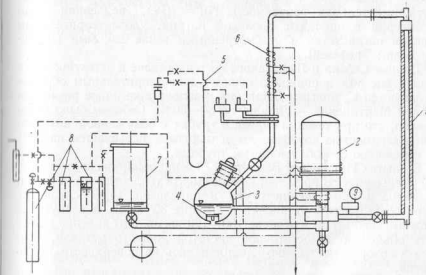


Рис. 80. Схема опытной установки Джонсона, Хартнета и Клабуаха.

1 — рабочий участок; 2 — насос; 3 — бак; 4 — перегородка; 5 — дифференциальный манометр; 6 — холодильник; 7 — загрузочный бак; 8 — газоочистка; 9 — манометр с разделительным баком.

воронки в центральной части бака, захват газа насосом прекратился. Коэффициент теплоотдачи к сплаву на рабочем участке возрос.

Захватывание газа насосом нежелательно еще по той причине, что оно усиливает скорость окисления жидкого металла в системе. Как было обнаружено при проведении рассматриваемой работы, скопление заметного количества окислившегося металла (шлака) в баке наблюдалось лишь до того, как было устранено захватывание газа насосом.

Трефезен [114] провел опыты по теплоотдаче к ртути. Материалом труб служили нержавеющая сталь и медь, причем медная поверхность предварительно промывалась смесью растворов соляной кислоты (HCl) и хлористой ртути ($HgCl_2$), так что ее смачиваемость жидким металлом была очень хорошей. В диапазоне чисел Пекле $100 < Pe < 2000$ интенсивность теплообмена оказалась одинаковой на обеих поверхностях и на 30% ниже расчетной кривой Мартинелли—Лайона.

Опытами Дуди и Янгера [67] было обнаружено значительное повышение коэффициента теплоотдачи (примерно в два раза) при добавлении в ртуть небольших количеств натрия (0,1% по весу и менее). Это обстоятельство связывается авторами с улучшением смачивающих свойств жидкого металла, поскольку натрий является по отношению к ртути поверхностно-активным веществом, существенно снижающим ее поверхностное натяжение. Экспериментальная зависимость $Nu = f(Re)$, найденная Дуди и Янгера в опытах с добавкой натрия, удовлетворительным образом согласуется с рассмотренными выше данными (Джонсон и др.; Трефезен).

Данные Себана и Любарского по теплоотдаче к эвтектическому сплаву висмута и свинца в общем удовлетворительным образом согласуются с данными Джонсона, располагаясь ниже расчетной кривой Мартинелли — Лайона на 30–50%. Себаном было обнаружено, что при течении сплава в трубах с облученной внутренней поверхностью коэффициент теплоотдачи повышается на 25% по сравнению с необлученными трубами.

В опытах Инглиша и Баррета [77] было обнаружено постепенное уменьшение со временем коэффициента теплоотдачи α к ртути. Величина α при течении ртути в никелевой трубе снижалась вдвое после работы установки в течение 35 часов, а в трубе из нержавеющей стали в течение 100–120 часов. Это явление может быть объяснено недостаточной чистотой жидкого металла, примеси в котором постепенно накапливались на поверхности теплообмена.

Загрязнение ртути способствовало, очевидно, отсутствию заштыки ее от воздействия кислорода воздуха.

Сравнение результатов некоторых из упомянутых работ дается на рис. 79.

В обзорной статье [119] Любарский и Кауфман приводят следующую эмпирическую формулу, согласующуюся с данными

большинства зарубежных исследователей по теплообмену при турбулентном течении жидких металлов в трубах:

$$Nu = 0,625 Pe^{0,4} \quad (57)$$

Эта формула пригодна для расчета теплоотдачи за участком тепловой стабилизации. Относительно теплообмена в пределах участка стабилизации см. ниже. На рис. 81 дается сводка опытных данных, использованных для нахождения формулы (57). Там же приведена кривая, соответствующая теоретической формуле Мартинелли—Лайона. Практически все данные, приведенные на последнем рисунке, были получены в опытах со ртутью и эвтектическим сплавом висмут—свинец, проводившихся в условиях постоянного потока тепла вдоль стенки трубы.

Мнения различных авторов по поводу влияния смачивающих добавок¹ к ртути и сплаву Pb—Bi на теплоотдачу расходятся. В некоторых опытах такое влияние найдено сильным (Дуди и Янгера [67], ртуть, Унтермейер, сплав Pb—Bi), а в некоторых — не обнаружено (Джонсон и др. [109], ртуть; Любарский, сплав Pb—Bi). Очевидно, такое расхождение объясняется различием в условиях проведения опытов разными авторами, и, в первую очередь, в степени чистоты жидкого металла.

Турбулентное течение жидкого металла между двумя параллельными плоскостями (односторонний обогрев). При условии постоянства теплового потока по поверхности Себаном [147] была получена следующая теоретическая формула:

$$Nu = \frac{ad_{экв}}{\lambda} = 5,8 + 0,02 Pe^{0,8} \quad (58)$$

где числа Nu и Pe определяются через эквивалентный диаметр канала, равный

$$d_{экв} = 2b,$$

где b — расстояние между плоскостями.

На рис. 82 теоретическое решение Себана сравнивается с опытными данными Сайниса [119] для ртути, текущей внутри канала, имеющего в сечении форму прямоугольника с большим отношением длин сторон. Сайнисом было замечено постепенное образование окисной пленки на поверхности теплообмена (материалом стенки канала служила углеродистая сталь).

Турбулентное течение жидкого металла между двумя параллельными плоскостями (двусторонний обогрев). Решение задачи о распределении температур в потоке жидкости между пластинами

¹ Смачивания ртутью и сплавом Pb—Bi стальной поверхности можно добиться, добавляя в жидкий металл натрий или магний в количестве 0,1–0,2%.

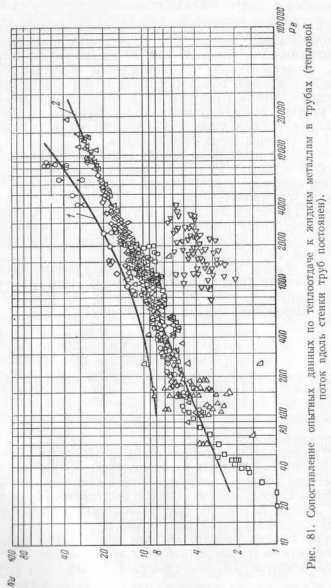
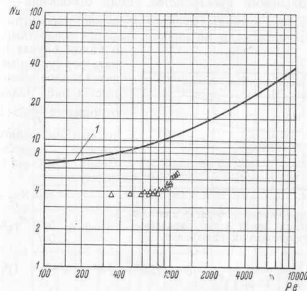


Рис. 81. Составление опытных данных по теплоотдаче к жидким металлам в трубах (тепловая поток вдоль стенки трубу постоянна).

было получено Себаном [147], который нашел вид зависимостей от чисел Re и Pr (рис. 83) величины $x = \frac{t_0 - t_{ж}}{t_0 - t_c}$, где t_0 и t_c — температуры соответственно одной и другой пластин, °C;

$t_{ж}$ — средняя температура жидкости между пластинами,



Тогда значения коэффициентов теплоотдачи для каждой из пластин равны:

$$\alpha_a = \frac{q_a}{t_a - t_{ж}} \quad \text{и} \quad \alpha_b = \frac{q_b}{t_b - t_{ж}}$$

Турбулентное течение жидкого металла через кольцевую щель. Обозначим через r_0 и r_i соответственно внешний и внутренний радиусы кольцевого пространства. Если отношение $\frac{r_0}{r_i}$ приближается к единице, кольцевую щель можно рассматривать как пространство между двумя параллельными плоскостями. Можно

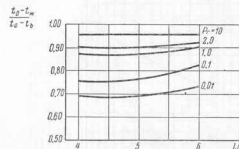


Рис. 83. Распределение температур в потоке жидкого металла между двумя параллельными обогреваемыми пластинами.

$$\text{где } \frac{1}{Nu_S} = \frac{1}{8B \left(\frac{r_0}{r_i} + 1 \right)^2} - 3 - 12B^2 - 4B^3 + 4(B+1)^4;$$

$$B = \frac{r_i}{r_0 - r_i}.$$

Числа Nu и Re , входящие в формулу (60), определяются через эквивалентный диаметр, равный:

$$d_{эв} = 2(r_0 - r_i).$$

Соотношение (60) может быть представлено в следующем упрощенном виде:

$$Nu = 0,75 \frac{\alpha_{тр} d_{эв}}{\lambda} \left(\frac{r_0}{r_i} \right)^{0,30}. \quad (61)$$

В этом выражении коэффициент теплоотдачи $\alpha_{тр}$ вычисляется по формуле (55) для круглой трубы. Формула Бейли была подтверждена для щелочных металлов опытами Вернера, Кинга и Тидбола; Лайона, Холла и Дженкинса [95].

Экспериментальные данные Вернера и др., а также Лайона приводятся на рис. 84 и 85.

Холлом и Дженкинсом [95] изучалась теплопередача от натрия к сплаву натрий—калий. Опытный теплообменник был изготовлен таким образом, что обе обменивающиеся теплом среды

протекали в кольцевых зазорах между трубами. Было обнаружено, что даже небольшой эксцентриситет труб теплообменника по отношению друг к другу вызывает сильное искажение температурного поля в жидком металле, циркулирующем в кольцевом зазоре между ними, что в свою очередь, влияет на интенсивность теплообмена, в особенности при высоких теплонпряженностях поверхности нагрева (более $5 \cdot 10^5$ ккал/м² час).

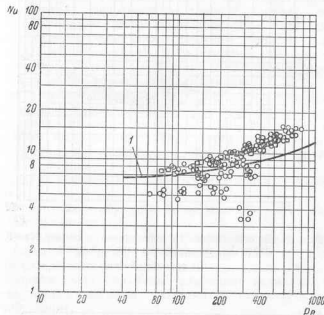


Рис. 84. Данные Вернера, Кинга и Тидбола по теплоотдаче к сплавам Na—K, текущим в кольцевой щели.

1 — формула Бейли; ○ — сплав 44% K; □ — сплав 78% K.

Эти соображения подтверждаются теоретическим анализом, проведенным авторами.

Данные по теплоотдаче к Na и Na—K в кольцевом пространстве, полученные в опытах Холла и Дженкинса, представлены на рис. 86. Коэффициент теплоотдачи определялся расчетным путем на основе измерений коэффициента теплопередачи от внутреннего кольца к наружному с учетом термического сопротивления стенки трубы¹. На рис. 86 даются опытные точки только для внутреннего кольца, имеющего внутренний радиус $r_i = 8,7$ мм и наружный радиус $r_0 = 11,9$ мм. Как видно из графика, соответствие между формулой (61) и экспериментом получается

¹ В качестве материала трубы использовалась углеродистая (в опытах с Na) и нержавеющая (в опытах с Na—K) сталь.

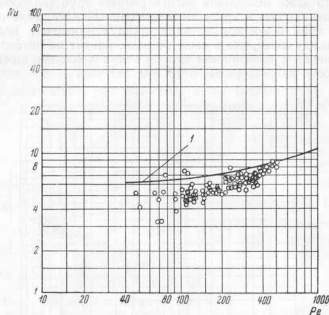


Рис. 85. Данные Лайона по теплоотдаче к сплаву Na—K (48% K), текущему в кольцевой щели.

1 — формула Бейана.

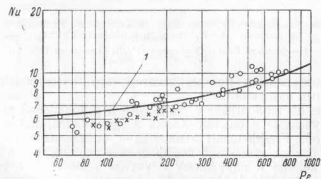


Рис. 86. Данные Холла и Дженкинса по теплоотдаче при течении щелочных металлов в кольцевых щелях.

1 — формула Бейя; ○ — сплав натрий — калий; × — натрий.

удовлетворительным, за исключением области малых чисел Пекле (менее 100—150).

Турбулентное течение жидкого металла через каналы некруглой формы. В настоящее время методы расчета теплоотдачи при течении металлических жидкостей через некруглые каналы разработаны еще далеко недостаточно вследствие ряда трудностей, возникающих на пути теоретического и экспериментального исследования. Во-первых, гидродинамика турбулентного потока в некруглых каналах недостаточно хорошо изучена, во-вторых, температура и тепловой поток по окружности канала непостоянны и распределение их может носить сложный характер. Для практических целей наиболее важно знать средний коэффициент теплоотдачи для всего канала, а также максимальную разность температур между стенкой и текущей жидкостью.

Задача о теплоотдаче к жидкому металлу в некруглых каналах была решена Клейборном для ряда конфигураций поперечного сечения канала (прямоугольник, треугольник, эллипс).

При этом были приняты следующие основные допущения:

1. Распределение удельного теплового потока по периметру канала равномерно.

2. Скорость течения жидкости во всех точках сечения канала постоянна.

3. Перенос тепла осуществляется только за счет молекулярной теплопроводности.

Эти допущения справедливы при равномерном подводе (или отводе) тепла к жидкому металлу, движущемуся турбулентно в канале со сравнительно небольшой скоростью ($Pe < 100$).

Клейборном были получены следующие величины чисел Nu и температурных напоров «жидкость — стенка» для каналов различной формы:

прямоугольник:

$$Nu = 6,$$

максимальная разность температур жидкости и стенки:

$$\Delta t_{\max} = \frac{q_f}{12\lambda},$$

где q_f — тепловой поток, отнесенный к единице длины канала, $\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{час}}$.

равносторонний треугольник:

$$Nu = 4,$$

$$\Delta t_{\max} = \frac{q_f}{4,3\lambda};$$

прямоугольный равнобедренный треугольник:

$$\Delta t_{\max} = 0,236 \frac{q_f}{\lambda}.$$

Числа Nu определены через эквивалентный диаметр

$$d_{\text{экв}} = \frac{4f}{U},$$

где f — площадь поперечного сечения канала;
 U — его периметр.

Понятием эквивалентного диаметра в применении к жидким металлам можно пользоваться далеко не всегда. Действительно, в ряде случаев (течение в каналах при сравнительно небольших числах Re , например, при $Re \approx 10^2 \div 10^3$, или течение в тесных щелях), когда зона существенного изменения температуры вблизи стенки может быть соизмеримой с шириной канала, механизм переноса тепла в канале принципиально отличен от механизма теплообмена в круглой трубе эквивалентного диаметра.

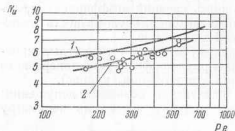


Рис. 87. Теплоотдача при течении сплава Na—K в прямоугольном канале.
1 — формула Гаррисона и Менке; 2 — опытные данные Тидбола.

Исследования проводились на теплообменнике, состоящем из двух прямоугольных каналов, разделенных тонкой ($\delta = 0,5$ мм) стенкой из нержавеющей стали.

Значения коэффициентов теплоотдачи, найденные из коэффициента теплопередачи, оказались близкими к теоретической кривой, полученной для прямоугольных каналов Гаррисоном и Менке [98]. Результаты опытов показаны на рис. 87.

Теплоотдача во входном участке круглой трубы (турбулентное течение). Приведенные выше формулы (55) и (57) для расчета теплообмена в трубах могут быть применены лишь для относительно длинных труб, так как наличие участка тепловой стабилизации повышает коэффициент теплоотдачи во входной части трубы.

По расчетам Дейслера (рис. 88) средний коэффициент теплоотдачи к жидкому металлу совпадает с коэффициентом теплоотдачи за участком тепловой стабилизации при относительных длинах трубы $l/d = 50$ и более. При меньших длинах труб следует рассчитывать коэффициент теплоотдачи по формулам для входного участка.

Теоретические исследования теплоотдачи при турбулентном течении жидкого металла во входном участке трубы были проведены Дейслером, а также Попендиком и Пальмером. Дейслер анализировал случай постоянного теплового потока вдоль

поверхности теплообмена, считая профиль скоростей в трубе установившимся. Попендик и Пальмер рассматривали случай постоянной температуры стенки трубы и пренебрегали турбулентной теплопроводностью жидкости, в связи с чем их расчеты справедливы только для области низких чисел Re .

Результаты этих работ для входного участка относительной длины $l/d = 4,6$ приведены на рис. 89 в виде зависимости среднего значения числа Nu для входного участка от числа Re . На этом же рисунке показаны опытные данные Джонсона, Хартнета и Клабауха [119] для той же относительной длины, полученные в опытах с эвтектикой Pb—Bi. К аналогичным результатам привели опыты со ртутью, проводившиеся указанными авторами, а также Попендиком и Гаррисоном, которые измеряли коэффициент теплоотдачи для очень коротких труб ($l/d = 1-2$).

По данным Джонсона и др., для сплава Pb—Bi длина участка тепловой стабилизации не превышает тридцати диаметров трубы (в среднем со $28d$) и не зависит от чисел Re и Pr . Эта длина несколько больше полученной теоретическим путем Себаном и Шмазаки [148], ($l = 16d$), в предположении постоянства температуры поверхности теплообмена во всех ее точках. Типичный график сравнения опытных и теоретических значений локальных коэффициентов теплоотдачи во входном участке трубы приведен на рис. 90. По оси абсцисс на графике отложено отношение длины трубы к ее диаметру, а по оси ординат — отношение местного коэффициента теплоотдачи к среднему его значению для всей трубы.

Ламинарное течение в трубах. При ламинарном режиме течения некоторые результаты исследований теплообмена в неметаллических жидкостях применимы к жидким металлам. Так например, коэффициент теплоотдачи к жидкому металлу за пределами входного участка круглой трубы и при условии постоянства

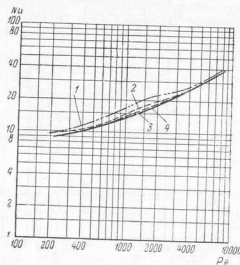


Рис. 88. Сравнение среднего коэффициента теплоотдачи в трубах различной относительной длины с коэффициентом теплоотдачи за участком тепловой стабилизации (турбулентное течение жидкого металла).

$$1 - \frac{l}{d} = 20; 2 - \frac{l}{d} = 50; 3 - \frac{l}{d} = 100; \\ 4 - \frac{l}{d} = \infty \text{ (за участком стабилизации).}$$

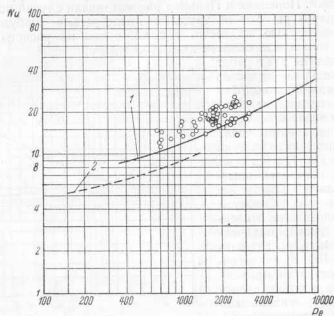


Рис. 89. Теплоотдача во входном участке круглой трубы при турбулентном течении жидкого металла.

1 — решение Дейслера; 2 — решение Сестана и Шмазани;
○ — опытные данные Джонсона и др.

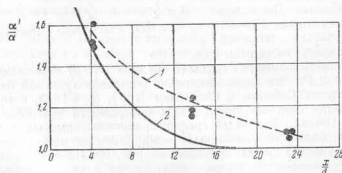


Рис. 90. Сравнение расчетных и экспериментальных значений местных коэффициентов теплоотдачи к жидкому металлу во входном участке трубы.

1 — опытные данные Джонсона и др.; 2 — решение Сестана и Шмазани.

теплового потока по ее длине должен быть равен $48/11 \cdot \lambda/d$, где d — диаметр трубы.

Гретц дал теоретическое решение задачи о теплообмене во входном участке трубы при ламинарном течении несжимаемой жидкости; температура стенки предполагалась постоянной, а профиль скоростей в потоке — параболическим. Результат решения представлен на рис. 91. Обозначения на осях координат расшифровываются следующим образом:

$$\alpha = \frac{q}{F(t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}})};$$

$$t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}} = \frac{(t_{\text{ст}} - t_{\text{вх}}) + (t_{\text{ст}} - t_{\text{вых}})}{2},$$

где q — удельный тепловой поток, ккал/м²·час;

F — поверхность теплообмена, м²;

$t_{\text{вх}}, t_{\text{вых}}$ — средняя температура жидкости соответственно на входе и на выходе трубы, °C;

L — длина трубы, м;

G — весовой расход жидкости, кг/час.

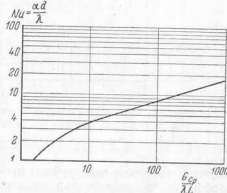


Рис. 91. Теплоотдача при ламинарном течении жидкости во входном участке трубы ($t_{\text{ст}} = \text{const}$).

Опытных данных по теплоотдаче к жидким металлам при ламинарном режиме течения накоплено еще очень мало. Исследования теплоотдачи к ртути и сплаву Pb—Bi, проведенные Джонсоном, Хартнетом и Клабаухом [119] в условиях ламинарного и переходного режимов течения металла показали, что в области низких чисел Re ($Re < 100$) интенсивность теплообмена резко падает (см. рис. 92).

Теплообмен при течении жидкого металла в межтрубном пространстве (продольное обтекание пучков труб). Теплопередача в небольших теплообменниках на щелочных металлах изучалась Тидболом [162]. Исследования проводились на кожухотрубчатом теплообменнике лабораторного типа, который состоял из девяти труб наружным диаметром ~3 мм, заключенных в цилиндрический кожух внутренним диаметром 22 мм и обтекаемых снаружи в продольном направлении расплавленным натрием. Внутри труб циркулировал сплав натрий—калий эвтектического состава (78% K). Обтекание трубного пучка не было продольным в полном смысле слова, так как внутри кожуха были установлены

поперечные перегородки. На основании измерений коэффициента теплопередачи автором был вычислен средний коэффициент тепло-

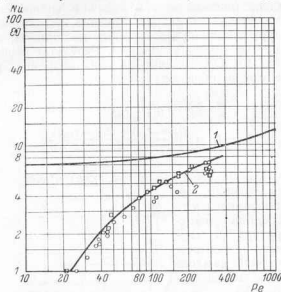


Рис. 92. Теплоотдача к ртути и эвтектическому сплаву Pb—Bi при ламинарном течении жидкого металла в круглой трубе.

1 — решение Мартинелли — Лайона; 2 — опытные данные Джонсона и др.; □ — ртуть; ○ — эвтектика Pb—Bi.

отдачи к натрию в межтрубном пространстве, причем для расчета коэффициента теплоотдачи от сплава, текущего внутри труб, использовалась формула Мартинелли—Лайона [131]. Результаты опытов показаны на рис. 93.

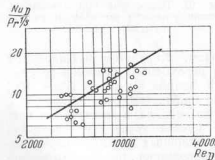


Рис. 93. Теплоотдача в межтрубном пространстве небольших теплообменников натрия — сплав Na—K.

натрий, пространство между наружными и внутренними трубами заполнялось сплавом Na—K. Материалом труб служил никель. Наряду с теплообменниками Брукс и Розенблатт провели изме-

рения коэффициента теплопередачи в парогенераторе на сплаве натрия — калий. В принципе конструкция парогенератора аналогична конструкции теплообменника; пространство между наружными и внутренними трубами заливалось ртутью. Материалом труб служила нержавеющая сталь типа 347.

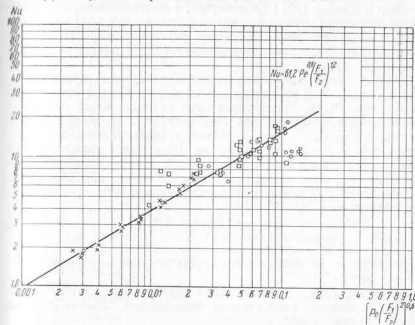


Рис. 94. Результаты опытов Брукса и Розенблатта по теплоотдаче в межтрубном пространстве теплообменника и водяного испарителя на щелочных металлах.

□ — испаритель на принудительной циркуляции; ○ — испаритель на естественной циркуляции; × — теплообменник.

Коэффициенты теплоотдачи в межтрубном пространстве вычислялись авторами из коэффициентов теплопередачи в теплообменнике и в испарительной части парогенератора, причем рассматривались только опыты с горизонтальным расположением теплообменника, так как при вертикальном его расположении на процессе теплообмена начинало сказываться влияние свободной конвекции жидкого металла в межтрубном пространстве.

Результаты опытов Брукса и Розенблатта (рис. 94) описываются следующей зависимостью:

$$Nu = 61,2 Re^{0,6} \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^{1,2}, \quad (92)$$

где числа Nu и Re рассчитываются по наружному диаметру труб пучка;

F_1 — площадь сечения для прохода жидкости, m^2 ;

F_2 — поверхность теплообмена, m^2 .

Так как относительный шаг между трубами пучка в испарителе был существенно больше, чем в теплообменнике, отношение F_1/F_2 в опытах Брука и Розенблатта менялось в широких пределах.

Теплоотдача при поперечном обтекании пучков труб. Хоз, Дропкии и Двайер [101] провели опыты по теплообмену при поперечном обтекании ртутью шахматного пучка труб. Ими изучалось влияние на теплоотдачу следующих факторов: скорости течения металла, относительного расположения труб в пучке; материала поверхности труб.

Относительный шаг между трубами по ширине пучка составлял $S_1/d = 1,37$, а по глубине, т. е. в направлении течения металла, $S_2/d = 1,19$. Материалом труб служила медь; наружная их поверхность хромировалась. Ряд опытов был проведен на нехромированных трубах, когда ртуть могла амальгамировать поверхность трубы и хорошо ее смачивала. В опытах с хромированной поверхностью было найдено, что зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости течения металла для труб, расположенных в глубине пучка (начиная с 3-го ряда), может быть представлена выражением:

$$\alpha = 56,7 \left(\frac{V_{\max} d}{\nu} \right)^{0,52}, \quad (63)$$

где α — средний по окружности трубы коэффициент теплоотдачи, $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}$;

$V_{\max}$ — скорость течения жидкого металла в межтрубном пространстве, рассчитанная по наиболее тесному сечению пучка, м/сек ;

d — наружный диаметр труб пучка, м ;

ν — коэффициент кинематической вязкости жидкого металла, $\text{м}^2/\text{сек}$.

Для коэффициента теплоотдачи на медной поверхности нагрева авторами была получена следующая формула:

$$\alpha = 16,8 \left(\frac{V_{\max} d}{\nu} \right)^{0,66}. \quad (64)$$

На рис. 95 дается сравнение опытных данных для обеих поверхностей.

Теплоотдача труб первого ряда пучка показана на рис. 96. Как видно из сравнения рис. 95 и 96, заметное уменьшение теплоотдачи первого ряда пучка по сравнению с третьим и др. наблюдалось только для труб с хромированной поверхностью.

Мак-Гсф и Маустеллер изучали теплоотдачу к сплаву Na—K (56% K) при поперечном обтекании им шахматного и коридорного пучков труб. Сплав Na—K циркулировал также внутри труб, и коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве определялся расчетом из коэффициента теплопередачи. Диаметр труб составлял 12,5 мм; в коридорном пучке они располагались с отно-

сительным шагом $S_1/d = 1,24$ (по ширине пучка) и $S_2/d = 1,08$ (по глубине пучка), а в шахматном — с шагом $S/d = 1,24$, одинаковым по ширине и по глубине пучка. В диапазоне чисел Рейнольдса $300 < Re < 70$ полученные авторами коэффициенты теплоотдачи для рядов труб, находящихся в глубине пучка, могут быть представлены уравнениями:

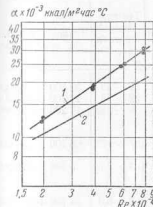


Рис. 95. Теплоотдача труб шахматного пучка, обтекаемого в поперечном направлении ртутью (для рядов труб, расположенных в глубине пучка).
1 — медная поверхность труб; 2 — хромированная поверхность труб.

для шахматного пучка

$$\alpha = 34,7 \left(\frac{V_{\max} d}{\nu} \right)^{0,68}; \quad (65)$$

для коридорного пучка

$$\alpha = 14,05 \left(\frac{V_{\max} d}{\nu} \right)^{0,74}. \quad (66)$$

В формулах (65) и (66) приняты те же обозначения, что и в формулах (63) и (64).

24. Теплообмен при кипении и конденсации

Теплообмен при кипении жидких металлов. Количество имеющихся в литературе опытных данных по теплоотдаче при кипении жидких металлов невелико.

Опытные данные Фармера и Лайона по кипению натрия, сплава натрий—калий, кадмия и ртути (чистой и содержащей добавки для улучшения смачивающих свойств) приведены

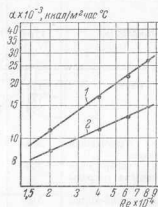


Рис. 96. Теплоотдача труб первого ряда шахматного пучка, обтекаемого в поперечном направлении ртутью.
1 — медная поверхность труб; 2 — хромированная поверхность труб.

в табл. 20. На рис. 97—99 эти же данные представлены графически, а на рис. 100 дается сравнение коэффициентов теплоотдачи при кипении различных жидкостей.

Таблица 20

Опытные данные по теплоотдаче при кипении жидких металлов

Жидкость	Температура t , °C	Материал поверхности нагрева	Температурный перепад Δt , °C	Диапазон тепловых потоков q , ккал/м ² час
Ртуть	171	Медь	11 ± 39	32 500 ± 167 000
"	171	Хром	22 ± 78	27 100 ± 227 000
"	354	Нержавеющая сталь типа 316	6 ± 533	11 200 ± 81 300
Ртуть, содержащая 0,1% натрия	354	То же	0,7 ± 19	5 700 ± 156 000
Ртуть, содержащая 0,02% магния и следы титана	354	" "	0,3 ± 7,3	5 400 ± 275 000
Сплав натрий-калий (56—59% K)	816	" "	0,9 ± 5,3	34 700 ± 350 000
Натрий	883	" "	3 ± 5,3	41 500 ± 347 000
Кадмий	763	" "	36 ± 101	17 300 ± 347 000

Из рассмотрения таблицы и графиков видно, что натрий, натрий—калий и ртуть, содержащие растворенные добавки, дают максимальную интенсивность теплоотдачи при кипении; при этом величины температурных перепадов между жидкостью и стенкой не превышают 11°С. На кривой, соответствующей теплоотдаче к ртути, содержащей 0,1% натрия, наблюдается максимум, указывающий на наступление режима пленочного кипения, когда пузыри пара, образующиеся на поверхности нагрева, соединяются в одну сплошную пленку, и интенсивность теплоотдачи резко падает.

Важным фактором, влияющим на процесс теплообмена при кипении жидких металлов, является смачиваемость поверхности нагрева кипящей жидкостью. Если жидкий металл не смачивает поверхности нагрева, то пленочный режим кипения может оказаться единственно возможным, что наблюдалось, например, при кипении ртути и кадмия на поверхности нагрева из нержавеющей стали. При добавке к ртути 0,1% натрия или 0,2% магния и 0,0001% титана коэффициент теплоотдачи при кипении возрастает примерно в 10 раз, причем степень влияния добавки натрия и магния (со следами титана) на теплоотдачу различна.

При кипении ртути на медной поверхности нагрева (как известно, медь амальгамируется ртутью) коэффициент тепло-

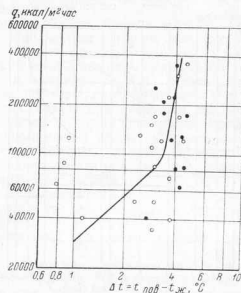


Рис. 97. Теплоотдача при кипении натрия и сплава натрий — калий (56—59% K).

● — натрий; ○ — сплав Na—K.

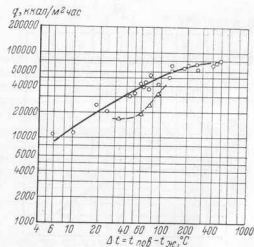


Рис. 98. Теплоотдача при кипении ртути и кадмия.

○ — ртуть; △ — кадмий.

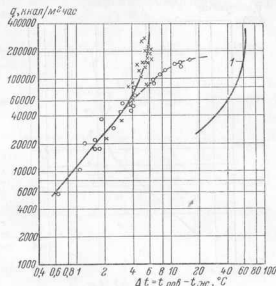


Рис. 99. Теплоотдача при кипении ртути, содержащей добавки Na, Mg, Ti.

1 — решение Фармера; ○ — 0,1% Na; × — 0,02% Mg и 0,0001% Ti.

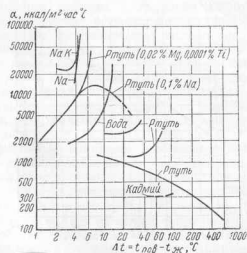


Рис. 100. Теплоотдача при кипении различных жидкостей.

отдачи получается в два раза большим, чем при кипении на хромированной поверхности.

При пленочном режиме кипения жидких металлов коэффициент теплоотдачи может быть низким даже по сравнению с коэффициентом теплоотдачи при свободной конвекции без кипения. Как обнаружил Фармер,¹ при охлаждении одной и той же поверхности кипящей и некипящей ртутью в первом случае было получено $\alpha \sim 240 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$, а во втором $\alpha \sim 2400 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot ^\circ\text{C}$. Коэффициент теплоотдачи при пленочном кипении жидкого металла обычно настолько низок, что использование жидкометаллических теплоносителей в данных условиях не имеет никаких преимуществ по сравнению, например, с водой (см. рис. 100). Поэтому необходимо добиваться хорошего смачивания жидким металлом поверхности нагрева.

Приведенные выше данные были получены после продолжительных опытов; все же нельзя быть уверенным в том, что в процессе длительной эксплуатации теплообменников интенсивность теплоотдачи при кипении будет оставаться неизменной.

Теплообмен при конденсации паров жидких металлов. Известное теоретическое решение Нуссельта, относящееся к случаю ламинарного течения пленки конденсата, образующейся на вертикальной пластине, дает следующее выражение для среднего по поверхности коэффициента теплоотдачи:

$$\bar{\alpha} = 1,47 \left(\frac{\lambda^3 \rho^2 g}{\mu^3} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{4G}{\mu} \right)^{-\frac{1}{3}} = 0,943 \left(\frac{\lambda^3 \rho^2 g r}{\mu L \Delta t} \right)^{\frac{1}{4}}, \quad (67)$$

где G — весовой расход конденсата, отнесенный к единице ширины пленки, $\text{кг/м} \cdot \text{ч}$;

r — удельная теплота парообразования (конденсации), ккал/кг ;

L — длина пластины, м ;

Δt — разность температур стенки и конденсирующегося пара, $^\circ\text{C}$.

Эта же зависимость представлена на рис. 101, где по осям координат отложены величины

$$\bar{\alpha} \left(\frac{\mu^2}{\lambda^3 \rho^2 g} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{и} \quad \left(\frac{4G}{\mu} \right).$$

Теоретическая формула для конденсации пара одиночной горизонтальной трубе (или на нескольких горизонтальных трубах

¹ Это подтверждает результаты опытов ЦКТИ, выполненных в 1937—1939 гг.

при расположении их одна над другой) выглядит следующим образом:

$$\bar{\alpha} = 0.725 \left(\frac{\lambda^3 \rho^2 g r}{\mu \Sigma D \Delta t} \right)^{1/4}, \quad (68)$$

где ΣD — сумма диаметров всех труб, образующих поверхность конденсации.

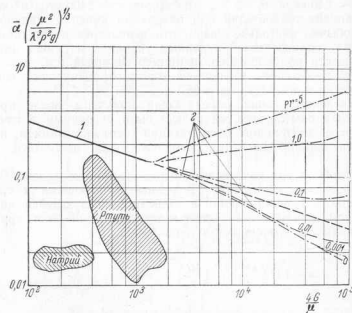


Рис. 101. Теплоотдача при конденсации паров некоторых жидких металлов.

1 — решение Нуссельта; 2 — решение Себана.

Следует ожидать, что формулы (67) и (68) пригодны для расчета теплоотдачи при конденсации паров металлических жидкостей, поскольку величина числа Прандтля не оказывает влияния на результат теоретического решения при ламинарном течении пленки конденсата.

Себаном было проведено аналитическое исследование теплообмена при конденсации с числом Прандтля, меняющимся от 0 до 5, для турбулентного режима течения пленки (рис. 101). Оказалось, что в этом случае число Нуссельта для жидких металлов ($Pr = 10^{-2} - 10^{-3}$) может быть меньше числа Нуссельта, даваемого теорией для ламинарного режима течения. На рис. 101 приведены также экспериментальные данные по конденсации паров ртути. Как видно из рисунка, наблюдаемый коэффициент теплоотдачи значительно меньше расчетного. Эту разницу можно

объяснить наличием дополнительного термического сопротивления на поверхности раздела между конденсатом и стенкой.

Экспериментальные данные по теплообмену при конденсации паров натрия приведены в табл. 21 и на рис. 101. Эти данные относятся к конденсации на внешней поверхности трубы, составленной из ряда участков и изготовленной из нержавеющей стали и никеля (по участкам). Труба была расположена под углом 45° к горизонту, причем длина ее составляла 130 мм, а диаметр 30 мм. Хотя можно ожидать, что коэффициент теплоотдачи для наклонной поверхности должен быть меньше теоретического, найденного для вертикальной поверхности, разница между теорией и экспериментом все же весьма велика.

Таблица 21

Теплоотдача при конденсации паров натрия

Температура пара, °C	Тепловой поток, ккал/м ² час	Температурный напор, °C	Коэффициент теплоотдачи, ккал/м ² час °C	$Re = \frac{4G}{\mu}$	Коэффициент теплоотдачи по Нуссельту, ккал/м ² час °C
630	150 000	2,7	55 600	140	850 000
725	192 000	3,3	58 600	200	743 000
870	266 000	4,1	65 400	320	616 000

Для грубых расчетов можно принимать значения коэффициентов теплоотдачи при конденсации паров жидких металлов равными 8—10% от теоретических значений.

ГЛАВА IV

КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Рассматривая взаимодействие жидкого металла с твердой поверхностью какого-либо конструкционного материала (как правило также металла), можно установить, что в этом процессе основную роль играет взаимная растворимость металлов и образование интерметаллических соединений. Определенное значение имеют образование химических соединений в системе (типа окислов) и проникновение жидкости между зернами твердого металла. Анализ условий равновесия химических реакций, сопровождающих взаимодействие металла с омываемой им поверхностью, позволяет выяснить направление процесса, но не может ничего сказать о скорости его протекания, которая должна определяться экспериментальным путем.

Если взаимная растворимость жидкого металла и материала-стенки в области рабочих температур очень мала, то, как показывает опыт, она слабо влияет на коррозионную стойкость материала.

Образование интерметаллических соединений нежелательно, но в некоторых случаях пленка соединения защищает поверхность материала от агрессивного воздействия среды.

На ход растворимости оказывает влияние температурный перепад, имеющийся в системе. Часто бывает так, что в изотермических условиях растворимость очень мала, а в неизоотермических велика, поскольку процесс растворения ускоряется переносом растворенных веществ из горячей зоны системы в холодную, где эти вещества выпадают из раствора. Они осаждаются на поверхности труб и могут иногда привести к их закупорке. Влияние неизотермичности на скорость коррозии по-разному сказывается на различных материалах. Например, скорость растворения железа в ртути сильно зависит от разности температур горячей и холодной зон, а скорость растворения железа в натрии — слабо. Некоторые примеси в жидком металле, например, кислород, ускоряют растворение.

Перенос каких-либо компонентов, входящих в состав материала, из одного участка системы в другой может возникнуть и при отсутствии температурных градиентов в ней. Во-первых, перенос может обуславливаться разнородностью металлов, из которых изготовлены отдельные участки контура. Действительно, предположим, что в системе имеется участок, изготовленный из металла *A* и участок, изготовленный из металла *B*, причем металлы *A* и *B* образуют между собой химическое соединение или твердый раствор. Если металл *A* растворяется в жидкости (хотя бы в очень малых количествах), то он будет переноситься ею к поверхности металла *B* и взаимодействовать с последним. Теоретически перенос может продолжаться сколь угодно долго, практически же он будет постепенно замедляться, так как слой твердого раствора (соединения) препятствует доступу металла *A* к поверхности металла *B*. Во-вторых, перенос некоторых элементов появляется в том случае, когда имеется разность электрических потенциалов между жидким металлом и стенкой. Некоторые авторы рекомендуют использовать это явление, носящее название электролитической диффузии, для уменьшения коррозии в среде жидких металлов.

Образование химических соединений на поверхности конструкционных материалов связано, главным образом, с наличием примесей в жидком металле. Например, примесь кислорода приводит к образованию на поверхности материала пленки его окиси, если только эта окись более химически устойчива, чем окись жидкого металла. Сравнивая свободные энергии реакций окисления металлов, можно определить, образование какого именно окисла наиболее вероятно.¹ Окисная пленка на поверхности материала может играть положительную либо отрицательную роль в повышении его коррозионной устойчивости, в зависимости от того, является ли она плотной и прочной или же рыхлой, непрочной.

Иногда добиваются уменьшения коррозионного действия жидкого металла, вводя в него специальные вещества — ингибиторы. Вводя, например, в ртуть титан или цирконий, можно устранить коррозию стали в ртутных установках. Механизм действия ингибиторов неясен. Тем не менее известно, что там, где присутствие кислорода в системе увеличивает коррозию, действие ингибиторов основано на связывании кислорода в нерастворимые в жидком металле окислы.²

Роль проникновения жидкости между зернами твердого материала в общем процессе коррозии зависит от состава материала

¹ Чем больше свободная энергия образования химического соединения, тем больше вероятность протекания реакции образования.

² Гипотеза о механизме действия ингибиторов в ртути высказана акад. Н. Т. Гудцовым (Н. Т. Гудцов, М. Н. Гавва, Воздействие ртути как теплоносителя на сталь в энергетических установках, изд. АН СССР, 1956). Ред.

и состояния его поверхности, т. е. ее обработки, распределения внутренних напряжений в поверхностном слое и т. д. Типичным примером межгранулярного проникновения служит взаимодействие ртути с латунной поверхностью.

При больших скоростях течения жидких металлов, в особенности тяжелых, поток которых обладает значительной кинетической энергией, становится заметной эрозия конструктивных материалов. Экспериментальных данных по этому вопросу накоплено пока еще очень мало. По американским данным, максимально допустимые скорости жидкого металла принимаются ~ 3 м/сек (для висмута, свинца и ртути) и ~ 8 м/сек (для натрия и сплава Na—K).

Лабораторные испытания стойкости материалов в жидкометаллических средах обычно проводятся в условиях, приближающихся к действительным. Материалом контейнера для жидкости служит либо материал образца, либо материал, с нею не взаимодействующий. Поверхность жидкого металла защищается от окисления подушкой инертного газа. Относительное перемещение образца и расплавленного металла достигается за счет свободной конвекции жидкости; вращения образца или державки с образцом; вынужденного движения жидкости. Испытания на эрозию поверхности материала в условиях кавитации проводятся при пониженных давлениях. Во всех случаях контролируется степень смачиваемости жидким металлом поверхности образца.

Табл. 22 содержит сводку сведений о стойкости конструктивных материалов в жидких металлах при трех температурах, а именно 300, 600 и 800° С.

При составлении таблиц коррозионной стойкости были приняты следующие значения скоростей коррозии, соответствующие «хорошей», «ограниченной» и «плохой» стойкости материала в среде.

Стойкость	Скорость коррозии, мм/год
Хорошая	Менее 1
Ограниченная	От 1 до 10
Плохая	Более 10

сравнительно незначительную максимальных коэффициентов теплопередачи.

Ниже приводятся более подробные сведения о коррозионной стойкости различных материалов в жидкометаллических средах.

25. Натрий, калий и их сплавы (табл. 23)

Металлические материалы. В многолетней практике производства и применения щелочных металлов были накоплены сведения о стойкости в них некоторых материалов. Однако данные сведе-

ния относились к области низких температур, как правило, незначительно превышающих температуры плавления металла. В этих условиях было найдено, например, что обыкновенная мягкая сталь не подвергается агрессивному воздействию расплавленного натрия, даже при очень большом времени воздействия (10—15 лет). В практике длительной эксплуатации охлаждаемых натрием клапанов авиационных двигателей внутреннего сгорания отмечалась сравнительно незначительная коррозия жаропрочных сплавов (13 ÷ 15% Cr, 13 ÷ 15% Ni, 1,75 ÷ 3% W) в среде щелочного металла при $t \sim 500\text{--}550^\circ\text{C}$. До того времени, как жидкие металлы стали находить широкое применение в качестве теплоносителей, высокие рабочие температуры встречались только при производстве сплавов Na—K дистилляцией смеси натрия и хлорида калия. В этом случае щелочные металлы находились в контакте с нержавеющей сталью типа 304 или 316 при 900° С и было замечено постепенное науглероживание поверхности стали.

Обширные исследования, проведенные в последнее время, показали, что количество конструктивных материалов, пригодных для использования в среде щелочных металлов, велико (см. табл. 23).

Коррозионное воздействие натрия, калия и сплавов на материалы по сравнению с другими жидкометаллическими теплоносителями (Li, Ga, Hg, Sn, Pb, Bi) является минимальным. Однако оно резко увеличивается при содержании кислорода в жидком металле, больших 0,01—0,02%, и в условиях значительных температурных перепадов в системе.

Лабораторные исследования стойкости различных материалов в жидком натрии¹ проводились многими авторами и в широком диапазоне изменения следующих переменных: температура (вплоть до 900° С); продолжительность опытов (до 5000 часов); количество примесей в металле; размер и форма испытываемых образцов; температурный перепад между отдельными участками системы; скорость течения металла; состав испытываемого материала. В некоторых случаях к жидкому металлу специально добавлялись вещества, которые должны были предотвращать его окисление, химически связывая кислород (бериллий, кальций). К сожалению, исследования проводились, как правило, без достаточного точного определения содержания кислорода в натрии, что объясняется сложностью отбора проб жидкого металла и самих методов анализа (см. гл. VII).

Повреждение углеродистой стали, как правило, обезуглероживается под воздействием щелочных металлов. Это явление отмечается всеми исследователями, производившими металлографический анализ поверхностного слоя образцов после испытаний. Интенсивность обезуглероживания низколегированных сталей зависит от количества кислорода в натрии, температуры и содер-

¹ Все сведения, которые приводятся ниже для натрия, относятся также к калию и к сплавам Na—K, за исключением случаев, оговоренных особо.

Стойкость конструкционных материалов в жидкометаллических средах

Жидкий металл → точка плавления, °C	Na-K (18-80)	Li (180)	Mg (651)	Zn (419,3)	Cd (321)	Hg (358)	Al (933)	Ga (29,8)	In (156,6)	Tl (231,9)	Pb (327)	Bi- Pb- Sn (271,3)	Sn (231,9)	3P (423)	6Li (635,2)
Черные металлы															
Чистое железо	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Мягкая углеродистая сталь	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Никоромистая сталь (C1, Mo или Sn)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Хромистая сталь (2-3% Cr; 1% Mo или Sn)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Ферритные нержавеющие стали (12-21% Cr)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Аустенитные нержавеющие стали (18-25% Cr)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Монпелье сталь (8-8,25-20% Cr)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Серый чугун	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450

Цветные металлы

Алюминий	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Висмут	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Хром	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Сплавы на основе меди (с Al, Sn или Pb)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Сплавы на основе меди (с Sn или Sn)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Сплавы на основе кобальта	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450

Никель и никелевые сплавы, °C, см.

Никель	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Никелевые сплавы (с медью)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Платина, золото, серебро	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Титан	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Цирконий	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450

Неметаллы

Оксид алюминия (плотная)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Графит (плотный)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Оксид бериллия (плотная)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Оксид магния (плотная)	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Фторид и другие силикаты	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Стекло пирекс	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Оксид титана и оксид циркония	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450
Плавленый кварц	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450	450

Температурный коэффициент линейного расширения
 Хорошая
 Плохая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Ограниченная
 Хорошая

Стойкость конструкционных материалов в среде натрия, калия и их сплавов



Многими исследователями отмечается факт науглероживания аустенитных нержавеющих сталей в среде щелочных металлов. Науглероживание становится заметным при температурах больших 550°С. На рис. 104 виден науглерожженный слой на поверхности образца нержавеющей стали типа 304 [102]. При температуре 800°С глубина науглероживания за время 100 часов достигала 0,25 мм. Источником углерода в системе являлся графитовый

тигель для жидкого металла. Науглероживание может быть связано с переносом углерода от поверхности углеродистой стали к поверхности нержавеющей стали, если обе поверхности омыва-

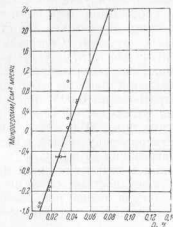


Рис. 102. Зависимость скорости коррозии нержавеющей стали типа 347 от содержания кислорода в натрии при $t = 540^{\circ}\text{C}$.

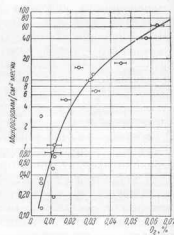


Рис. 103. Зависимость скорости коррозии армо-железа от содержания кислорода в натрии при $t = 540^{\circ}\text{C}$.

ваются одним и тем же жидким металлом. Источником углерода в системе является также углекислый газ, входящий в виде примеси в состав защитной газовой подушки.



Рис. 104. Науглероживание поверхностного слоя образца нержавеющей стали типа 304.

инконель, инконель X и чистый никель не обнаруживают следов воздействия натрия вплоть до 550°C . Результаты опытов по изучению стойкости некоторых сталей и жаропрочных сплавов в расплавленном натрии приведены в табл. 24.

Таблица 24
Стойкость некоторых конструкционных материалов в жидком натрии

Материал	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Содержание кислорода в натрии, %	Скорость коррозии, микрограмм/см ² месяц	Условия испытаний (статические или динамические)
Железо	510	0,01	200	Динамические
Углеродистая сталь	500	0,01	100	Статические
Сталь 1,25% Cr—0,5% Mo	500	0,01	100	С
„ 2,25% Cr—1% Mo	510	0,01	<100	Д
„ 5% Cr—0,5% Mo	510	0,01	<100	Д
„ 5% Cr—0,5% Mo	500	0,01	<100	С
„ 5% Cr—0,5% Mo	500	0,1	1800	С
„ 5% Cr—0,5% Mo	500	0,5	5800	С
„ 7% Cr—0,5% Mo	500	0,01	<100	С
„ 7% Cr—0,5% Mo	500	0,1	2000	С
„ 7% Cr—0,5% Mo	500	0,5	6000	С
„ 9% Cr—1% Mo	510	0,01	<100	Д
„ 9% Cr—1% Mo	500	0,01	<100	С
„ 9% Cr—1% Mo	500	0,1	2000	С
„ 9% Cr—1% Mo	500	0,5	5400	С
„ 9% Cr—1% Mo	715	0,01	400	С
„ 9% Cr—1% Mo	715	0,5	37000	С
„ 12% Cr	510	0,01	<100	Д
„ 12% Cr	500	0,01	<100	С
„ 12% Cr	500	0,1	700	С
„ 12% Cr	500	0,5	5100	С
„ 12% Cr	715	0,01	400	С

Продолжение табл. 24

Материал	Температура, °C	Содержание кислорода в натрии, %	Скорость коррозии, микрограмм/см ² месяц	Условия испытаний (статические или динамические)
Сталь 12% Cr	715	0,5	26 000	С
304 (нерж. сталь)	510	0,01	<100	Д
304 " "	500	0,01	<100	С
304 " "	500	0,1	*	С
304 " "	500	0,5	200	С
304 " "	648	0,01	<100	Д
304 " "	715	0,01	<100	С
304 " "	715	0,5	*	С
347 " "	510	0,01	<100	Д
347 " "	500	0,01	<100	С
347 " "	500	0,1	500	С
347 " "	500	0,5	500	С
347 " "	648	0,01	<100	Д
347 " "	715	0,01	<100	С
347 " "	715	0,5	*	С
310 " "	715	0,01	<100	С
310 " "	715	0,5	*	С
Инконель X	510	0,01	<100	Д
Инконель X	648	0,01	<100	Д
Инконель X	715	0,01	<100	С
Инконель X	715	0,5	*	С
A—286	648	0,01	<100	Д

Продолжение табл. 24

Материал	Температура, °C	Содержание кислорода в натрии, %	Скорость коррозии, микрограмм/см ² месяц	Условия испытаний (статические или динамические)
A—286	715	0,01	<100	С
A—286	715	0,5	*	С
17—14 Cu—Mo	648	0,01	<100	Д
17—14 Cu—Mo	715	0,01	<100	С
17—14 Cu—Mo	715	0,5	*	С
18 Cr—35 Ni	715	0,01	<100	С
18 Cr—35 Ni	715	0,5	*	С
Молибден	715	0,01	<100	С
Молибден	715	0,5	8000	С
Хастеллой	715	0,01	<100	С
Хастеллой	715	0,5	*	С

* Обнаружено значительное увеличение веса образца.

В натриевых контурах часто наблюдается заметный перенос некоторых элементов от одного участка системы к другому, в особенности, если эти участки из разнородных материалов. Перенос подобного типа может быть интенсивным и в отсутствии температурных перепадов в системе. Например, отмечено [102], что на поверхности молибденового образца при воздействии на него жидкого натрия, находящегося в контейнере из никеля, постепенно образуется слой сплава Ni—Mo (рис. 105). Растворение никеля и молибдена в натрии и их диффузия к твердой поверхности является взаимной, так как образование сплава Ni—Mo происходит и на поверхности контейнера. В результате протекания описанного процесса поверхностный слой образца становится твердым и хрупким.

Вторым примером подобного процесса служит перенос натрия алюминия к поверхности железа, сопровождающийся образованием интерметаллического соединения Fe—Al.

Опыты показали, что следующие вещества непригодны для использования вследствие высокой растворимости в натрии и ка-

лин: Sb, Bi, Cd, Ca, Au, Pb, Se, Ag, Sn. Магний обладает ограниченной стойкостью в щелочных металлах и может применяться только в контакте со сплавом Na—K при низких температурах.

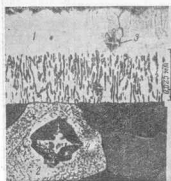


Рис. 105. Образование сплава Ni—Mo на поверхности молибденового образца, находящегося в среде натрия.

1 — сплав Ni—Mo; 2 — молибденовый образец; 3 — твердость по Виккерсу 1250; 4 — твердость по Виккерсу 140.

Платина быстро разъедается парами щелочных металлов, но не обнаруживает заметной растворимости в жидком натрии или калии. Сплав Na—K не воздействует на платину при комнатной температуре, однако при 600°С скорость коррозии довольно велика.

Взаимодействие натрия с медью сопровождается образованием сплава Na—Cu на поверхности меди. Этот процесс становится заметным при $t > 300^\circ\text{C}$. Если заполнить медную капсулу натрием и выдержать ее в течение 100 час. при $t = 980^\circ\text{C}$, то после вскрытия капсула оказывается пустой, а ее стенки — состоящими из сплава Na—Cu, отличающегося высокой твердостью и хрупкостью.

Цирконий вплоть до 600°С не растворяется заметным образом

в натрии. Скорость коррозии циркония в очень сильной степени зависит от содержания кислорода в жидком металле, так как в системе $\text{Zr} - \text{O}_2 - \text{Na}$ происходит избирательное окисление Zr, обладающего большим химическим сродством по отношению к кислороду, чем Na. На поверхности циркония постепенно образуется темный слой его двуокиси (ZrO_2). В результате переноса, происходящего интенсивно при температурах около 500°С и более, поверхностный слой материала становится твердым и хрупким. На рис. 106 показано увеличение твердости поверхностного слоя циркониевого образца, находящегося в среде натрия при температуре 500°С и содержании кислорода в жидком металле $\sim 0,01 \div 0,1\%$ [45]. По оси абсцисс отложено расстояние от поверхности в глубь образца, а по оси ординат — твердость в числах по Роквеллу. При содержаниях кислорода в Na, больших 0,005%, скорость окисления Zr при-

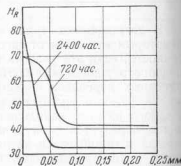


Рис. 106. Увеличение твердости поверхностного слоя циркониевого образца, находящегося в среде натрия (H_R — твердость по Роквеллу).

мерно постоянна и соответствует прибыли его веса, равной ~ 500 микрограмм/см²/месяц. Защита циркония от коррозии может быть достигнута за счет добавки в него веществ, поглощающих кислород. Например, хорошей стойкостью в натрии обладают сплавы циркония с титаном.

Поведение гафния в натрии аналогично поведению циркония.

Скорость коррозии бериллия в среде щелочных металлов становится заметной при содержании в них кислорода, большем 0,01%. Образующаяся на поверхности бериллия окисная пленка предохраняет металл от дальнейшего разрушения лишь в среде неподвижного натрия. Добавка к натрию кальция в количестве около 2% заметно снижает скорость коррозии.

Неметаллические материалы. Обычные стекла при $t < 300^\circ\text{C}$ не подвергаются вредному воздействию со стороны натрия; при более высоких температурах стекло «пирекс» быстро разрушается, в то время как стекло «Викор» сохраняет работоспособность до 400°С. На коррозионной стойкости стекол очень вредно скадывается присутствие в жидком металле кислорода.

Даркоид (резина, пропитанная огнеупорным веществом) успешно используется в контакте с натрием при сравнительно низких температурах (100—120°С).

Асбест может быть применен для сальниковых уплотнений, работающих в натриевой среде, при температурах до 150—170°С и давлениях до 3—4 атм. Однако при температуре 200°С и выше асбест начинает взаимодействовать со щелочными металлами.

Некоторые силиконовые резины теряют эластичность в результате воздействия натрия и калия.

Тефлон (тетрафторэтилен) при взаимодействии с Na полностью разрушается, превращаясь в черный порошок.

Карбиды вольфрама, титана, хрома и тантала, связанные с никелем или кобальтом, не поддаются агрессивному воздействию расплавленного натрия.

Окисы алюминия, магния, титана, циркония и другие химически стойкие по отношению к натрию вещества обладают сравнительно рыхлой структурой. Поэтому они могут впитывать расплавленный натрий и при резких колебаниях температур растрескиваются. Когда плотность оксидов искусственно повышена путем сплавления, они становятся пригодными для использования.

Поведение графита в среде расплавленного натрия. Испытания стойкости графита в неподвижном натрии показали, что потеря веса графитовыми образцами увеличивается, если имеется повышенная концентрация калия в натрии (0,01% и более) и натрий одновременно омывает поверхность графита и нержавеющей стали. В последнем случае происходит интенсивное науглероживание поверхностного слоя стали. На скорость растворения графита оказывает также влияние концентрация кислорода в жидком металле и температура последнего.

Некоторые опытные данные, относящиеся к статическим испытаниям стойкости графитовых образцов в натрии, залитом в стальные и никелевые капсулы, приводятся в табл. 25. При исследовании стойкости графита марки AGOT было обнаружено появление мелких трещин на поверхности образца, чего нельзя сказать о более мелкозернистых графитах марок AWG и AUF. Для изучения поведения графита в движущемся металле была использована цилиндрическая капсула из нержавеющей стали, в которую плотно вставлялся полый графитовый стержень, имеющий продольный паз на боковой поверхности. Полость паза соединялась с внутренней полостью стержня через отверстия на верхнем и нижнем его концах. Капсула вместе со стержнем и залитым в нее натрием подогревалась внизу до 800° С, в то время как температура верхней ее части поддерживалась равной 400° С, благодаря чему в системе возникала естественная циркуляция металла: вверх — по центральному отверстию в стержне и вниз — вдоль полости паза. После 432 часов работы боковой паз в холодной области оказался плотно закупоренным веществом, содержащим 8,5% Na и 91,5% С и плавящимся при температуре, во всяком случае, большей 600° С. Поверхность графита в самой нижней

части капсулы (в горячей зоне) оказалась разрушенной. Следовательно, в данном случае произошел перенос углерода из горячей зоны в холодную. Науглероживания стальной поверхности капсулы при температурах менее 550° С не наблюдалось.

Найдено, что при $t \sim 400 \div 500^\circ \text{C}$ и более внутренние пустоты (поры) графита, погруженные в натрий, целиком им заполняются. Графитовый стержень, опущенный одним концом в натрий ($t = 550^\circ \text{C}$) так, чтобы над уровнем жидкости¹ находилось ~ 150 мм его длины, в течение 50 часов полностью «пропитывался» натрием. Объем внутренних пустот составлял $\sim 22\%$ общего объема. При $t = 450^\circ \text{C}$ в течение этого времени (50 часов) натрием заполнялось только 60% объема пустот.

В литературе описываются данные испытаний графита на прочность в условиях резко меняющихся температур жидкого металла. В табл. 26 приводятся результаты испытаний на «термический удар», проведенных с графитовыми образцами в виде цилиндров диаметром 20 мм и длиной 25 мм и с различными жидкими металлами. Испытания заключались в предварительном подогреве образцов до указанной в таблице температуры и последующем их погружении в относительно холодный жидкий металл.

Таблица 25

Данные статических испытаний стойкости графитовых образцов в натрии

Марка графита	Материал капсулы	Температура, °С	Продолжительность опыта, час.	Изменение веса образца, %	Примечание
AGOT	Ст. 347	750	163	—9,1	Сильное науглероживание стали
AUF	Ст. 347	750	202	—5,0	То же
AGOT	Ni	750	216	0	Изменения состояния образца не обнаружено
AGOT	Ст. 347	675	423	—9,0	Сильное науглероживание
AGOT	Ст. 347	675	648	—7,5	То же
AGOT	Ст. 347	675	1454	—17,5	То же
AGOT	Ст. 347	600	163	—0,13	Умеренное науглероживание
AGOT	Ni	600	220	0	—
AUF	Ст. 347	600	650	—1,63	Умеренное науглероживание
AGOT	Ст. 347	600	1968	—0,92	То же
AGOT	Ст. 347	525	341	+0,07	Науглероживания не отмечено
AUF	Ст. 347	450	166	+9,3	—
AUF	Ст. 347	450	640	0	Изменения состояния образца не обнаружено
AUF	Ст. 347	450	2284	+0,19	Воздействия натрия на образец не обнаружено

Таблица 26

Данные испытаний графитовых образцов на термический удар

Температура подогрева образца t , °С	Жидкий металл	Температура металла t , °С	Результат испытания
900	Na	150	Образец разрушен, поверхность смочена натрием
700	Na	150	То же
600	Na	150	Образец сохранил первоначальный вид, поверхность смочена натрием
2500	Sn	300	Образец сохранил первоначальный вид, смачивание отсутствует
1500	Bi	300	То же
20	Al	1100	—

Стойкость жаропрочных материалов в натрии при высоких температурах. Приведенные выше сведения относятся к стойкости конструкционных материалов при температурах, как правило, не превышающих 600—700° С. Испытания некоторых жаропрочных материалов в среде натрия в области значительно больших температур (800—1500° С) были проведены Ридом [143]. Резуль-

¹ Пространство над уровнем жидкости было заполнено инертным газом (гелием).

Таблица 27

Коррозия некоторых жаропрочных материалов в натрии
(в статических условиях)

Материал	Температура натрия t , °C	Продолжительность опыта τ , час.	Изменение веса образца, %	Результаты испытаний
Молибден (чистотой 99,9%)	940	168	0,0001	Коррозии не обнаружено
	1500	100	—	Межгранулярная коррозия на глубину 0,025 мм
Вольфрам (чистотой 99,9%)	900	168	от -0,07 до +0,01	Не подвергается коррозии
Тантал (чистотой 99,9%)	900	168	от -0,09 до +0,01	Не подвергается коррозии, поверхность образца иногда темнеет
Кеннаметалл (K138A) 80% TiC, 15% Co, 5% (WC+TaC)	900	168	от -0,07 до +0,20	Коррозия очень мала
Графит марки AWG	900	168	-6,0	Корродирует
	900	841	-60,0	Сильно корродирует
Монокристалл карбида кремния	900	168	+1,0	Коррозия незначительная
Синтетический шпинель	925	168	-100,0	Полностью растворяется в натрии
Оксид алюминия марки „Морганит“ пористостью 6%	940	168	—	Сильная коррозия, рассыпается на мелкие черные зерна
Оксид алюминия (синтетический сапфир)	900	168	-1,0	Коррозия незначительная, материал остается прозрачным
Оксид магния пористостью 12%	940	168	+1,2	Материал чернеет и разбухает

Продолжение табл. 27

Материал	Температура натрия t , °C	Продолжительность опыта τ , час.	Изменение веса образца, %	Результаты испытаний
Оксид магния (монокристалл)	925	168	-0,02	Не корродирует
Оксид циркония пористостью 23%	890	168	+3,7	Корродирует, образцы разрушились
Дисилицид молибдена (литой)	900	168	—	Коррозия очень мала
Оксид тория	925	168	-0,06	Не подвергается коррозии

таты его опытов приводятся в табл. 27. По данным испытаний стойкости молибденовой проволоки в парах натрия при $t = 1500^\circ \text{C}$, натрий вызывает в этом материале межгранулярную коррозию, которую можно считать сравнительно слабой, учитывая крайне тяжелые условия испытаний. Как видно из табл. 27, степень коррозии окисей магния, алюминия и циркония определяется степенью чистоты и величиной пористости образцов.

26. Литий

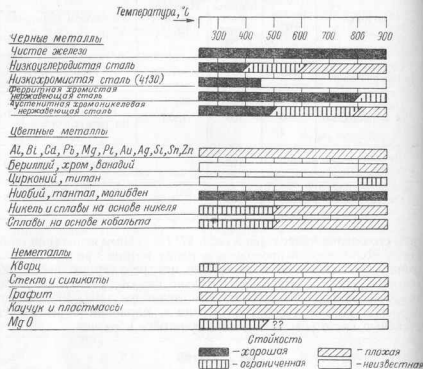
(табл. 28).

Литий принадлежит к щелочным металлам, однако по своим химическим свойствам он стоит ближе к щелочно-земельным элементам. Этим обстоятельством объясняется то, что Li ведет себя по отношению к конструкционным материалам более агрессивно, чем натрий или калий. На стойкость материалов по отношению к литию оказывают определенное влияние примеси в жидком металле. Опытных данных, позволяющих количественно оценить это влияние, в настоящее время недостаточно.

Нитрид лития (Li_3N), который образуется при взаимодействии азота как с твердым, так и с расплавленным металлом, чрезвычайно агрессивен по отношению к конструкционным материалам. Не найдено материала (ни среди металлов, ни среди керамических веществ), способного успешно сопротивляться коррозии в среде расплавленного нитрида лития.

Присутствие кислорода в литии более вероятно в виде гидрата окиси (LiOH), чем в виде самой окиси (Li_2O), поскольку известно, что наличие влаги в воздухе предотвращает окисление лития. Гидрат окиси лития в расплавленном состоянии также агрессивен

Стойкость конструкционных материалов в среде лития



по отношению к конструкционным материалам, как и Li_3N . При нагреве до 455°C LiOH разлагается с образованием окиси лития. LiOH и Li_2O обладают свойством взаимодействовать с большинством окислов металлов.

Примесь хлора присутствует в литии как в свободном виде, так и в виде хлорида лития (LiCl); последний сильно разъедает поверхность железа и меди.

Гидрид лития образуется при воздействии на жидкий металл водяных паров или водорода; при высоких температурах он взаимодействует с металлами и керамическими материалами.

Жидкий литий активно реагирует также с карбидами металлов. Ряд примесей (окись, гидрат окиси, нитрид и гидрид) может быть удален из расплавленного металла путем фильтрации. Замечено, что сетка из нержавеющей стали, через которую отфильтровываются примеси, постепенно разрушается, причем разрушение вызывается, главным образом, вымыванием никеля из стали.

Нержавеющие хромоникелевые стали при $t > 550^\circ\text{C}$ могут быть использованы лишь при условии низкого содержания кисло-

рода и азота в жидком металле и небольших температурных перепадов в системе. Процесс коррозии нержавеющей стали в среде лития сопровождается интенсивным межгранулярным проникновением жидкого металла. На рис. 107 показана картина проникновения лития во всю толщу стенки трубы из нержавеющей стали типа 316 [102]. Толщина стенки равна 0,9 мм; в литий было предварительно добавлено небольшое количество нитрида (0,1%). В тех же условиях, но при отсутствии нитрида в жидком металле, глубина межгранулярного проникновения составила всего 0,03 мм.

Картина избирательного вымывания литием никеля из аустенитной нержавеющей стали типа 304 показана на рис. 103 [102]. Температура лития составляла 1000°C , продолжительность опыта — 400 часов. На рисунке виден вызван-

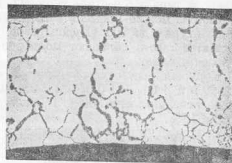


Рис. 107. Межгранулярное проникновение лития в стенку трубы из нержавеющей стали при $t = 870^\circ\text{C}$ после выдержки в течение 100 час.

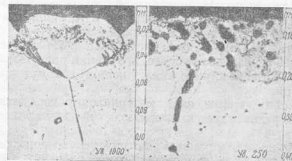


Рис. 108. Вымывание литием никеля из нержавеющей стали типа 304.

1 — материал сосуда для лития — нержавеющая сталь типа 304; 2 — материал сосуда для лития — железо.

ный вымыванием никеля переход аустенита стали в феррит (в поверхностном слое).

Скорость коррозии нержавеющей стали особенно велика, когда материал сосуда для жидкого металла содержит значительное количество железа. В этом случае вымываемый из стали никель диффундирует через литий к поверхности железа.

Таблица 29

Коррозионная стойкость конструкционных материалов в среде галлия

Черные металлы	Температура, °C										
	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
Нержавеющая сталь типа 18-8	[Хорошая]										
Нержавеющая сталь 16 % Cr	[Хорошая]										
Инструментальная сталь (W, Cr, Mo, V)	[Плохая]										
Менее	[Неизвестная]										
Цветные металлы											
Вольфрам	[Хорошая]										
Титан	[Хорошая]										
Сплав 93% Ti, 7% W	[Хорошая]										
Молибден	[Плохая]										
Титан	[Хорошая]										
Сплав	[Хорошая]										
Сплав	[Хорошая]										
Марганец	[Хорошая]										
Сплав 50% Cr, 30% Mn	[Хорошая]										
Никель	[Хорошая]										
Сплав 80% Ni, 20% W	[Хорошая]										
Углерод	[Плохая]										
Медь	[Хорошая]										
Платина	[Хорошая]										
Алюминий	[Хорошая]										
Al, Cu, Cd, Fe, Sn, Zn	[Хорошая]										
Менее	[Неизвестная]										
Кварц	[Хорошая]										
Сплав	[Хорошая]										
Графит	[Хорошая]										
SiC	[Хорошая]										
Стекло	[Хорошая]										
Сплав	[Хорошая]										
Резина	[Плохая]										

Стойкость.

- [Хорошая] — хорошая
- [Плохая] — плохая
- [Неизвестная] — неизвестная

розии тантала определяется, главным образом, интенсивностью растворения твердого материала, в то время как при 800°С начинает преобладать диффузия галлия внутрь поверхностного слоя Ga, сопровождающаяся образованием химического соединения между ними. Элементы, близкие по химическим свойствам, часто ведут себя по-разному в среде галлия. Например, молибден, взаимодействуя с Ga, образует несколько продуктов реакции, в том числе один — в твердом растворе. В то же время вольфрам, химические соединения которого изоморфны с соединениями молибдена, не реагирует с галлием вплоть до 800°С. Галлий обладает свойством смачивать окись магния, но не смачивает окисей бериллия и алюминия. Окиси Mg, Be, Al и большинство керамических веществ обладают удовлетворительной стойкостью в среде жидкого Ga. Алюминий быстро разрушается в среде галлия, даже если его поверхность анодирована.

Приводимые в табл. 29 сведения относятся в большинстве к испытаниям материалов в неподвижном или почти неподвижном галлии. Поясним некоторые из этих сведений подробнее.

В качестве конструкционного материала для оборудования, которое должно работать в среде лития при температурах до 700°С, рекомендуется нержавеющая сталь с низким содержанием углерода типа 316 и сталь типа 347. В области температур от 700 до 1000°С можно применять нержавеющую сталь типа 310. При температурах до 800°С удовлетворительной коррозионной стойкостью в литии обладают молибден, вольфрам, ниобий, тантал и армко-железо.

Коррозионная устойчивость монель-металла (68% Ni; 1,25% Mn; 1,0% Fe; 0,05% Si; ост. Cu) в среде жидкого лития очень невелика; при 300°С Li растворяет монель-металл в количестве 18%.

Бериллий быстро разрушается в среде лития при температурах порядка 1000°C . Скорость коррозии Ве при $t \sim 500^{\circ}\text{C} \sim 1600$ микрограмм/см²·месяц.

Замечено, что при $t \sim 1000^\circ \text{C}$ вольфрам разрушается в расплавленном литии, находящемся в сосуде из железа армко.

При взаимодействии лития с цирконием на поверхности последнего образуется тусклая пленка нитрида циркония (ZrN), что связано, очевидно, с присутствием в литии азота (в виде Li_3N).

Следующие металлы не могут быть рекомендованы для использования в силу их плохой коррозионной стойкости в литии: Al, Ba, Bi, Ca, Cd, Au, Pb, Mg, Pt, Si, Ag, Sr, Tl, Sn, Zn, Cu, Ni и сплавы на основе Ni.

Кварц обладает удовлетворительной стойкостью только в среде лития, очищенного от окиси и нитрида, и то лишь при температурах до $\sim 280^\circ\text{C}$. При более высоких температурах образуется силицид лития (Li_2Si). Если расплавить обычный технически чистый металл в кварцевом сосуде, его стенки разрушаются почти немедленно. Обычное стекло также непригодно для применения в среде лития.

Большинство керамических материалов разъедается литием, поэтому его рекомендуется плавить в стальных или железных тиглях.

Расплавленный Li проникает во внутренние поры окиси магния, но не вызывает ее коррозионного разрушения.

27. Галлий

(табл. 29)

С точки зрения коррозионного воздействия на материалы галлий является наиболее опасным из всех исследованных жидких металлов. Лишь небольшое число материалов (огнеупорные окислы, кварц, графит, вольфрам и тантал) обладает удовлетворительной стойкостью в Ga при высоких температурах.

Механизм взаимодействия Ga с конструкционными материалами определяется рядом условий и, прежде всего, уровнем температур. Например, при температурах до 600°С скорость кор-

Стойкость конструкционных материалов в среде ртути

При $t = 600^\circ\text{C}$ и выше хром разрушается в присутствии жидкого галлия; в то же время известно, что взаимная растворимость этих металлов отсутствует и что они не образуют между собой химических соединений. Поэтому можно ожидать удовлетворительной стойкости Cr в галлии при температурах, меньших 600°C . Взаимодействуя с титаном, галлий образует химическое соединение Ga_3Ti . Такие элементы как Cu , Pt , Zr , Ni , V , Mn , Ag , Au , Ce , Pr , Cd , Fe , Ge , Sn и In , очевидно непригодны для практического использования; они образуют с галлием твердые растворы. Однако в литературе имеются сведения о том, что Cu , Pt и Zr не подвергаются коррозии в среде галлия при температурах порядка 100°C .

Растворимость тантала в галлии составляет 0,14% при 500°C и 4,2% при 600°C . Несколько лучшей коррозионной стойкостью по сравнению с чистым танталом обладает сплав тантал—вольфрам (93% Ta , 7% W).

Тигли, изготовленные из окиси бериллия, не подвергаются агрессивному воздействию со стороны галлия вплоть до температур порядка 1600°C (при кратковременном использовании) и 800°C (при длительном использовании). Специальные исследования подтвердили хорошую стойкость BeO вплоть до 1000°C .

Плавная окись кремния обладает хорошей стойкостью в галлии при температурах до $\sim 1200^\circ\text{C}$; в присутствии кислорода стойкость ухудшается.

Алюминиевые тигли совершенно не подвергаются воздействию со стороны галлия при $t = 1030^\circ\text{C}$.

Окись циркония при высоких температурах смачивается галлием, при этом жидкий металл проникает вглубь твердого материала.

Пластмассы и резина обнаруживают удовлетворительную стойкость в среде галлия вплоть до температур их термического разложения.

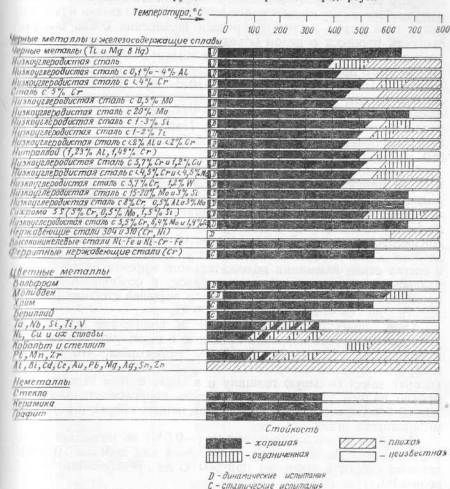
28. Ртуть

(табл. 30)

Углеродистые и легированные стали. Обширные исследования коррозионного воздействия ртути на конструкционные материалы проводились в связи с использованием бинарных (ртутно-водяных) установок в энергетике.

Стали углеродистые и легированные при кратковременном воздействии на них ртути не подвергаются коррозии. Однако длительные испытания крупных установок показали, что в относительно холодных участках системы на внутренних стенках труб из углеродистой стали постепенно накапливается осадок из кристаллического железа и его окиси.

Лабораторные испытания стойкости материалов проводились, как правило, в условиях естественной конвекции жидкости при



температурах вплоть до 800°C и при сравнительно низких скоростях течения металла (0,01—0,05 м/сек). Скорость коррозии определялась в зависимости от химического состава материала; добавок к ртути; времени опыта; температуры. Оказалось, что низколегированные стали, например, сталь, содержащая 5% Cr , 0,5% Mo , 1% Si , обладают лучшей стойкостью в ртути, чем углеродистые стали. При этом добавка в ртуть некоторых элементов, в частности, титана и магния, сильно снижает скорость коррозии. Оказывается также, что наличие даже небольших скоростей движения ртути и небольших температурных перепадов в системе заметным образом увеличивает коррозию сталей.

Стоимость сталей различного состава в движущейся ртути

Материал	Продолжительность опыта, час	Максимальная температура в системе, °C	Скорость коррозии	
			микрограмм см ² ·мес	мм/год
Углеродистая сталь (мягкая) ~0,2% C	10 000	482	— 7 000	4
	10 000	538	— 15 000	9
	10 000	593	— 37 000	22
	10 000	649	— 88 000	53
Сталь, легированная алюминием				
	0,1% Al	162	— 28 000	17
	0,2% Al	48	— 18 000	11
	0,5% Al	257	— 64 000	40
	1% Al	95	— 52 000	32
	4% Al	113	— 69 000	43
	4% Al	48	— 7 000	4
Хромистая сталь				
	0,2% Cr	46	— 13 000	8
	0,5% Cr	138	— 7 000	4
	4% Cr	138	— 23 000	14
	5% Cr	10 000	— 3 000	2
Молибденовая сталь				
	0,5% Mo	161	— 86 000	53
	20% Mo	64	<— 500	<0,3
Кремнистая сталь				
	1% Si	67	— 7 000	4
	2% Si	107	— 11 000	7
	3% Si	67	— 7 000	4
Сталь, легированная титаном				
	1% Ti	329	— 9 000	6
	1% Ti	329	— 39 000	24
	2% Ti	329	— 7 000	4
	2% Ti	329	— 15 000	9
Сталь, легированная алюминием и хромом				
	0,1% Al; 0,1% Cr	136	— 46 000	29
	0,5% Al; 0,5% Cr	137	— 37 000	23
	2% Al; 2% Cr	48	— 44 000	27
	2% Al; 2% Cr	142	— 13 000	8

Основную роль в механизме взаимодействия ртути с поверхностью стали играет, по-видимому, растворение железа, скорость которого определяется величиной коэффициента диффузии железа в ртуть. Поскольку концентрация железа в прилегающем к поверхности слое ртути достигает предела насыщения очень быстро, скорость процесса в целом определяется интенсивностью отвода частиц растворенного железа в объем жидкого металла. Величина упомянутого предела насыщения сильно зависит от температуры, составляя $1,5 \cdot 10^{-6}\%$ при 25°C и $9,6 \cdot 10^{-6}\%$ при 700°C . Как показывают опыты, при повышении температуры на каждые 100°C , начиная с 500°C , скорость коррозии углеродистой стали в ртути увеличивается примерно в пять раз. Например, при 500°C скорость коррозии была найдена равной 5 мм/год , а при 800°C — 560 мм/год .

Влияние состава сталей на сопротивляемость их коррозии в ртути иллюстрируется табл. 31. Как видно из таблицы, углеродистые стали имеют хорошую стойкость в движущейся ртути при температурах ниже 400°C , ограниченную стойкость — вплоть до 550°C и плохую стойкость при более высоких температурах. Антикоррозионные свойства углеродистой стали улучшаются при добавке к ней следующих элементов: Cr, Si, Ti, Mo; введение в состав стали алюминия положительного эффекта не дает. При удачном сочетании легирующих добавок, в особенности хрома, кремния и молибдена, можно добиться хорошей стойкости стали вплоть до температур порядка 600°C .

Хром, присутствующий в стали в количестве $0,2\text{--}0,4\%$, уменьшает скорость коррозии примерно в шесть раз. Добавка Cr в количестве 4% значительно менее эффективна, что связано с образованием на поверхности материала пленки окиси хрома, которая имеет большую толщину и в связи с этим недостаточно прочно на ней удерживается. Скорость коррозии стали, содержащей 5% Cr, всего лишь наполовину меньше скорости коррозии углеродистой стали.

Молибден в малых количествах ($\sim 0,5\%$) не повышает антикоррозионных свойств стали, в то время как добавка 20% Mo снижает скорость коррозии при 650°C до пренебрежимо малой величины.

Кремний, добавляемый в сталь в количествах $1\text{--}3\%$, уменьшает скорость ее коррозии примерно в десять раз при 640°C .

Сталь, содержащая $1\text{--}2\%$ титана, обладает стойкостью, в $4\text{--}5$ раз превышающей стойкость углеродистой стали.

Из сталей с хромом и алюминием наилучшие антикоррозионные свойства имеет нитраллой ($1,23\% \text{ Al}$; $1,49\% \text{ Cr}$). Скорость его коррозии в движущейся ртути при $t=650^\circ\text{C}$ составляет 4 мм/год , что примерно в десять раз меньше скорости коррозии углеродистой стали в этих же условиях. Растворимость нитраллойа в ртути примерно такова же, что и растворимость чистого железа.

Продолжение табл. 31

Материал	Продолжительность опыта, час.	Максимальная температура в системе, °C	Скорость коррозии	
			микрограмм см ² ·месяц	мм/год
Нитраллой (не азотируемый) 1,23% Al; 1,49% Cr	165 2	650 615	—7 000 —6 000	4 4
Сталь, легированная хромом и медью 5,7% Cr; 1,2% Cu	161	670	—8 000	5
Сталь, легированная хромом и молибденом 0,5% Cr; 0,5% Mo 4,5% Cr; 4,5% Mo 4,9% Cr; 0,5% Mo	140	650	—6 000	4
	140	640	—6 000	4
	161	670	—86 000	53
Сталь, легированная хромом и вольфрамом 5,7% Cr; 1,2% W	100	600	—26 000	16
Сталь, легированная молибденом и кремнием 15% Mo; 3% Si 20% Mo; 3% Si	89	655	—1 000	0,6
	88	655	<—500	<0,3
Сталь, легированная хромом, молибденом, кремнием 4,6% Cr; 0,5% Mo; 1,23% Si	140	640	—6 000	4
Сильхромо SS 4 ÷ 6% Cr; 0,45 ÷ ÷ 0,65% Mo; 1—2% Si	10 000	492	—300	0,2
	10 000	538	—800	0,5
	10 000	593	—1 800	1,1
	10 000	649	—4 000	2,5
Сталь 5,5% Cr; 6,4% Mo; 1,4% Si	280	588	—700	0,4
	982	620	—800	0,5
	111	650	—800	0,5

Продолжение табл. 31

Материал	Продолжительность опыта, час.	Максимальная температура в системе, °C	Скорость коррозии	
			микрограмм см ² ·месяц	мм/год
Сталь, легированная алюминием, хромом, молибденом, кремнием 0,8% Al; 5% Cr; 0,5% Mo; 0,9% Si	450	650	—64 000	38
Нержавеющая сталь типа 304 18% Cr; 8% Ni	450	652	—32 000	20
Нержавеющая сталь типа 310 25% Cr; 20% Ni	400—500	650	—77 000	47

Примечание. Знак минус означает убыль веса образца.

Сталь, содержащая 4—6% Cr, 0,45—0,65% Mo и 1—2% Si, при использовании ее в практике эксплуатации ртутных котлов обнаружала стойкость, превышающую стойкость углеродистой стали приблизительно в 20 раз. Высокохромистые стали ферритного класса обнаружили хорошую стойкость в неподвижной ртuti при 550° C; их испытания в движущейся среде не проводились. Как показали опыты, при высоких температурах ($t > 650^{\circ}\text{C}$) антикоррозионные свойства хромоникелевых сталей аустенитного класса по отношению к движущейся ртuti неудовлетворительны. Сплавы на никелевой основе обнаруживают хорошую стойкость в неподвижной ртuti при 550° C.

Влияние добавок к/Hg на скорость коррозии углеродистой стали иллюстрируется табл. 32. Наилучшей добавкой с точки зрения уменьшения коррозии является титан. Присутствие в ртuti 0,001% Ti снижает скорость коррозии (при 650° C) до пренебрежимо малой величины; при температуре 455° C аналогичный эффект оказывает добавка, равная 0,0001% Ti-Zr, Cr, Ni и Al тоже могут служить ингибиторами (замедлителями) коррозии, но эти элементы необходимо вводить в жидкий металл в больших количествах, чем титан. Добавки Cu, Pb и Sn увеличивают агрессивное воздействие ртuti на углеродистую сталь.

В дополнение к ингибиторам коррозии к ртuti часто добавляют некоторые другие вещества. При этом преследуется двоякая цель: 1) уменьшить окисление стальной поверхности, что способствует также улучшению ее смачиваемости жидкостью и тем самым

Таблица 32

Влияние добавок к ртути на скорость коррозии углеродистой стали

Добавляемый элемент	Продолжительность опыта, час.	Температура, °С	Скорость коррозии	
			микрограмм см ² месяц	мм/год
Без добавок	От 40 до 175	482	6 500	4
То же		649	88 000	53
» »		800	990 000	560
0,1% Sn		640	4 200 000	2590
1% Cu		650	360 000	222
1% Pb		650	280 000	173
10% Pb		700	280 000	173
1% Na		650	80 000	49
0,25% Al		650	600	0,37
0,25% Cr	—	600	<500	<0,3
1% Ni		600	<500	<0,3
0,0001% Ti	От 100 до 2000	454	<500	<0,3
0,001% Ti		538	<500	<0,3
0,04% Zr		625	<500	<0,3
0,02% Zr		625	1000	0,66

улучшает условия теплоотдачи; 2) удалить из ртути находящиеся в ней в свободном состоянии кислород, азот и водяные пары, что повышает эффективность действия основного ингибитора. Следовательно, эти добавки должны иметь большее химическое сродство по отношению к кислороду и азоту, чем вещество — ингибитор (чаще всего титан) и материал поверхности (в основном железо). Наиболее подходящими элементами для этих целей являются магний и кальций; из них предпочтительнее Mg в силу большей доступности и лучшей растворимости в Hg. Добавка 0,002% Mg приводит к полному поглощению свободного кислорода в ртути.

Щелочные металлы могут быть использованы в меньшей степени для улучшения смачиваемости стали ртутью. Натрий, например, в условиях работы ртутных установок образует с железом соединение $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, которое нерастворимо в ртути и, осаждаясь в трубопроводах системы, может привести к их закупориванию.

Прочие металлы и сплавы. По изучению стойкости цветных металлов и сплавов в среде движущейся ртути накоплено очень мало данных. Единственными материалами, антикоррозионные свойства которых подверглись детальному изучению, являются молибден, вольфрам и стеллит.

Установлено, что следующие металлы вполне пригодны для изготовления оборудования ртутных установок: W, Mo, Cr и Be.

Можно предполагать, что Ta, Si и Ti также обладают удовлетворительными антикоррозионными свойствами. Следующие металлы и сплавы имеют ограниченную стойкость по отношению к ртути: Ni, никонель, монель, Cu и сплавы на основе Cu, Co, стеллит, Pt, Mn, Zr. Некоторые металлы хорошо растворимы в ртути: Al, Bi, Cd, Ca, Au, Pb, Mg, Ag, Sn, Zn. Сплавы, содержащие заметные количества этих элементов, не должны применяться в контакте со ртутью.

Неметаллические материалы. По-видимому, керамические материалы пригодны для использования в ртутной среде. Углерод нерастворим в Hg, по крайней мере до 350°С, в связи с чем можно ожидать, что графит достаточно стоек в ртутной среде.

29. Свинец, висмут, олово и их сплавы

По степени коррозионного воздействия на конструкционные материалы Pb, Bi и Sn близки друг к другу (табл. 33).

Свинец. Ряд примесей в жидком свинце и, в первую очередь, кислород, сурьма, мышьяк, олово и цинк оказывают вредное влияние на стойкость железа и сталей в его среде. Данных, позволяющих количественным образом учесть это влияние, накоплено еще мало, что прежде всего связано с трудностью проведения точного анализа на содержание кислорода в свинце.

Нержавеющие стали серии 400, обычная углеродистая сталь, молибден и никель обладают удовлетворительной коррозионной стойкостью в среде неподвижного свинца при температурах до 800°С. Значительно худшими антикоррозионными свойствами обладают нержавеющие стали серии 300.

Для изучения переноса конструкционных материалов движущимся свинцом в Окриджской национальной лаборатории США [102] был использован циркуляционный контур из кварцевых труб. На горячем и холодном участках контура были установлены сменные трубы-образцы длиной 250 мм каждая. При испытании образцов из сплава железа с хромом было обнаружено выпадение кристаллов железа на холодном участке, причем часть кристаллов осаждалась на поверхности трубы-образца, а часть циркулировала в потоке свинца. На рис. 109 показано сечение трубы вместе с застывшим свинцом и кристаллами железа в его массе.

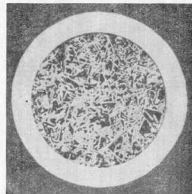
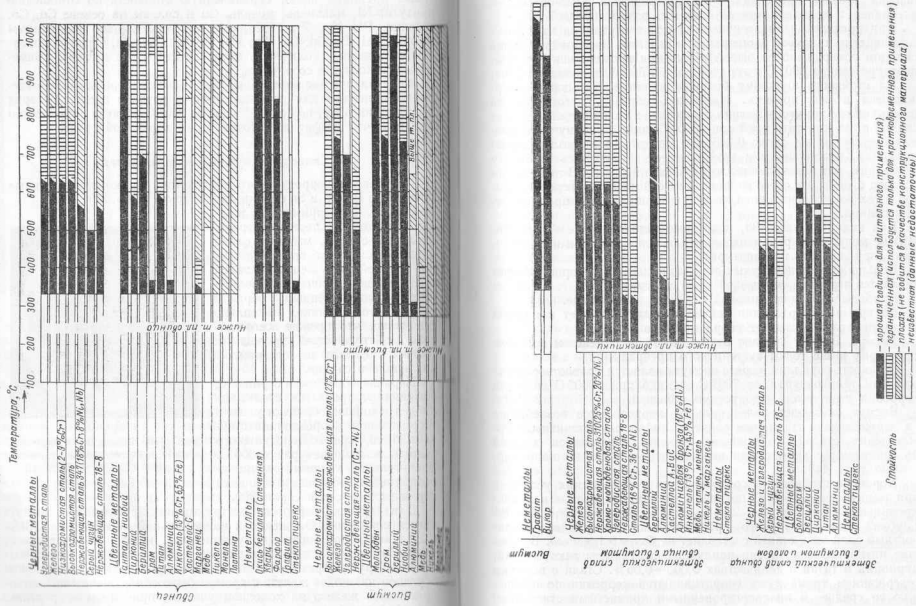


Рис. 109. Выпадение кристаллов железа в потоке свинца на холодном участке контура.

Таблица 33

Стойкость конструкционных материалов в свинце, висмуте и сплавах свинца, висмута и олова



Кристаллизация постепенно привела к полной закупорке трубы и прекращению циркуляции. Как показали опыты, интенсивный перенос железа происходит уже при разности растворимостей в горячем и холодном местах системы, равной 0,0001 %.

При проведении аналогичных опытов с образцами из никеля и молибдена никакого растворения и переноса материала образца свинцом обнаружено не было. Испытания проводились при температуре свинца 800°С в горячей зоне и 550°С в холодной зоне.

На стойкость циркония большое влияние оказывают содержащиеся в нем примеси. Например, образец, изготовленный из циркония с примесью магния и углерода и находившийся в среде свинца в течение пяти дней при 1000°С, имел толщину зоны проникновения свинца около 0,025 мм. При этом кристаллы (зерна) циркония, находящиеся в этой зоне, не подверглись никакому изменению, как показал металлографический анализ. В то же время образцы с меньшим содержанием примесей после проведения опытов в тех же условиях имел меньшую толщину зоны проникновения свинца.

Как видно из табл. 33, некоторые металлы (Cu, W, Sn, Zn, Mn) не могут быть рекомендованы для использования в среде Pb даже при низких температурах.

Большинство огнеупорных окислов и силикатов хорошо сопротивляются агрессивному воздействию со стороны Pb.

Карбиды¹ обладают плохой стойкостью в свинце.

Во время затвердевания свинец иногда прилипает к поверхности кварца и вызывает ее растрескивание.

Висмут. Висмут активно взаимодействует с железом при температурах выше точки аустенитного превращения.

Стойкость бериллия в среде висмута является удовлетворительной при температурах до 700°С, однако при 1000°С скорость коррозии становится недопустимо большой.

Висмут оказывает более сильное коррозионное воздействие на нержавеющие стали, чем свинец. Стойкость аустенитных нержавеющих сталей, содержащих никель, оказывается худшей по сравнению с хромистыми нержавеющими сталями, например, сталью типа 446.

Хорошую стойкость в среде висмута в статических условиях при температуре ~500°С показали хромомолибденовые и хромокремниевые стали состава: 2,25 % Cr; 1 % Mo и 5 % Cr; 1,5 % Si. Глубина межгранулярного проникновения висмута в поверхностный слой этих сталей составляет не более 0,1 мм/год. В качестве ингибиторов коррозии наилучшие результаты дают магнии, цирконий и титан в количествах 0,005—0,05 %. Стали с высоким содержанием хрома хуже сопротивляются коррозии по сравнению со средне- и низколегированными хромистыми сталями.

В условиях значительных перепадов температур в системе из нержавеющей стали с движущимся висмутом наблюдается кристаллизация сплава Fe—Cr на относительно холодном участке контура, подобно тому, как это отмечалось в опытах со свинцом (см. выше). Промежутки времени, необходимый для того, чтобы весь трубопровод забился кристаллами сплава, может быть сравнительно небольшим (300—400 часов).

Если поверхность стали заметным образом окислена, в холодных местах системы наблюдается также образование скоплений окиси Bi_2O_3 в нерастворимом виде.

Интенсивность переноса компонентов стали висмутом сильно уменьшается при добавке к жидкому металлу циркония и магния. Так, например, трубы из хромистой стали диаметром 10—15 мм полностью забиваются высидившимися из раствора веществами на холодных участках после 300—400 часов работы, если висмут не содержит никаких добавок. В то же время при добавке к жидкому металлу 0,01—0,1 % Zr и 0,01—0,1 % Mg закупорки труб диаметром более 10 мм не наблюдается даже после 10 000—20 000 часов непрерывной работы.

Уменьшение переноса компонентов стали при добавке к висмуту циркония связывают обычно с адсорбцией циркония на поверхности стали и образованием на ней слоя, предохраняющего материал стенки (в основном, железо) от растворения.

В отличие от свинца, висмут сильно взаимодействует с цирконием.

Никель и сплавы на основе никеля быстро разрушаются в среде жидкого висмута. Cu, Mn, Mg, Zn, Pt и Sn нельзя применять в контакте с висмутом. Эти металлы образуют с ним сплавы эвтектического состава, имеющие соответственно температуры плавления: 270,3; 268; 260; 254,5; 266; 139°С и процентные содержания перечисленных элементов: 0,2; 0,6; 0,54; 2,7; 1,0, 42 %.

Кварц успешно применялся при изготовлении сосудов для жидкого висмута, работающих при температурах 500—1000°С. Следует помнить, что висмут смачивает поверхность кварца, «прилипает» к ней и, расширяясь во время затвердевания, может вызвать растрескивание материала.

Растворимость углерода в висмуте составляет 0,012 % при 1385°С и 0,017 % при 1408°С; при 1000°С она существенно меньше 0,01 %. Графитовые тигли использовались для заливок их расплавленным висмутом ($t \sim 1000^\circ\text{C}$) и обнаружили достаточно хорошую коррозионную стойкость. Тем не менее, часто наблюдаются случаи разрушения тиглей во время затвердевания металла в них.

Стойкость жаропрочных металлов в висмуте при высоких температурах. Испытания некоторых жаропрочных материалов в среде висмута в области больших температур (800—1500°С) были проведены Ридом [143]. Результаты его опытов приводятся в табл. 34.

¹ Опыты проводились с карбидами интергранулярного типа.

Коррозия некоторых жаропрочных материалов в висмуте
(в статических условиях)

Материал	Температура висмута, °C	Продолжительность опыта, час.	Содержание в висмуте после опыта, %	Результаты испытаний
Молибден (чистотой 99,9%)	1000	167	0,06	Коррозии не обнаружено, поверхность смочена висмутом
	1430	2	—	Коррозии не обнаружено
Вольфрам (чистотой 99,9%)	1000	167	0,001	
Тантал (чистой 99,9%)	1000	227	0,11	Сильно выраженное межкристаллитное разрушение; поверхность смочена висмутом
Рений	1000	* 250	0,006	Коррозии не обнаружено
Кеннаметалл (K138A) (TiC = 80%, Co = 15%, WC + TaC = 5%)	1000	188	0,01 Ti 0,02 Co	
Графит марки AWG	1400	168	—	
Графит марки AUF	1400	168	—	
Карбид кремния (SiC)	1000	227	0,17 SiC	Образец рассыпался
Оксид алюминия	1000	150	0,0002 Al	Коррозии не обнаружено
Оксид алюминия марки «Морганит»*	1345	2,5	0,09 Al	Слегка корродирует

Материал	Температура висмута, °C	Продолжительность опыта, час.	Содержание в висмуте после опыта, %	Результаты испытаний
Оксид магния	1000 ✓	227	0,01 Mg	Коррозии очень мала
Оксид циркония	1000	167	0,003 Zr	Коррозии не обнаружено
Дисилицид молибдена	1400	168	—	
	1000	337	0,002 Mo	
Оксид тория (ThO ₂)	1000	167	0,06 Th	Слегка корродирует
Карбид тантала	1000	167	0,001 TaC	Коррозии не обнаружено
Стекло «Викор»* (трубки для образцов)	1000	167	0,002 Si	

Эвтектический сплав висмута и свинца (56,5% Bi; 43,5% Pb). Малоуглеродистая сталь обнаруживает хорошую стойкость в сплаве Bi—Pb до 500° C, если исключена возможность окисления сплава. За счет перевода карбидов стали в сфероидальное состояние можно повысить указанный температурный предел до 700° C, т. е. примерно до точки аустенитного превращения. Некоторые исследователи полагают, что свинец и сплав висмут—свинец воздействуют только на цементитную составляющую стали, не изменяя ее ферритной составляющей, причем для практического использования ими рекомендуется одна из промышленных марок стали с максимальным содержанием углерода 0,12%.

Подобно свинцу и висмуту, сплав Pb—Bi оказывает более сильное агрессивное воздействие на нержавеющие стали аустенитного класса, содержащие никель, чем на хромистые нержавеющие стали.

Скорость коррозии нержавеющей стали типа 410 в эвтектическом сплаве висмута и свинца (как и в висмуте) понижается в присутствии титана. Установлено, что добавка титана в первую очередь понижает скорость растворения хрома в жидком металле, уменьшая одновременно скорость растворения железа.

Чугун во время длительной работы в среде сплава Pb—Bi подвержен растрескиванию и поэтому не может быть рекомендован для практического использования.

Поверхность вольфрамовых электродов, применяемых при измерении расхода жидких металлов магнитными расходомерами, (см. гл. VI), постепенно тускнеет в среде эвтектического сплава Pb—Bi. Это явление связано с окислением вольфрама кислородом, содержащимся в сплаве.

Олово. Коррозионное воздействие олова на конструкционные материалы определяется в основном интенсивностью межгранулярного проникновения жидкого металла в поверхностный слой материала. Межгранулярное проникновение оказывает сильное влияние на свойства металлов, в частности на их пластичность. Если материал подвержен действию внутренних напряжений, его стойкость по отношению к жидкому олову сильно понижается.

Олово активно взаимодействует с железом при температурах выше точки аустенитного превращения.

Чугун и углеродистые стали обладают ограниченной коррозионной стойкостью в олове при температурах до 500° С; аустенитные и ферритные нержавеющие стали не рекомендуются использовать при температурах, превышающих 400° С.

Бериллий и титан не подвержены агрессивному воздействию со стороны олова вплоть до 500° С; стойкость циркония в этих пределах температур является ограниченной.

В качестве конструкционных материалов для работы в среде олова могут быть использованы W, Mo, Ta, Nb, Cr и V.

Следующие элементы не могут быть рекомендованы для применения в силу их большой растворимости в жидком олове: Al, Ag, Au, Cd, Co, Cu, In, Mg, Ni, Pb, Pt, Se, Sb, Zn.

Сплавы висмута, свинца и олова. Растворимость обычного алюминия в эвтектическом сплаве Bi—Pb—Sn при разности электрических потенциалов стенки и жидкости 45 в составляет ~3%, в то время как алюминий с анодированной поверхностью в тех же условиях растворяется в количестве только 0,15%. Если разность потенциалов отсутствует, то при той же температуре растворимость анодированного алюминия равна 0,94%.

Сплав, содержащий 92% Pb и 8% Sn, оказывается более агрессивным по отношению к армко-железу, углеродистой и хромистой стали по сравнению с чистым свинцом.

Стойкость жаропрочных материалов в олове при высоких температурах. Испытания некоторых жаропрочных материалов в среде олова в области больших температур (800—1500° С) были проведены Ридом [143]. Результаты его опытов даны в табл. 35.

30. Перенос активности в жидкометаллических системах

В результате облучения в ядерном реакторе циркулирующий в системе жидкий металл становится радиоактивным. При больших уровнях мощности облучения активность натрия сравнима

Таблица 35
Коррозия некоторых жаропрочных материалов в олове
(в статических условиях)

Материал	Температура олова, °С	Продолжительность опыта, час.	Содержание в олове после опыта, %	Результаты испытаний
Молибден (чистой 99,9%)	1000	338	1,69	Сильная коррозия
	1500	2	0,70	Сильная коррозия, в олове кристаллы молибдена
Вольфрам (чистой 99,9%)	1000	40	0,001	Коррозия незначительная
Тантал (чистой 99,9%)	1740	1	0,33	Сильная коррозия
Рений	1500	840	0,006	Коррозии не обнаружено
Кеннаметалл (K138A) TiC = 80%, Co = 15%, WC + TaC = 5%	1000	168	0,003Ti 3,42Co	Заметно вымывание кобальта из сплава
Графит марки AUF	от 800 до 2000	1	—	Коррозии не обнаружено
	1500	840	—	
Дисилид молибдена	1000	168	0,0004Mo 0,01Si	Умеренная коррозия
	1500	168	—	Сильная коррозия
Карбид тантала	1000	168	0,98Ta	Умеренная коррозия
Стекло „Викор“ (трубки для образцов)	1000	168	0,08Si	Слегка корродирует
Карбид хрома	1500	168	—	Коррозии не обнаружено
Трубки из окиси алюминия марки „Морганит“	1740	1	—	

с активностью радия, что затрудняет доступ обслуживающего персонала к системе в случае ее ремонта. Для того чтобы снизить общую активность системы до безопасного уровня путем удаления из нее натрия, необходимо слить или удалить промывкой 99,9999% металла.

Активность металла, остающегося в системе после ее опорожнения, повышается за счет присутствия в нем даже в ничтожном количестве (менее 0,001%) радиоактивных примесей, обладающих длительным периодом полураспада. Количества примесей, не существенные с точки зрения влияния их на коррозионную стойкость материалов и на свойства металла как теплоносителя, могут оказаться недопустимыми из-за опасности, вызываемой радиацией. Часть этих примесей составляют продукты коррозии конструкционных материалов. Коррозия, происходящая даже с ничтожно малой скоростью, часто вызывает распространение значительной активности по всему контуру. Источником активности, помимо самого металла и его примесей, являются продукты деления ядерного горючего, попадающие в контур теплоносителя.

Радиоактивные элементы, содержащиеся в жидкометаллических системах, испускают, как правило, гамма- и бета-лучи, причем основную роль играет гамма-излучение, поскольку бета-лучи полностью задерживаются стенками трубопроводов и баков контура.

Ниже рассматриваются результаты некоторых экспериментальных работ по переносу радиоактивных элементов в натриевых контурах из нержавеющей стали типа 347. Метод определения интенсивности переноса был общим во всех работах. Из нержавеющей стали изготавливается источник радиоактивности известной мощности. Он помещается в натриевый контур из той же самой стали, но неактивной. Скорость уноса стали из источника в микрограммах на квадратный сантиметр его поверхности в месяц определяется измерением накопления активности на стенках контура. Полученная таким образом величина отличается от скорости коррозии материала тем, что не включает в себя растворенные в жидкости компоненты стали. Кроме того, в данном случае перенос может быть определен для стали в целом и для каждого радиоактивного ее компонента в отдельности.

Определение переноса производится либо в замкнутых сосудах (капсулах) небольшого объема, либо в экспериментальных петлях (контурах). Капсула имеет вид полого цилиндра диаметром ~ 25 мм и высотой ~ 50 мм, в котором помещены образцы исследуемого материала и источник активности. Капсула заполняется натрием и помещается в муфельную печь, где выдерживается в течение заданного промежутка времени. Во время выдержки она непрерывно поворачивается таким образом, чтобы жидкий металл омывал поверхность образцов с определенной скоростью. После этого капсулу вскрывают и поверхность образцов исследуется на глубину диффузии радиоактивных элементов.

Если диффузия у поверхности не является предметом изучения, то для нахождения количества перенесенной активности может быть использована сама капсула и помещение внутрь нее образцов не обязательно.

По аналогичному принципу устроена установка (рис. 110), позволяющая изучать влияние содержания кислорода в Na на интенсивность переноса активности. Она состоит из двух параллельных вертикальных труб, соединенных в нижней части горизонтальной трубой. В нижней части одного колена помещается источник радиоактивности, изготовленный из стали типа 347, а в нижней части другого — исследуемый образец из этой стали. Все приспособление укреплено в качающейся раме. Средняя скорость омывания жидкостью источника излучения и образца $\sim 0,15$ м/сек.

Для определения интенсивности переноса материала в целом удобна капсула, циркуляция жидкого металла в которой осуществляется свободной конвекцией или с помощью магнита. Приспособление последнего типа показано на рис. 111. Натрий заливается в капсулу из нержавеющей стали, в которую вставляется также державка для источника радиоактивности, испытываемых образцов стали (до 10 шт.) и черпака для отбора проб. Верхняя часть капсулы соединяется с системой стеклянных трубок, снабженных краниками. Как видно из рисунка, конструкция прибора позволяет производить смену образцов и извлекать из капсулы отобранный на анализ натрий под защитой инертного газа, не сдвигая с места источник активности.

На рис. 112 показана схема установки для изучения переноса радиоактивных элементов в натрии, заключенном в изогнутую в виде кольца трубку. Трубка помещается на круглой плите.

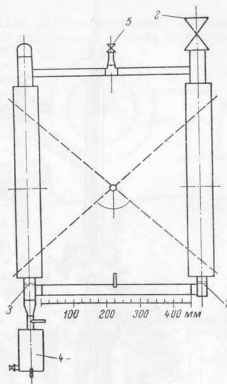


Рис. 110. Установка для изучения влияния содержания кислорода в натрии на скорость переноса активности.

1 — источник активности; 2 — вентиль для натрия; 3 — образец; 4 — холодная ловушка; 5 — подвод инертного газа.

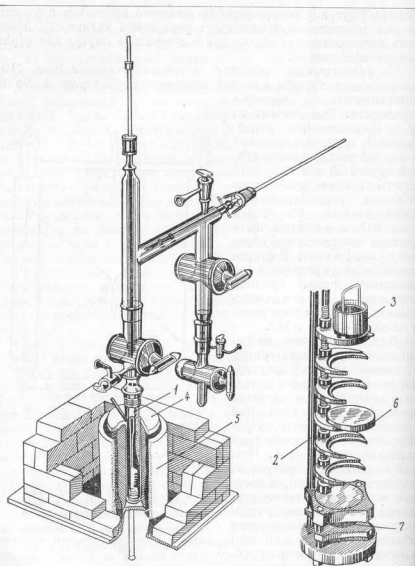


Рис. 111. Капсула для изучения переноса активности натрием в изотермических условиях.

1 — капсула из нержавеющей стали; 2 — державка; 3 — черпак для отбора проб; 4 — печь; 5 — магнитная катушка для перемешивания натрия; 6 — образец; 7 — источник активности.

Специальное кинематическое устройство сообщает ей возвратно-вращательное движение; средняя скорость движения жидкости доходит до 4,5 м/сек.

Для изучения переноса активности также использовались контуры естественной циркуляции, имевшие температуры подъемного и опускного участка соответственно 500—600° С и 100—150° С.

Наиболее ценные результаты дают исследования, проводимые на петлях принудительной циркуляции, а также на петлях, устанавливаемых внутри ядерного реактора. В последнем случае возможно изучение влияния радиации на ход переноса. В настоящее время известна лишь одна опытная установка подобного типа. Она спроектирована таким образом, что полностью помещается в одном из каналов исследовательского реактора. Установка включает в себя обогреваемый за счет тепла реактора¹ участок, электромагнитный насос и теплообменник, в котором облученный натрий передает тепло сплаву натрия — калий, циркулирующему во вторичном (нерadioактивном) контуре. Вся сборка имеет конфигурацию цилиндра длиной ~ 4 м и диаметром 140—170 мм. Общее количество натрия в системе ~ 1800 г; его расход равен ~ 10 л/мин при максимальной и минимальной температурах, равных 480° С (на обогреваемом участке) и 310° С (на выходе из теплообменника). С целью предотвращения активации вторичного контура система оборудована рядом экранов, задерживающих поток нейтронов.

Результаты опытов. В табл. 36 приводятся некоторые опытные данные по переносу активности, полученные с помощью описанных выше установок. Если принять во внимание значительную разницу в условиях проведения экспериментов, к которым эти данные относятся, то следует признать согласие между ними удовлетворительным. Как видно из таблицы, соотношение между скоростями переноса отдельных элементов во всех опытах примерно одинаково.

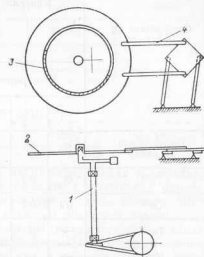


Рис. 112. Установка для изучения переноса радиоактивных элементов в натрии.

1 — вал; 2 — плита; 3 — трубка с натрием; 4 — кулиса.

¹ Этот участок оборудован также электрообогревом.

Таблица 36

Скорость переноса натрием некоторых радиоактивных элементов

(в $\frac{\text{микрограмм}}{\text{см}^2 \cdot \text{месяц}}$)Образец — нержавеющая сталь типа 347, $t \sim 500^\circ \text{C}$

Содержание O_2 в Na, %	Капсулы							
						Контур принудитель- ной циркуляции	U-образная капсула (рис. 110)	Контур естественной циркуляции
						Контур принудитель- ной циркуляции *		
	Изотермические условия					Неизотермические условия		
	—	0,003	0,001	0,006	0,003	—	0,0035	0,003
Время опыта (в днях)	30	79	10	20	7	103	80	28
Fe^{59}	3	0,7	0,4	2	2	—	—	—
Co^{60}	0,4	0,2	0,2	0,2	0,02	0,05	6	3
Ta^{182}	—	5	5	35	1	—	—	—
Mn^{54}	—	—	—	—	5	6	—	—

* Образец изготовлен из нержавеющей стали типа 316.

* Образец изготовлен из нержавеющей стали типа 316.

Величины скоростей переноса активности, полученные в опытах Гага [93] на экспериментальной петле, помещенной внутри ядерного реактора, даны в табл. 37. Под кажущейся скоростью переноса (см. табл. 37) для данного элемента понимается убыль веса стали, соответствующая величине перенесенной активности, определенной для данного изотопа. Кажущиеся скорости для различных изотопов не равны, поскольку интенсивность переноса элемента не пропорциональна его концентрации в стали. Индивидуальные скорости переноса, приведенные в табл. 37, определялись по кажущимся скоростям с учетом содержания данного изотопа в стали.

Как показали опыты, следующие радиоактивные изотопы (все они испускают гамма-лучи) в основном определяют перенос активности: Ta^{182} , Mn^{54} , Co^{60} , Fe^{59} .

С точки зрения влияния на интенсивность переноса большое значение имеет состав материала источника активности, в част-

Таблица 37

Скорости переноса некоторых радиоактивных изотопов, входящих в состав нержавеющей стали

(по данным опытов на экспериментальной петле при содержании кислорода в натрии 0,003%)

Изотоп	Период полураспада	Кажущаяся скорость переноса, $\frac{\text{миллиграмм}}{\text{см}^2 \cdot \text{месяц}}$	Индивидуальная скорость переноса, $\frac{\text{миллиграмм}}{\text{см}^2 \cdot \text{месяц}}$	Скорость переноса по отношению к кобальту —60
Co^{60}	5,3 года	0,0032	$2,7 \cdot 10^{-6}$	1
Mn^{54}	315 дней	0,13	—	—
Ta^{182}	110 дней	0,20	$2,0 \cdot 10^{-4}$	75
Fe^{59}	46 дней	0,012	$8,3 \cdot 10^{-3}$	3100
Cr^{51}	26,5 дня	0,0006	$1,0 \cdot 10^{-4}$	40

ности, содержание в нем примесей. Например, тантал и кобальт, входящие в нержавеющую сталь в качестве посторонних примесей, являются интенсивными гамма-излучателями. Изотоп Mn^{54} образуется из Fe^{54} в соответствии с $(n-p)$ реакцией, происходящей во время облучения стали. Данные радиохимического анализа стального образца, подвергнутого воздействию нейтронного потока плотностью $0,54 \cdot 10^{14}$ нейтронов/см²·сек в течение 25 дней, приведены в табл. 38. В таблице даны лишь основные гамма-излучатели с периодом полураспада более 30 дней.

Оказывается, что термическая обработка стали влияет на интенсивность переноса активности. Например, отожженные образцы стали типа 347 дают более высокую скорость переноса по сравнению с неотожженными. Определенную роль играет чистота поверхности источника активности и неактивного металла, омываемого натрием. Наиболее эффективными методами очистки поверхности нержавеющей стали являются: промывание чистым натрием; травление кислотами; электрополировка; высокотемпературный отжиг в атмосфере водорода.

Опыты, проведенные с ферритными сталями и цирконием, показывают, что для них скорости переноса активности меньше или равны скоростям переноса для аустенитных нержавеющей сталей.

Специально изучалось влияние материала труб экспериментального контура на интенсивность переноса активности. Оказалось, что при одном и том же материале источника (нержавеющая сталь типа 347) интенсивности переноса к поверхности сталей типов 316 и 347 были одинаковыми.

Таблица 38

Данные радиохимического анализа облученного образца нержавеющей стали
типа 347

(нейтронный поток $0,54 \cdot 10^{14}$ $\frac{\text{нейтронов}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$, время облучения — 25 дней)

Радиоактивный изотоп	Период полураспада	Число распадов в минуту на грамм стали	Весовое содержание данного элемента в образце, %
Fe ⁶⁰	46 дней	$1,7 \cdot 10^{10}$	66,4
Co ⁶⁰	5,2 года	$7,3 \cdot 10^9$	0,071
Ta ¹⁸²	117 дней	$2,7 \cdot 10^{10}$	0,088
Mn ⁵⁴	310 дней	$8,7 \cdot 10^7$	—
Sb ¹²³	60 дней	$1,7 \cdot 10^8$	0,004
Ag ¹¹⁰	270 дней	$1,4 \cdot 10^7$	0,0013
Zn ⁶⁵	250 дней	$1,3 \cdot 10^7$	0,0027

Величина активности, переносимой на единицу поверхности контура, оказывается обратно пропорциональной отношению этой поверхности к поверхности источника. Детали системы, расположенные ближе к источнику, оказываются активированными в большей степени.

Содержание кислорода в натрии оказывает сильное влияние на скорость переноса. По данным Гаага [93], скорость переноса изотопов Co⁶⁰, Fe⁶⁰, Ta¹⁸² и Mn⁵⁴ увеличивается соответственно в 54, 17, 5 и 4 раза при изменении содержания кислорода в натрии с 0,0027 до 0,0099%.

Добавка к натрию некоторых веществ (ингибиторов) снижает интенсивность переноса. Действие ингибиторов переноса, по-видимому, основано на понижении концентрации окиси в жидком металле и на образовании защитного слоя на поверхности стали, препятствующего диффузионному обмену между активными и неактивными атомами.

Ингибитор должен быть растворим в жидком металле и должен иметь низкое сечение поглощения нейтронов во избежание паразитного захвата нейтронов в реакторе; продукты его облучения не должны обладать большой активностью и длительным периодом полураспада.

Сравнение эффективности действия различных ингибиторов переноса дается в табл. 39. Как видно из таблицы, вещества,

Таблица 39

Сравнение эффективности различных ингибиторов переноса активности
(количество ингибитора $\sim 1\%$ по весу, образец — сталь типа 347)

Ингибитор	Содержание кислорода в натрии в десятичных долях процента		Свободная энергия образования окиси, $\frac{\text{ккал}}{\text{грамм-атом кислорода}}$	Эффективность ингибитора *
	начальное (до добавки ингибитора)	конечное (после добавки ингибитора)		
Барий	42	27	—115	17
Стронций	30	74	—122	12
Кальций	45	27	—133	6,4
Титан	39	34	—92	6,4
Сурьма	30	43	—40	5,7
Магний	38	19	—127	5,6
Церий	17	66	—96	2,8
Олово	21	44	—49	2,7
Никель	28	78	—43	1,8
Бериллий	23	75	—121	0,7
Цезий	38	58	—82	0,7
Хром	19	26	—71	0,5
Натрий	—	—	—90	—

* Под эффективностью ингибитора понимается отношение скорости переноса активности в чистом натрии (без ингибитора) к скорости переноса в присутствии ингибитора.

характеризующиеся большей свободной энергией образования окислов, т. е. имеющие большее химическое сродство к кислороду (см. гл. II), как правило, являются лучшими ингибиторами. Вещества, для которых свободная энергия образования окиси меньше той же величины для натрия (цезий, хром и т. д.), лишь увеличивают скорость переноса. В данном случае вместо процесса окисления ингибитора происходит процесс разрушения окисной защитной пленки на поверхности стали. Об этом свидетельствует также увеличение содержания кислорода в натрии (см. табл. 39). Четкой зависимости между понижением концентрации окиси в натрии при добавке в него ингибитора и эффективностью последнего не наблюдается. Наилучшим ингибитором переноса является барий. При добавке 1% бария в натрий очень сильно снижается скорость переноса Ta¹⁸² (в 10^4 раз) и в меньшей степени — скорость переноса Mn⁵⁴, Fe⁶⁰, Cr⁵¹ и Co⁶⁰ (Co⁶⁰ — в 7 раз). Для того чтобы было возможным рекомендовать барий для использования в качестве ингибитора в промышленных установках, необходимо найти надежные методы удаления его окиси из систем.

Установлено, что количество переносимых веществ увеличивается экспоненциально с температурой в соответствии с уравнением:

$$\lg A = 10.05 - \frac{5.59 \cdot 10^3}{T}, \quad (69)$$

где A — активность, измеряемая числом единичных распадов в секунду на грамм материала (нержавеющей стали); T — абсолютная температура.

Опыты в условиях свободной конвекции жидкого металла показали, что наличие перепада температур в системе не оказывает заметного влияния на интенсивность переноса активности. Опыты проводились при сравнительно малых концентрациях кислорода, причем материалом источника активности и самой капсулы для металла служила нержавеющая сталь типа 347.

Влияние фактора времени на скорость переноса проявляется не столь отчетливо, как влияние температуры и содержания кислорода. Результаты опытов, проведенных на различных экспериментальных установках, дают разные зависимости количества активности, воспринятой поверхностью стали, от времени. Найдено, что глубина активированного слоя может достигать 2,5 мм после пяти месяцев работы установки при температуре 400—450°С. При проектировании контуров охлаждения жидкометаллических реакторов можно принимать, что величина активности, воспринятой поверхностью контура, пропорциональна времени его работы.

Скорость течения жидкости на интенсивности переноса активности сказывается мало, так же как и воздействие на образец сильного нейтронного потока (до 10^{13} нейтронов/см²·сек).

Результаты опытов позволяют произвести оценку верхнего предела скорости переноса активности в промышленных установках.

Концентрация атомов какого-либо радиоактивного элемента в конструкционном материале¹, находящемся в активной зоне реактора, подчиняется следующему уравнению:

$$\frac{dN^*}{dt} = \sigma - \lambda N^*, \quad (70)$$

где N^* — концентрация активированных атомов в стали, подвергающейся облучению внутри реактора, атом/г;

σ — скорость образования данного радиоактивного элемента вследствие поглощения нейтронов в атомах в секунду на грамм материала;

λ — постоянная радиоактивного распада данного вещества, 1/сек;

t — время работы установки при данной плотности нейтронного потока, сек.

¹ В данном случае рассматривается нержавеющая сталь.

Интегрирование уравнения (70) при условии, что начальная концентрация N^* равна нулю, дает следующее выражение:

$$N^* = \frac{\sigma}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}). \quad (71)$$

Поскольку активность A данного элемента, выраженная числом распадов ядер в секунду на грамм материала, равняется λN^* , имеем:

$$A = \sigma (1 - e^{-\lambda t}). \quad (72)$$

Рассчитаем активность вещества, которое уносится из реактора натрием. Количество активированных атомов N_D^* , унесенных из реактора, подчиняется уравнению:

$$\frac{dN_D^*}{dt} = RN^* - \lambda N_D^*, \quad (73)$$

где R — интенсивность переноса активности (в граммах в секунду), т. е. удельная скорость переноса (в граммах в секунду на единицу поверхности), умноженная на величину площади источника активности.

Величина λN_D^* , входящая в уравнение (73), представляет скорость распада перенесенных атомов. Комбинируя выражения (71) и (73), получим:

$$\frac{dN_D^*}{dt} + \lambda N_D^* = \frac{R}{\lambda} \sigma (1 - e^{-\lambda t}). \quad (74)$$

Интегрирование уравнения (74) при условии равенства нулю перенесенной активности в начальный момент времени дает:

$$N_D^* = \frac{R\sigma}{\lambda^2} (1 - e^{-\lambda t} - \lambda t e^{-\lambda t}). \quad (75)$$

Тогда общая перенесенная активность, выраженная через число распадов ядер в секунду,

$$A_D = \lambda N_D^* = \frac{R}{\lambda} \sigma (1 - e^{-\lambda t} - \lambda t e^{-\lambda t}). \quad (76)$$

В табл. 40 и на рис. 113 приводятся данные приближенного расчета, выполненного по описанной схеме для гипотетического

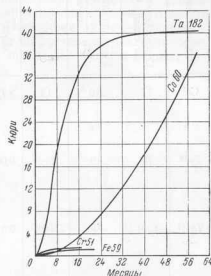


Рис. 113. Перенос активности в гипотетической системе.

Таблица 40

Перенос активности в гипотетической системе

Радиоактивный изотоп	Содержание в переработанной стали, %	Удельная скорость переноса, $\frac{\text{микрограмм}}{\text{см}^2 \text{ мес.}}$	$\frac{R}{\lambda}$, г	$\frac{\text{кюри}}{\text{г}}$	Число γ -квантов на один распад	Время, мес.	$1 - e^{-\lambda t} - \lambda t e^{-\lambda t}$	Переносимая активность A_p , кюри
Cr^{51}	17	10	13	3,72	0,03	1	0,181	0,263
						2	0,455	0,662
						4	0,812	1,18
						6	0,945	1,37
						9	0,992	1,44
						max	1,0	1,45
Fe^{59}	70	10	21,7	0,0556	1	1	0,079	0,095
						2	0,241	0,290
						4	0,552	0,665
						6	0,765	0,922
						12	0,974	1,17
						max	1,0	1,20
Ta^{182}	0,01	200	1068	0,0189	2	1	0,015	0,606
						4	0,132	5,33
						6	0,309	12,5
						12	0,658	26,6
						24	0,939	37,9
						36	0,991	40,0
Co^{60}	0,05	3	274	0,47	2	60	1,0	40,4
						1	0,00006	0,0155
						6	0,00206	0,532
						12	0,0079	2,03
						24	0,029	7,48
						36	0,059	15,2
						60	0,142	36,6

реактора на тепловых нейтронах. Вычислялся перенос радиоактивных Fe, Cr, Ta и Co, т. е. тех элементов, которые осаждаются на поверхности стали, поскольку радиоактивные изотопы Ag, Sb, Sn, Zn, очевидно, остаются растворенными в жидком натрии. При расчете использовались значения скоростей переноса, полученные в опытах с жидкометаллической петлей, помещенной внутри реактора. Поток нейтронов принят равным 10^{14} нейтронов/см² сек; площадь поверхности реактора, воспринимающая этот поток — 10^6 см². Расчеты производились только для гамма-излучения, так как бета-лучи задерживаются стенками труб.

Уровень излучений, вызываемых осаждением активных веществ в контуре, может быть рассчитан для системы с данным

расположением оборудования в предположении равномерного распределения активности по внутренней поверхности контура. Расчеты показывают, что после шести месяцев непрерывной работы гипотетического реактора часть контура, расположенная вне зоны воздействия нейтронного потока, становится настолько зараженной активностью, что доступ персонала к ней должен быть ограничен сорока часами в неделю. После 36 месяцев работы время доступа сокращается до нескольких часов. Эти данные получены в предположении о том, что темп накопления активности в системе постоянен во времени. Поскольку на самом деле скорость переноса постепенно убывает со временем, реальная опасность радиоактивного поражения персонала будет меньшей.

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ГЛАВА V

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ

31. Общие принципы компоновки оборудования

Отдельные узлы оборудования жидкометаллического контура не следует располагать очень близко один к другому, так как доступ к любой точке системы должен быть совершенно свободным.

Компоновка оборудования жидкометаллических установок должна предусматривать возможность осуществления естественной циркуляции металла в системе, например, при аварийной остановке циркуляционного насоса. Для этого источник подвода тепла к системе необходимо поместить в нижней части контура, а устройство для сброса тепла — в верхней.

Расположение трубопроводов. Все трубопроводы контура должны быть расположены под углом к горизонту с тем, чтобы обеспечить легкость заполнения и промывки системы, а также слива жидкого металла из установки. При горизонтальном расположении трубопроводов заполнение системы металлом за счет выдавливания его из загрузочного бака давлением инертного газа сопровождается образованием газовых карманов. В этом случае приходится выпускать газ из каждого кармана в отдельности. Заполнение контура под вакуумом позволяет избежать появления газовых мешков, но требует большего времени и неудобно при часто повторяющихся операциях заполнения. В горизонтальных трубопроводах при сливе может оставаться часть жидкости, что приводит к образованию пробок из застывшего металла или его окислов. Такие пробки затрудняют промывку контура и его дальнейшую эксплуатацию.

Электромагнитные насосы для жидких металлов следует также устанавливать под углом к горизонту, причем их нагревательная сторона должна быть расположена выше всасывающей. Пузырьки газа, попавшие в поток, могут задержаться в полости

насоса, так как газообразные вещества не подвергаются воздействию магнитного поля и не могут поэтому перекачиваться электромагнитным насосом. Попадание газа в насос приводит к неустойчивой его работе и снижению производительности. Это нежелательное явление, особенно опасное при низких скоростях движения металла, когда пузырьки газа не могут быть увлечены потоком жидкости, совершенно исключается при указанном выше расположении насоса (пузырьки устремляются вверх под напором жидкости и под действием собственной подъемной силы).

Для обеспечения полного слива металла из контура обычно достаточен угол наклона трубопроводов около 3°. Части проектируемой установки, слив из которых затруднен, должны быть оборудованы специальными подогреваемыми дренажными линиями.

Размещение дыхательного (расширительного) бака в контуре. Дыхательный бак является неотъемлемой принадлежностью любого жидкометаллического контура, так как объем металлов увеличивается при нагревании довольно сильно. Например, при повышении температуры сплава натрия—калия (44% K) от 40 до 650° C его объем возрастает на 20%.

Наиболее целесообразным является размещение дыхательного бака в верхней части контура, куда одновременно можно подвести трубопровод, питающий установку инертным газом. В дыхательном баке будут улавливаться пузырьки газа, попавшие в жидкость, и в то же время нарушение плотности газовых магистралей не вызовет течи расплавленного металла.

Дыхательный бак рекомендуется располагать на всасывающей стороне насоса, перекачивающего жидкий металл, т. е. в том месте, где давление внутри контура минимально. В этом случае в баке можно поддерживать небольшое давление инертного газа, в связи с чем стенки его могут быть сравнительно тонкими. Кроме того, такое расположение дыхательного бака позволяет бороться с кавитацией на всасывании насоса путем повышения давления инертного газа в баке.

Размещение сливного (загрузочного) бака. В зависимости от принятой схемы расположения оборудования осуществление слива жидкого металла из системы имеет свои особенности. Если контур включает в себя загрузочный (сливной) и расширительный баки (рис. 114), то металл может быть слит в загрузочный бак под действием силы тяжести, причем для ускорения опорожнения системы можно увеличить подачу инертного газа в дыхательный бак и одновременно выпустить часть газа из сливного бака. На магистрали, соединяющей контур с загрузочным баком, должен быть установлен сливной вентиль.

Если загрузочный бак используется одновременно как дыхательный (рис. 115), то сливной вентиль в системе отсутствует и процесс слива осуществляется только за счет сброса давления в загрузочном баке и подпитки контура в верхней его точке инертным газом.

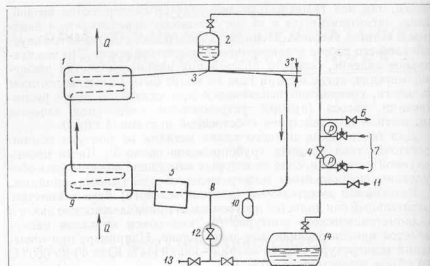


Рис. 114. Схема размещения оборудования жидкометаллического контура (I вариант).

1 — теплообменник для отвода тепла; 2 — дыхательный бак; 3 — верхняя точка контура; 4 — вентиль для выравнивания давления в системе инертного газа; 5 — насос; 6 и 11 — вентили для продувки системы инертным газом и вакуумирования; 7 — подвод инертного газа; 8 — нижняя точка контура; 9 — теплообменник для подвода тепла; 10 — холодная ловушка; 12 — сливной вентиль; 13 — вентиль для продувки системы; 14 — сливной (загрузочный) бак.

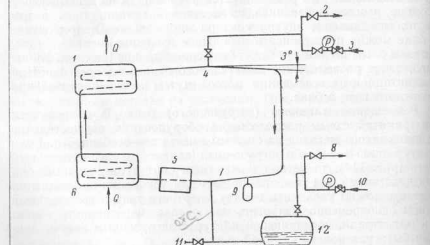


Рис. 115. Схема размещения оборудования жидкометаллического контура (II вариант).

1 — теплообменник для отвода тепла; 2 и 8 — вентили для продувки системы инертным газом и вакуумирования; 3 и 10 — подвод инертного газа; 4 — верхняя точка контура; 5 — насос; 6 — теплообменник для подвода тепла; 7 — нижняя точка контура; 9 — холодная ловушка; 11 — вентиль для продувки системы; 12 — сливной (загрузочный) бак.

Вторая схема расположения баков (рис. 115) менее желательна, так как, во-первых, отсутствие сливного вентиля требует постоянного контроля за давлением газа в дыхательном баке ввиду того, что уровень жидкого металла в контуре должен быть постоянным и, во-вторых, трубопровод, подводящий инертный газ к верхней точке контура и имеющий обычно небольшой диаметр (5—10 мм), в процессе эксплуатации может оказаться забитым застывшим металлом или его окислами, что вызовет затруднения при сливе.

Объем загрузочного бака должен в 1,5—2 раза превышать объем требующегося для заполнения системы металла (в твердом виде). Такой запас вместимости бака необходимо предусмотреть по следующим соображениям: 1) объем металла может возрасти вследствие нагревания его в баке или попадания горячего металла в бак при сливе; 2) может возникнуть необходимость пополнения запаса жидкого металла в процессе эксплуатации; 3) часть объема бака должен занимать инертный газ.

Самостоятельные дренажные линии отдельных участков контура следует присоединять к сливному баку. Для обеспечения надежности сливной (загрузочной) линии на ней рекомендуется устанавливать два вентиля последовательно. Между вентилями удобно расположить подвод какой-либо жидкости, необходимой для промывки контура, как это показано на рис. 115. Использование вместо сливных вентилях участков дренажной линии с замороженным в них металлом нецелесообразно, так как это связано с необходимостью иметь специальные средства для охлаждения и обогрева трубопровода, а также с нежелательными задержками при заполнении и опорожнении системы.

Необходимая для достаточно быстрого слива величина диаметра дренажного трубопровода зависит от конкретных особенностей системы: ее емкости, расположения оборудования и т. д. Практикой установлено, что применение сливных труб диаметром 50 мм при диаметре трубопроводов контура 200 мм и сливных труб диаметром 25 мм при диаметре трубопроводов 75 мм не вызывает особых осложнений при сливе. Применение для дренажных линий трубопроводов диаметром 10—12 мм и менее не рекомендуется даже для небольших по емкости жидкометаллических контуров.

Расположение отводов на контрольно-измерительные приборы. Жидкие металлы или их пары, попадающие в отводы от контура на какие-либо приборы, могут охлаждаться там, в результате чего отводящие трубки оказываются закупоренными застывшим металлом и его окислами. Поэтому отводы желательно проектировать обогреваемыми жидкостью, циркулирующей в основном трубопроводе. В зависимости от расположения отводящей линии относительно основного трубопровода интенсивность естественной конвекции жидкого металла в отводе будет, очевидно, изменяться. Наиболее целесообразным является размещение отвода сверху от основной магистрали, когда перенос тепла за счет

естественной конвекции наиболее интенсивен. Расположение отвода снизу нецелесообразно из-за слабой интенсивности его обогрева и из-за того, что металл будет оставаться в отводе после опорожнения контура.

Величина диаметра отводящего трубопровода во избежание его закупорки должна быть равной не менее 5—6 мм.

Расположение холодных ловушек на натриевых и натрий-кальциевых контурах. Холодные ловушки для окислов натрия и калия устанавливаются на наиболее холодных участках контура, что позволяет достигнуть достаточно низкой температуры жидкого металла в ловушке при минимальном отводе тепла от нее. Холодные ловушки, выполненные в виде охлаждаемых отстойников (см. гл. VII), как правило, присоединяются к горизонтальному участку главной магистрали и устанавливаются снизу от магистрали (рис. 114—115). Такая ловушка должна быть снабжена дренажной линией с вентилем для удаления скопившихся окислов.

Холодные ловушки, выполненные в виде охлаждаемых фильтров (см. гл. VII), устанавливаются параллельно основному трубопроводу контура.

32. Поведение конструкционных материалов в жидкометаллических контурах

Физические и химические свойства жидких металлов сильно отличаются от свойств жидкостей, применяемых в энергетике (вода, пар), в связи с чем правильный выбор материалов при проектировании невозможен без внимательного рассмотрения этих свойств. Например, высокая теплопроводность металлических жидкостей приводит к возможности возникновения резких местных колебаний температуры (тепловых ударов), способствующих появлению дополнительных термических напряжений в металле стенки. Поэтому ответственные детали оборудования должны рассчитываться не только на прочность разрыву и ползучести, но и на сопротивляемость тепловым ударам. В качестве примера может также служить специфический вопрос о коррозии различных конструкционных материалов в среде жидкого металла (см. гл. IV).

При передаче тепла через стенки труб, коллекторов и т. п. в жидкометаллических теплообменниках значительная доля общего температурного перепада приходится на перепад в стенке, так как вследствие высокого коэффициента теплоотдачи перепад температур на границе жидкость—стенка незначителен. В то же время термические напряжения, возникающие в металле стенок, пропорциональны разности температур в ней. Поэтому при проектировании жидкометаллических теплообменников должно быть обращено особое внимание на возможность возникновения термических напряжений.

Расчет термических напряжений необходимо производить как для стационарных тепловых условий работы установок, так и для нестационарных режимов, когда напряжения могут быть максимальными. Известны результаты расчетов по определению напряжений в корпусе реактора, охлаждаемого расплавленным натрием. При резком повышении температуры натрия от 370 до 425° С, как это может быть при быстром увеличении мощности установки, термические напряжения в корпусе, изготовленном из хромоникелевой нержавеющей стали, могут достигнуть 2700 кг/см².

Большинство исследований усталости металлов, устанавливающих связь между степенью деформации образца и числом

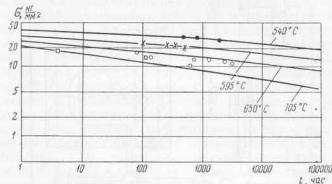


Рис. 116. Сравнение длительной прочности нержавеющей стали типа 347 в среде расплавленного натрия и в воздушной среде.

Испытания в натрии: ● — 540° С; × — 595° С; ○ — 650° С; □ — 705° С.
— данные испытаний на воздухе при тех же температурах.

циклов приложения нагрузки, необходимым для его разрушения, проводилась на воздухе. Относительно усталостной прочности сталей в жидкометаллической среде известно следующее.

Испытания на изгиб, проведенные на образцах из нержавеющей аустенитной стали типа 347, помещенных в расплавленный натрий при температуре 725° С, показали, что усталостная прочность материала при замене воздушной среды средой жидкого металла не снижается. Испытания той же стали на разрыв при длительном приложении нагрузки в воздушной и натриевой средах привели к аналогичным результатам (рис. 116).

Изучение влияния резких колебаний температуры на работоспособность стали в эксплуатационных условиях проводилось на экспериментальном контуре, состоящем из трубопровода, внутри которого при помощи сварки укреплялись образцы из нержавеющей стали типа 347 (рис. 117). Трубчатый образец диаметром 200 мм и длиной 900 мм мог быть предварительно нагрет до желаемой температуры. Тепловой удар в образце вызывался прокачиванием через него относительно холодного сплава натрия — калия.

Максимальная температура образца составляла 480°C , максимальная скорость охлаждения — 130°C/сек . при общем падении температуры 270°C . Металлографическим анализом было обнаружено, что термические напряжения, возникающие в этих условиях, вызывают появление межкристаллических трещин в металле, аналогичных усталостным трещинам. Трещины возникают в точках концентрации напряжений и распространяются вдоль посторонних включений в металле. Результаты испытаний

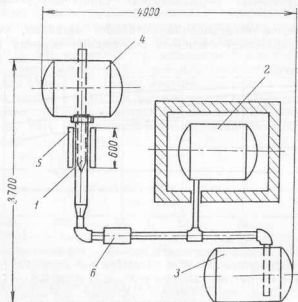


Рис. 117. Схема экспериментального жидкометаллического контура, предназначенного для проведения испытаний трубчатых образцов на тепловой удар.

1 — образец; 2 — бак для разогрева сплава; 3 — сливной бак; 4 — верхний бак; 5 — нагреватель; 6 — насос.

стали на термическую усталость показывают, что разрушение образцов было вызвано следующими причинами:

- 1) дефект сварного шва при сварке в стык;
- 2) некачественная механическая обработка поверхности металла;
- 3) внутренний дефект стенки трубы.

В первом случае были сварены в стык с подкладным кольцом два обрезка трубы, причем кольцо было пригнано к поверхности трубы недостаточно плотно, так что при сварке часть металла затекла в образовавшийся клиновидный зазор. При усадке сварного шва в этом месте образовалась щель, которая послужила причиной появления усталостной трещины.

Во втором случае причиной разрушения послужила разделка стенки трубы под сварку, выполненная недостаточно острым инструментом. Наклеп материала поверхности, возникший при обработке, способствовал снижению его усталостной прочности.

Третий случай относится к растрескиванию трубы в месте развальцовки ее в отверстие трубной доски; трещина была вызвана дефектом материала трубы.

При расчете конструкций на длительную прочность следует учитывать, что вредное влияние концентраций внутренних напряжений на сопротивление металла ползучести усиливается с ростом температуры. Концентрация внутренних напряжений снижает также коррозионную стойкость металла, что, в свою очередь, способствует снижению его прочности. Например, известен случай появления многочисленных трещин в месте сварки стальных труб в трубные доски теплообменника натрий—вода, причем трещины возникли первоначально на водяной стороне в результате коррозии. Водоподогреватель, изготовленный из жаропрочной стали типа 304, вышел из строя после двух резких подъемов температуры натрия до 425°C , проработав всего 48 часов. Оказалось, что вода, поступающая в подогреватель, имела повышенное содержание хлоридов, взаимодействующих с аустенитной сталью.

Как показали результаты испытания на прочность модели обогреваемого натрием трубчатого испарителя воды с изогнутыми трубками (рис. 172), разрушение металла (появление трещин) обнаруживается в месте сварки труб в массивную трубную доску, т. е. в области действия наибольшего изгибающего момента. Подобная модель с более легкими трубными досками в тех же самых условиях испытания не разрушалась.

Поведение сварных, паяных и разъемных соединений в натрии. Опыт эксплуатации натриевых контуров показывает, что сварные швы обладают той же коррозионной стойкостью, что и основной металл (обычно нержавеющей сталь аустенитного или ферритного класса). Образование шлаковых включений в сварном шве недопустимо, так как они вымываются жидким металлом.

При использовании паяных соединений следует иметь в виду, что некоторые припои, например серебряный, не обладают достаточной коррозионной стойкостью в жидком натрии. В качестве припоя можно рекомендовать сплав, содержащий 60% марганца и 40% никеля, а также хромоникелевокремниевые сплавы.

На основании лабораторных исследований (см. гл. IV) можно было бы сделать вывод о нецелесообразности изготовления жидкометаллических контуров из разнородных материалов, поскольку был обнаружен перенос некоторых химических элементов от одного материала к другому. Однако в эксплуатационных условиях перенос может не наблюдаться. Например, участки одного из натриевых контуров, проработавшего в Ноллсдей лаборатории атомной энергии (США) в течение ряда лет, были изготовлены из нескольких различных материалов (аустенитная нержавеющая

сталь, никель, сплав инконель и ферритная сталь), но никакого взаимодействия между ними не было обнаружено.

При близком соприкосновении каких-либо двух металлических поверхностей, находящихся в жидком натрии (например, поверхностей болта и гайки, или клапана вентиля и его седла), обнаруживаются два нежелательных явления. Первое — истирание поверхностей, второе — их самосваривание. Истирания можно избежать путем целесообразного выбора конструкции сопрягающихся деталей, например, применением в необходимых случаях конической резьбы вместо обычной. Кроме того, можно использовать специальную обработку поверхности (азотирувание или хромирование). Азотирувание, произведенное на глубину от 0,025 до 0,075 мм, эффективно предупреждает истирание. Применение смазывающих веществ для уменьшения истирания, аналогичные минеральных масел, дисульфита молибдена и графита, не рекомендуется, так как эти вещества не могут удерживаться на трущихся поверхностях, и, кроме того, взаимодействуют с расплавленным натрием.

Самосваривания деталей, происходящего в результате их длительного контакта под давлением и при высокой температуре, легче всего избежать, применяя для соприкасающихся поверхностей разнородные материалы. Специальная обработка поверхности, например азотирувание, также противодействует самосвариванию.

Проверка качества конструкционных материалов. К качеству материалов, применяемых для изготовления оборудования жидкометаллических контуров, предъявляются высокие требования. Материал стенок труб, коллекторов, баков и т. п. должен быть свободным от пустот, раковин и неметаллических (шлаковых) включений, так как малейшее просачивание воздуха внутрь системы или утечка жидкого металла, в ряде случаев радиоактивного, недопустимы.

Для обнаружения пустот и раковин внутри металла часто используется метод ультразвуковой дефектоскопии, который не всегда абсолютно надежен. Мелкие раковины в материале могут быть найдены путем использования цветодефектоскопии. Этот метод пригоден для обнаружения и неметаллических шлаковых включений.

Такие включения крайне опасны, так как они остаются незамеченными при испытании собранных жидкометаллических контуров на плотность, даже в случае применения гелиевого течеискателя с весьма чувствительным масспектрометром, позволяющим определить малейшую утечку гелия из контура. В условиях эксплуатации шлаковые включения начинают взаимодействовать с расплавленным металлом, постепенно вымываются им и могут послужить причиной опаснойечи.

Особенно жесткие требования при испытании следует предъявлять к материалу труб теплообменников.

33. Проектирование трубопроводов

Учет термических напряжений. Условия работы трубопроводов жидкометаллических контуров отличаются от условий работы обычных трубопроводов более высокими рабочими температурами и большей возможностью появления термической усталости материала стенок.

Вызываемое термическим расширением напряжение σ_a в стенке трубопровода, работающего при высокой температуре, не должно превышать следующей величины:

$$\sigma_a = K(1,25\sigma_0 + 0,25\sigma_t), \quad (77)$$

где σ_0 — допускаемое напряжение растяжения для данного металла при комнатной температуре;

σ_t — то же при рабочей температуре;

K — коэффициент запаса, учитывающий снижение прочности материала под воздействием циклических изменений температуры.

Как видно из выражения (77), величина σ_a определяется в основном допускаемым напряжением для холодного металла, отходясь от него максимально на 16,7%. Это объясняется тем, что с повышением температуры модуль упругости материала, а вместе с ним эластичность стенки трубопровода повышается, несмотря на снижение его прочности.

Формула (77) дает минимальное значение действующего напряжения, которое должно быть повышено, если на стенку трубопровода действуют какие-либо дополнительные нагрузки (внутреннее давление, собственный вес). В этом случае величину дополнительного напряжения следует прибавить ко второму члену в скобке выражения (77). Это приращение, как правило, не превышает величины $0,25\sigma_t$. Действительно, напряжения, обусловленные внутренним давлением, обычно пренебрежимо малы из-за низкого давления в жидкометаллических контурах и относительно большой толщины стенок труб. В то же время опоры трубопроводов проектируются таким образом, чтобы напряжения в металле, вызываемые собственным весом конструкции, были около $0,25\sigma_t$. Поэтому суммарная величина второго члена в скобках формулы (77) равна примерно $0,5\sigma_t$. Эта величина составляет заметную долю общего напряжения σ_a в области низких и средних температур, но при температуре более 600°C она уже не существенна, так как при $t > 600^\circ\text{C}$ напряжение σ_t резко падает.

Значение коэффициента K в формуле (77) выбирается в соответствии с числом термических циклов работы установки, обусловленных условиями эксплуатации. Если установка подвержена действию менее чем 7000 циклов, то в большинстве случаев и имеет место, то коэффициент K можно принимать равным единице; если же число циклов превышает 7000, то K снижается, достигая величины 0,5 при числе циклов, равном 250 000 и более.

Следует отметить, что трубопроводы более стойки по отношению к термическим ударам, чем другие узлы жидкометаллических установок. Во-первых, они обладают большой эластичностью и могут переносить без разрушения значительные пластические деформации. Во-вторых, трубопроводы тщательно теплоизолируются извне, в связи с чем их температура близка к температуре жидкого металла и перепад температур в стенке трубы невелик. Поскольку внутренние термические напряжения в стенке пропорциональны данному перепаду, они также не могут быть большими. Эти соображения подтверждаются на опыте. При многократных испытаниях на термический удар (количество циклов доходило до нескольких тысяч) трубопровода с текущим по нему расплавленным натрием никаких следов разрушения стенки не было обнаружено, несмотря на то, что скорость изменения температуры достигала 500 град/сек.

При проектировании трубопроводов расчет их на ползучесть необязателен, так как небольшая деформация трубопровода вследствие ползучести неопасна. Более того, такая деформация снимает внутренние напряжения в металле, возникающие при высоких температурах. Ползучесть опасна лишь в том случае, когда зона деформации не распределяется равномерно по длине трубы, а занимает ограниченный ее участок. Местная деформация может постепенно увеличиваться и привести к разрушению.

Мерой борьбы с появлением термических напряжений в трубопроводе является предварительное его растяжение, когда заготовка трубы делается несколько короче, чем нужно, и затем искусственно растягивается в холодном состоянии при сборке. Вызванные таким образом внутренние напряжения в металле при повышении температуры уменьшаются, поэтому его работоспособность при высокой температуре остается такою же, как и при низкой.

При проектировании трубопроводов вопросу о компенсации тепловых расширений должно быть уделено большое внимание, так как рабочие температуры и коэффициенты теплового расширения материала трубопровода в данном случае велики. Действительно, аустенитные нержавеющие стали типов 304, 316, 321, 347, 310 обладают коэффициентом линейного расширения примерно на 40% большим, чем углеродистые стали (рис. 118), имея в то же время довольно низкую теплопроводность (рис. 119).

Удовлетворительной компенсации тепловых расширений можно добиться за счет включения в контур изогнутых участков труб, обладающих нужной эластичностью. При использовании гофрированных труб или сильфонов следует располагать их строго вертикально для того, чтобы обеспечить надежный слив жидкого металла. Однако по возможности нужно избегать установки компенсирующих устройств, поскольку они уменьшают прочность и надежность конструкции.

При монтаже установок следует учитывать, что относительное перемещение трубопроводов для жидких металлов при разогреве

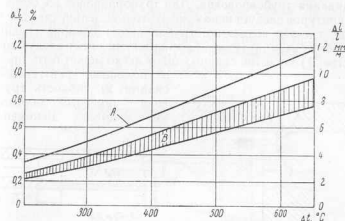


Рис. 118. Относительное линейное расширение некоторых сталей.

A — аустенитные стали; B — ферритные стали. Δt — разность между рабочей и комнатной температурами.

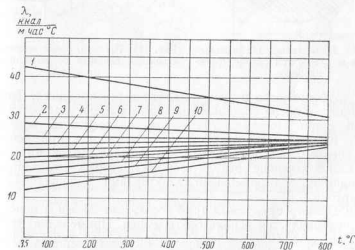


Рис. 119. Коэффициент теплопроводности некоторых сталей.

1 — углеродистая 0,2% C; 2 — 1% Cr; 0,5% Mo; 3 — 2% Cr; 0,5% Mo; 4 — 5% Cr; 0,5% Mo; 5 — 2,5% Cr; 0,5% Mo; 0,75% Si; 6 — 3% Cr; 0,5% Mo; 1,25% Si; 7 — 5% Cr; 0,5% Mo; 1,5% Si; 8 — 27% Cr; 9 — 18% Cr; 8% Ni; 10 — 25% Cr; 20% Ni.

Соединения трубопроводов. Для трубопроводов жидкометаллических контуров следует использовать только цельнотянутые трубы.

Везде, где это возможно, трубопроводы должны соединяться между собой сваркой в стык. Сварка в стык имеет следующие преимущества: 1) качество сварных швов легко может быть проверено

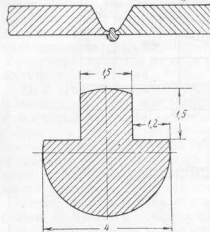
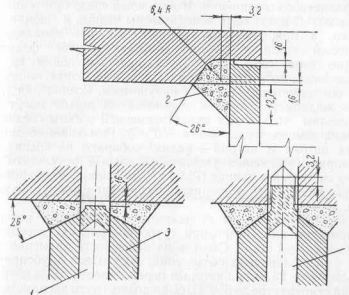


Рис. 121. Рекомендуемые конструкции стыковых сварных соединений трубопроводов.

Если диаметр стыкуемых труб составляет 25 мм и менее, при сварке рекомендуется использовать муфты. Применение подкладных колец в этом случае нецелесообразно, так как сечение для прохода жидкости чрезмерно суживается.

220

При производстве сварочных работ в Ноллзской лаборатории атомной энергии (США) следующие требования к качеству сварных швов являются обязательными:



1 — высверливается после сварки; 2 — угловой шов; 3 — ниппель.

2. Угловые сварные соединения деталей нежелательны и допускаются только тогда, когда толщина деталей в месте сварки одинакова.

Фланцевые соединения в условиях резко меняющихся температур не отличаются высокой надежностью и их применение

в жидкометаллических контурах должно быть ограничено теми случаями, когда другие виды соединений использовать невозможно, например, при сопряжении деталей из разнородных материалов или необходимости частой смены оборудования контура.

При конструировании фланцевых соединений для болтов следует применять материал, имеющий меньший коэффициент термического расширения, чем материал самого фланца.

Выбор материала для прокладок определяется условиями работы фланцевого соединения. В натриевой среде при температурах менее 200° С могут быть использованы медные и алюминиевые прокладки, а при температурах более 200° С — прокладка из нержавеющей стали и никеля. Беспровладочное фланцевое соединение типа «шар по конусу» является одним из наиболее надежных, хотя при частой сборке и разборке такого соединения его герметичность может нарушиться. Соединения трубопроводов жидкометаллических установок на резьбе могут быть рекомендованы только для кратковременной работы соединения при низких температурах (менее 250° С). Резьбовые соединения труб для натрия и натрия — калия¹ собирают на специальной смазке, причем наиболее удовлетворительные результаты дает смазка из смеси окиси свинца (PbO) и глицирина. Следует помнить, что смазка может быть источником загрязнения циркулирующего металла.

Соединительные муфты с тщательно притертыми поверхностями пригодны для соединения трубопроводов из углеродистой и из нержавеющей стали. Степень их надежности примерно такая же, как и для фланцевых соединений. Муфты для трубопроводов диаметром менее 25 мм, по которым перекачивался сплав натрия — калий при температуре до 550° С, были подвергнуты эксплуатационной проверке и показали удовлетворительную работоспособность.

При работе со сплавом натрия-калий, имеющим температуру ниже 120° С, могут использоваться медные трубопроводы с бронзовыми фитингами. Однако следует остерегаться резких колебаний температуры жидкого металла (термических ударов). Дело в том, что бронза сильно наклепывается во время сборки соединений трубопроводов. Поэтому к внутренним напряжениям в стенке соединительной муфты, вызванным температурными колебаниями, добавляются напряжения, связанные с наклепом, и муфта может дать трещины.

Фитинги из нержавеющей стали сохраняют свою работоспособность при повышенных температурах (вплоть до 750° С).

34. Тепловая изоляция

К качеству тепловой изоляции жидкометаллических контуров предъявляются следующие специфические требования: материал изоляции не должен химически взаимодействовать с жидким

¹ Для труб диаметром более 25 мм применять такие соединения не рекомендуется.

металлом; изоляция должна быть по возможности непроницаемой для жидкого металла; механические и тепловые свойства изоляции не должны изменяться под воздействием радиации.

Перечислим наиболее распространенные теплоизоляционные материалы:

1. Огнестойкий минеральный войлок высокой плотности.
2. Прессованная минеральная шерсть или стеклянное волокно.
3. Минеральная шерсть или стеклянное волокно в рыхлом виде (плотностью не более 100 кг/м³).
4. Асбест с малым содержанием кристаллизационной воды в виде пряжи или в уплотненном виде (амозит).
5. Специальный плавный аэрогель.
6. Магнезия (85%).
7. Плавный диатомит.
8. Плавные силикаты кальция.
9. Стружка из нержавеющей стали.
10. Свинцовый шлак.
11. Металлическая фольга с набивкой из любого указанного выше материала.

Сведения о некоторых свойствах теплоизоляционных материалов даны в табл. 41.

Свойства теплоизоляционных материалов

Таблица 41

Теплоизоляционные материалы	Плотность ρ , кг/м ³	Максимальная рабочая температура t , °С	Линейная усадка после 24 часов работы при максимальной рабочей температуре, %	Разрушающее усилие $\sigma_{\text{ср}}$, кг/см ²	Усилие, необходимое для сжатия материала на 5%		
					Исходный материал, кг/см ²	После 24 часов работы при максимальной рабочей температуре, кг/см ²	Количество абсорбированной влаги, % по объему
Плавный аэрогель	290	760	0,5	2,8	8,4	9,8	1,4
Диатомит	385	1050	3,0	4,9	6,0	7,0	1,0
Силикаты кальция	175	650	1,5	4,2	9,1	9,1	1,0
Окись магния (85%)	190	310	0,5	2,8	3,15	2,5	0,7
Плавный амозит	270	400	0,5	3,9	0,56	0,28	0,9
Прессованная минеральная шерсть	305	650	0,5	2,8	0,77	0,70	—

Для изоляции трубопроводов и теплообменников на сплаве Na—K, входящих в систему строящегося в Даури (Англия) реактора на быстрых нейтронах, используется «Роксил», представляющий длиноволокнистую минеральную шерсть белого цвета [136]. Этот материал обладает очень большой пористостью и содержит до 95% воздуха по объему, обладая к тому же хорошими жароупорными свойствами и достаточной химической инертностью вплоть до 750° С.

Взаимодействие теплоизоляционных материалов со щелочными металлами. Натрий и сплав Na—K довольно активно взаимодействуют с минеральными веществами, содержащими химически связанную воду. Это, однако, не исключает применения указанных веществ для изоляции экспериментальных установок небольшого масштаба.

Прессованная минеральная шерсть, специальный аэрогель, плавленый диатомит и плавленый амозит обнаружили удовлетворительную химическую стойкость по отношению к натрию в условиях эксплуатации полупромышленных установок. Эти материалы не являются полностью непроницаемыми для жидкого металла, хотя их плотность гораздо выше плотности минеральной шерсти, стеклянной ваты или стружки из нержавеющей стали.

Температурные условия работы изоляции. При выборе типа термоизоляции следует учитывать, в частности, температурные условия ее работы. В табл. 41 указаны максимальные рабочие температуры для различных сортов изоляции. Предварительный разогрев контура с помощью электронагревателей связан с местным перегревом термоизоляции по сравнению с эксплуатационными условиями. Так как термоизоляция, обладающая большей температуростойкостью, обычно имеет более высокую теплопроводность, в ряде случаев целесообразно изолировать трубопроводы в два слоя. Первый слой, непосредственно прилегающий к трубопроводу, изготовляется из более температуростойкого и более теплопроводного материала, а второй — из материала с лучшими теплоизолирующими свойствами, но менее температуростойкого.

Теплопроводность изоляционных материалов. Кривые зависимости коэффициента теплопроводности различных теплоизоляционных материалов от температуры представлены на рис. 123. Как видно из рисунка, минимальной теплопроводностью обладает плавленый аэрогель.

На теплопроводность материала термоизоляции сильное влияние оказывает природа среды, в которой он находится. В отличие от обычных энергетических установок, где такой средой является воздух, находящийся при атмосферном давлении, в установках на ядерном горючем термоизоляция может работать в среде разреженного воздуха или какого-либо газа. Газы с низким молекулярным весом, например гелий, могут повысить теплопроводность изолятора в 2—3 раза. Наоборот, термоизоляционные свойства

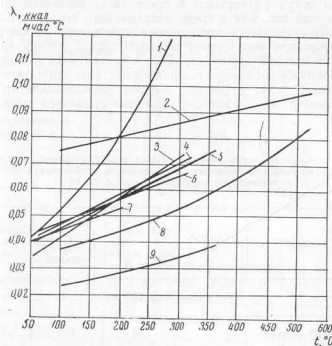


Рис. 123. Коэффициент теплопроводности некоторых теплоизоляционных материалов.

1 — стружка из нержавеющей стали; 2 — диатомит; 3 — войлок из минеральной шерсти ($\gamma = 140$ кг/м³); 4 — амозит; 5 — прессованная минеральная шерсть, в виде блоков; 6 — силикаты кальция; 7 — матчиан (85%); 8 — огнеупорная фибра ($\gamma = 220$ кг/м³); 9 — аэрогель (ЛК-61).



Рис. 124. Монтаж тепловой изоляции на трубопроводе.

1 — трубопровод, 2 — трубчатый нагреватель; 3 — крепление нагревателя; 4 — огнеупорная фибра высокой плотности; 5 — указатель течи; 6 — плавленый аэрогель; 7 — наружная обшивка.

материала могут улучшиться в среде газа, имеющего большой молекулярный вес, или в среде разреженного воздуха. Влияние разрежения сказывается при давлениях, меньших 10 мм рт. ст. Теплопроводность изоляторов, имеющих малый размер внутренних пор (плавленный азрогель), менее чувствительна к изменению природы окружающей среды по сравнению с другими изоляторами.

В табл. 42 и 43 приведены данные, позволяющие сравнить термоизоляцию из плавленного азрогеля с обычной изоляцией.

Таблица 42

Сравнение теплопотерь через слой различных теплоизоляционных материалов одинаковой толщины (температура поверхности трубопровода 455° С, температура окружающей среды 27° С)

Тип изоляции	Толщина, мм	Температура наружной поверхности изоляции, °С	Тепловые потери на 1 пог. м, ккал/час	Соотношение тепловых потерь
Труба диаметром 200 мм				
Плавленный азрогель	75	43	160	0,48
Обычная изоляция *	75	56	332	1,00
Огнестойкое минеральное волокно Плавленный азрогель **	20	45	181	0,54
	55	—	—	—
Труба диаметром 50 мм				
Плавленный азрогель	50	46	87	0,48
Обычная изоляция	50	61	180	1,00
Огнестойкое минеральное волокно Плавленный азрогель	20	49	107	0,59
	30	—	—	—

* Под обычной подразумевается теплоизоляция, обладающая коэффициентом теплопроводности 0,07 ккал/м·час·°С при температуре 200° С.

** Комбинированная изоляция, состоящая из внутреннего слоя огнестойкого минерального волокна и внешнего слоя плавленного азрогеля.

Таблица 43

Снижение расхода материала при переходе от обычной теплоизоляции к изоляции из плавленного азрогеля (температура поверхности трубопровода 455° С, температура окружающей среды 27° С)

Изоляционный материал	Толщина изоляции, мм	Температура поверхности изоляции, °С	Тепловые потери на 1 пог. м, ккал/час	Расход материала на 1 пог. м		Относительный расход материала		
				Объем, м³	Вес, кг	Толщина изоляции	Объем	Вес
Труба диаметром 200 мм								
Обычная изоляция *	75	56	332	0,07	19	1,0	1,0	1,0
Плавленный аэрогель	32	63	328	0,025	7	0,42	0,35	0,37
Труба диаметром 50 мм								
Обычная изоляция	50	61	180	0,018	5	1,0	1,0	1,0
Плавленный аэрогель	17	73	180	0,004	1,2	0,33	0,23	0,25
* Под обычной подразумевается теплоизоляция, обладающая коэффициентом теплопроводности 0,07 ккал/м·час °С при температуре 260°С.								

* Под обычной подразумевается теплоизоляция, обладающая коэффициентом теплопроводности 0,07 ккал/м·час·°С при температуре 200° С.

Большинство применяемых материалов не теряет теплоизоляционных свойств после длительного пребывания в воде и последующего высушивания, за исключением плавленного азрогеля, который следует защищать от воздействия влаги чехлами или обшивками.

Воздействия радиации на свойства какого-либо из рассмотренных изоляционных материалов не обнаружено.

Монтаж теплоизоляции на трубопроводе. На рис. 124 схематически показан поперечный разрез трубопровода со смонтированной на нем теплоизоляцией, электрическими нагревателями и указателем течи жидкого металла. Указатель течи представляет металлическое кольцо, электрически изолированное от трубопровода. Вытекающий через какую-либо неплотность жидкий металл создает электрический контакт между кольцом и стенкой трубопровода, что может быть зафиксировано специальными приборами, извещающими обслуживающий персонал установки об аварии.

Указатель течи может быть размещен не только на границе между слоями изоляции (рис. 124), но и непосредственно на поверхности трубопровода, что способствует более быстрому обнаружению течи.

Показанная на рисунке двухслойная теплоизоляция успешно использовалась в ряде полупромышленных жидкометаллических установок. Внутренний слой изоляции укрепляется на трубе при помощи шнура из огнестойкого материала (стеклянное волокно и т. п.), наружный слой — при помощи металлической ленты и затем асбестовой обшивки. В заключение поверхность изоляции покрывается слоем цемента, предохраняющим ее от воздействия влаги. Иногда изоляция защищается от механического повреждения металлическим кожухом.

ГЛАВА VI

ОБОРУДОВАНИЕ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

35. Механические насосы

В жидкометаллических реакторных системах часто применяются механические насосы, отличающиеся от электромагнитных насосов более высоким к. п. д. и меньшей стоимостью.

В качестве циркуляционных насосов первичного контура наибольшее распространение получили центробежные насосы, гидравлические характеристики и конструкция которых вполне удовлетворяют условиям длительной непрерывной работы при постоянном расходе и напоре. Насосы поршневого типа применяются только в качестве вспомогательных агрегатов, поскольку они имеют малую производительность и создают пульсирующее давление. Конструкция поршневого насоса с разделительной диафрагмой, кроме того, ненадежна при длительной эксплуатации из-за опасности повреждения диафрагмы.

Так как в отношении гидравлического сопротивления жидкие металлы подчиняются общим закономерностям, расчет проточной части насосов производится по обычным формулам для жидкостей.

Основной проблемой механических насосов является конструирование надежных при длительной работе уплотнений и подшипников в условиях недоступности для осмотра и ремонта.

Уплотнение должно полностью исключать возможность утечек жидкого металла, а также протечек внутрь насоса воздуха во избежание химического взаимодействия с теплоносителем.

При конструировании подшипников жидкометаллических насосов в некоторых случаях возникает необходимость использования в качестве смазки перекачиваемой среды, т. е. жидкости с низкими смазочными свойствами.

Значительные трудности возникают при выборе материала элементов подшипников и уплотнений, так как применение различных материалов в системе приводит к возможности переноса расплавленным металлом отдельных составляющих материалов.

В механических насосах применяются мембранные и газовые уплотнения, а также уплотнения замороженным металлом — теплоносителем.

В табл. 44 приведены некоторые данные по механическим насосам, успешно проработавшим 1000 и более часов. Все насосы, за исключением одного поршневого, представляют собой одноступенчатые центробежные насосы для перекачивания жидкого натрия в замкнутых контурах. Поршневой насос был разработан для специальных технологических процессов, требующих малых расходов и относительно высоких напоров. В табл. 44 приведены максимальные значения гидравлического к. п. д. насосов, включая привод.

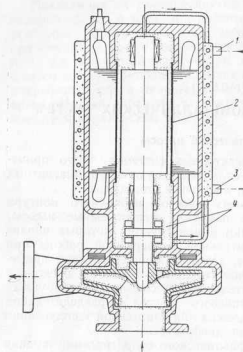


Рис. 125. Насос с герметизированным ротором.

1 — вход охлаждающей среды; 2 — мембрана; 3 — выход охлаждающей среды; 4 — жидкий металл.

Конструирование рабочего колеса центробежных насосов производится по нормам для обычных жидкостей, однако зазоры уплотнительных втулок должны быть увеличены в 1,5—2 раза, что особенно важно в случае применения сталей аустенитного класса, обладающих высоким коэффициентом термического расширения.

Полная герметизация рабочей полости, особенно необходимая при перекачивании радиоактивных жидкостей, достигается в насосах с мембранным уплотнением. Работа мембранного уплотнения основана на отделении жидкого металла от воздуха герметичной немагнитной оболочкой. Находящийся внутри оболочки ротор погружен в перекачиваемую жидкость и получает крутящий момент от вращающегося магнитного поля, расположенного снаружи.

Насосы с мембранным уплотнением изготавливаются двух основных разновидностей: с герметизированным ротором и с магнитным приводом.

Насосы с герметизированным ротором. На рис. 125 представлена схема насоса с герметизированным ротором. Рабочее колесо

Механические насосы для жидких металлов

Тип насоса	Назначение	К. п. д., %	Преимущества	Недостатки
Центробежный с герметизированным ротором	Небольшая производительность	65	Надежное уплотнение	Рабочая температура ограничивается 300°С в случае применения обычных подшипников. Сложность обслуживания
Центробежный с магнитным приводом	Небольшая производительность, рабочая температура не более 250°С	60	Надежное уплотнение	Низкая рабочая температура, сложность обслуживания
Центробежный с замораживающимся уплотнением	Широкий диапазон производительности. Высокая температура (до 700°С)	75	Удобство обслуживания. Нет трущихся деталей в жидком металле	Опасность течи в случае прекращения циркуляции охлаждающей среды
Центробежный с газовым уплотнением	Широкий диапазон производительности. Умеренная температура	75	Надежное уплотнение. Нет трущихся частей в жидком металле	Требуется контроль уровня металла в бачке насоса и подпитка полости двигателя очищенным инертным газом. Сложность обслуживания
Центробежный с газовым уплотнением вала	Для пассивного металла. Широкий диапазон производительности. Высокая температура (до 750°С)	75	Обслуживание проще, чем для насоса предыдущего типа	Требуется контроль уровня металла в насосе и подпитка очищенным инертным газом
Поршневой с газовым уплотнением	Низкая производительность и температура	10—20	Высокий напор	Трущиеся части находятся в среде жидкого металла

Таблица 44

насоса насажено непосредственно на ротор многофазного двигателя, погруженного в перекачиваемую жидкость. Тонкая цилиндрическая мембрана полностью герметизирует подшипники и вращающиеся части. Снаружи мембраны находятся защищенные изоляцией обмотки статора. Ротор приводится во вращение так же, как в случае обычного многофазного двигателя. Предусмотрено охлаждение обмотки статора и жидкого металла в зоне подшипников и ротора. Таким образом, температура в двигательной секции может быть значительно ниже температуры в проточной части насоса и, следовательно, проблема изоляции обмотки статора не является лимитирующим фактором при установлении предельной температуры перекачиваемой жидкости.

При проектировании такого типа насосов к проблеме подшипников, работающих на жидком металле в качестве смазки, добавляется проблема создания прочной цилиндрической мембраны, которая вызвала бы наименьшие потери мощности двигателя. Потери на вихревые токи в мембране приводят к снижению общего к. п. д. двигателя и необходимости удаления возникающего тепла. Установка в зазоре двигателя мембраны приводит к тому, что нормальные для индукционного мотора конструктивные соотношения перестают быть оптимальными.

Развиваемый обратный крутящий момент, вызванный наличием мембраны, может быть получен из общих выражений для случая полого цилиндра, помещенного в воздушный зазор индукционного двигателя [84]:

$$K_T = \frac{\Omega}{\alpha + \beta \Omega^2}, \quad (78)$$

здесь $K_T = \frac{T}{\Omega^2 B^2 L}$ и $\Omega = \frac{4\pi^2 n a t}{\rho_s}$,

где T — крутящий момент, $\text{дн} \cdot \text{см}$;

a — радиус цилиндра, см ;

t — толщина стенки цилиндра, см ;

L — осевая длина поля, см ;

n — частота поля, об/сек ;

ρ_s — удельное сопротивление цилиндра, эл. магн. ед. ;

B — максимальная плотность магнитного потока, гаусс.

Безразмерные коэффициенты α и β определяют соответственно омическое и индукционное сопротивление цилиндра.

В случае длинного цилиндра с применением магнитных материалов в электромагнитной системе двигателя теоретические значения коэффициентов равны:

$$\alpha = 2; \beta = 8 \left(\frac{a}{l'} \right)^2,$$

где l' — величина воздушного зазора.

Поскольку для моторов, питаемых током обычной частоты и снабженных тонкой мембраной из материала высокого электри-

ческого сопротивления, член $\beta \Omega^2$ пренебрежимо мал по сравнению с членом α , выражение (78) может быть представлено в виде:

$$K_T = \frac{\Omega}{2}, \quad (79)$$

откуда

$$T = \frac{2\pi^2 n t a^2 B^2 L}{\rho_s} \frac{1}{\Omega n \cdot \text{сек.}}$$

Так как потери мощности

$$H = 2\pi n T \text{ эрг/сек}, \quad (80)$$

получим, подставляя значение T в (80),

$$H = \frac{4 \cdot 10^{-7} \pi^2 n^2 t L a^2 B^2}{\rho_s} \text{ ат.}$$

Произведя замену некоторых величин, получим следующую формулу для расчета потерь мощности в мембране:

$$H = \frac{3,85 \cdot 10^{-9} n^2 L D^2 B_m^2}{\rho_s} \text{ ат}, \quad (81)$$

где ρ_s — удельное сопротивление мембраны, $\text{мком} \cdot \text{см}$;

$B_m = \frac{2}{\pi} B$ — средняя плотность магнитного потока;

D — диаметр цилиндра, см .

При конструировании двигателя насоса, имея в виду получение максимального общего к. п. д., необходимо прежде всего стремиться к уменьшению плотности потока по сравнению с обычными нормами.

Если связать выражения для потерь в индукционном моторе с формулой потерь в мембране, можно получить необходимые уравнения для расчета двигателя насоса.

Обратная электродвижущая сила, наведенная в фазе любого индукционного мотора, получается из выражения

$$E = 4,44 \cdot 10^{-8} K_{\text{эф}} f T \Phi_m \text{ в}, \quad (82)$$

где f — частота, Гц ;

T — число витков в фазе;

Φ_m — суммарный магнитный поток пары полюсов, мкс ;

$K_{\text{эф}}$ — коэффициент расположения обмотки ($K = 0,955$ для тесной намотки).

Выражение (82) отличается от обычной формулы трансформатора коэффициентом $K_{\text{эф}}$, который учитывает размещение обмотки.

Пользуясь выражением (82) для трехфазного тока и пренебрегая омическим сопротивлением статора, получаем следующее выражение для подводимой к двигателю мощности:

$$Q = 10,9 \cdot 10^{-11} K_{\text{эф}} B_m (\text{ас}) D^2 L n \text{ ккал}, \quad (83)$$

где B_m — средняя плотность потока в воздушном зазоре Гс ;

(ac) — удельная электрическая нагрузка в ампервитках на сантиметр длины окружности зазора;

n — синхронная скорость, об/сек;

D — диаметр ротора, см;

L — длина ротора, см.

Из уравнений (81) и (83) получим выражение относительных потерь в мембране через основные параметры индукционного двигателя:

$$Z_s = \frac{H}{Q \cos \theta} = \frac{0,035 n D t B_m}{K_w p_s (ac) \cos \theta} \quad (84)$$

где $\cos \theta$ — коэффициент мощности.

Выражение (84) показывает, что относительные потери в мембране прямо пропорциональны диаметру ротора и не зависят от его длины. Следовательно, целесообразно применять возможно большие отношения L/D .

Для предварительного расчета двигателя насоса, кроме уравнений (83) и (84), потребуются знание относительных потерь в меди ротора и статора.

Ток в стержнях ротора может быть определен из уравнения

$$I_b = \frac{K_w N_{sc}}{N_{Rc}} I_p \cos \theta, \quad (85)$$

где N_{sc} — общее число проводников статора;

N_{Rc} — общее число проводников ротора;

I_p — фазный ток статора.

Ток в кольцах ротора

$$I_b = \frac{N_{Rc}}{\pi p} \quad (86)$$

где p — число пар полюсов.

Общие потери в меди ротора

$$H_{Rc} = \frac{10^{-6} (\pi K_w)^2 p_c L_B D^2 (ac)^2 \cos^2 \theta}{A_B N_{Rc}} \text{ ат.} \quad (87)$$

Здесь p_c — удельное сопротивление проводников ротора, $\text{мком} \cdot \text{см}$;

A_B — поперечное сечение одного стержня ротора, см^2 ;

L_B — эффективная длина стержня, равная длине стержня плюс величина $\frac{2N_{Rc} d_m A_B}{\pi p^2 A_c}$ см;

d_m — средний диаметр кольца, см;

A_c — поперечное сечение кольца, см^2 .

Пользуясь составленным выражением и уравнением (83), получим следующее выражение относительных потерь в меди ротора

$$Z_{Rc} = \frac{90,5 K_w p_c (ac) L_B \cos \theta}{A_B N_{Rc} B_m n L} \quad (88)$$

Аналогично для потерь в меди статора получим следующее выражение:

$$Z_{sc} = \frac{90,5 p_c (ac) L_s}{K_w A_{ss} N_{ss} B_m n L \cos \theta} \quad (89)$$

где A_{ss} — общее сечение меди на один паз статора, см^2 ;

N_{ss} — число пазов статора;

L_s — средняя длина проводника, равная половине средней длины витка, см.

Уравнения (83), (84), (88) и (89) дают возможность рассчитать общие потери в двигателе и определить оптимальные соотношения основных величин.

Присутствие жидкого металла в зазоре между статором и ротором увеличивает общие потери. Эти дополнительные потери складываются из «вентиляционных» механических потерь и потерь на паразитные токи, проходящие через жидкость. Практически те и другие потери очень малы и в расчет не принимаются.

Потери могут также вызываться особенностями конструкции ротора. Представляется нецелесообразным помещать в жидкий металл сердечник ротора из тонких листов. В таких условиях изоляция между листами скоро была бы нарушена и послужила бы источником загрязнения жидкого металла, что нежелательно. В связи с этим роторы изготавливаются или сплошными с медными стержнями в пазах или уплотняются снаружи чехлом в виде тонкостенной трубы из магнитного материала во избежание увеличения «воздушного» зазора. Однако благодаря необходимому относительно большому «воздушному» зазору и экранирующему действию неподвижной мембраны обе конструкции сердечника ротора не вызывают заметного снижения к. п. д. двигателя.

В связи с необходимостью использования в насосах с герметизированным ротором в качестве смазки для подшипников перекачиваемого жидкого металла, была применена конструкция гидростатического подшипника, т. е. подшипника, давление в слое смазки которого обеспечивается внешним источником. Основное преимущество гидростатического подшипника перед обычным гидродинамическим состоит в возможности значительного увеличения удельной нагрузки.

На рис. 126 [84] представлен поперечный разрез подшипника и развертка внутренней поверхности вкладыша. Шейка вала окружена втулкой, содержащей ряд карманов, каждый из которых индивидуально снабжается жидким металлом от одного общего ресивера. Жидкость вытекает из подшипника по его краям, а также через продольные канавки, расположенные между карманами. Продольные канавки служат для исключения возможности выравнивания давления в центральной части подшипника за счет перетек по окружности. Расчеты показывают, что введение продольных канавок в подшипник, имеющем отношение $L/D = 2$, удваивает его грузоподъемность.

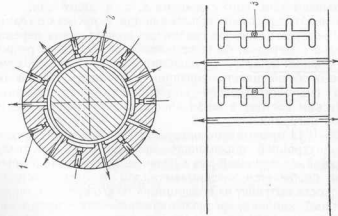


Рис. 126. Схема гидростатического подшипника со связкой жидким металлом.
1 — поводок жидкости; 2 — выход жидкости; 3 — ведомые магниты; 4 — ведущие магниты; 5 — мембрана; 6 — кожух.

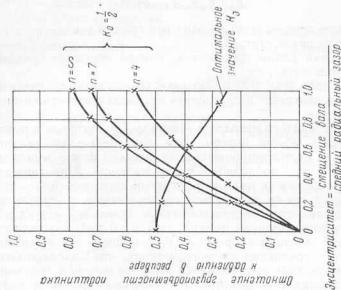


Рис. 127. Характеристика гидростатического подшипника.

п — число карманов; K_0 — отношение давления в кармане к давлению в ресивере.

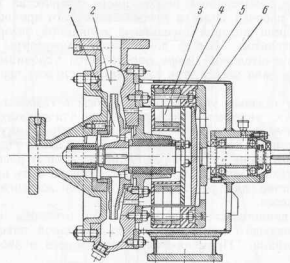


Рис. 128. Центробежный насос с магнитным приводом.
1 — рабочее колесо; 2 — корпус; 3 — ведомые магниты; 4 — ведущие магниты; 5 — мембрана; 6 — кожух.

тельно, возникновение восстанавливающей силы. Поперечные канавки карманов предназначены для организации «масляного» клина при аварийном перерыве в подаче жидкости; подшипник работает как гидродинамический.

На рис. 127 представлены аналитические кривые, характеризующие гидростатический подшипник указанной конструкции. Во избежание колебаний нагрузочной способности подшипника считается целесообразным число каналов принимать нечетным и в количестве не менее пяти.

Насосы с магнитным приводом. На рис. 128 показан герметичный насос с магнитным приводом, который представляет комбинацию центробежного насоса и муфты с постоянными магнитами. Применение в данном случае постоянных магнитов обеспечивает большую, по сравнению с электромагнитами, надежность и компактность привода. Магнитная муфта состоит из ведущего и ведомого дисков, снабженных подковообразными магнитами. При вращении привода магниты ведущего диска увлекают магниты ведомого диска и вызывают вращение вала импеллера.

Рабочая полость насоса закрывается герметичным колпаком, который крепится к корпусу. Тонкостенная немагнитная мембрана, образующая цилиндрическую поверхность колпака, располагается в зазоре между полюсами магнитов. Насосы такой конструкции мощностью до 20 л. с. при 1500 об/мин [145] изготавливаются в Англии. Передача значительной мощности с помощью магнитной муфты затруднительна по конструктивным соображениям, связанным с размещением необходимого количества магнитов. Давление в рабочей полости насоса зависит от прочности мембраны, толщина которой ограничена величиной зазора между полюсами магнитов. Выбор допустимой температуры жидкого металла в значительной мере определяется условиями работы подшипников вала насоса, так как смазкой служит перекачиваемая среда.

Насосы с газовым уплотнением. Насосы с газовым уплотнением не требуют уплотнения непосредственно для жидкого металла, благодаря чему они снабжаются относительно простым уплотняющим устройством. Центробежные насосы с газовым уплотнением имеют длинные валы, верхние подшипники которых расположены вне зоны жидкого металла и его паров. Должно быть предусмотрено устройство для регулирования уровня жидкого металла в полости насоса.

Насосы данного типа снабжаются уплотнением инертного газа, заполняющего пространство над свободной поверхностью жидкого металла. Применяются вращающиеся и лабиринтные уплотнения.

Когда допустима некоторая утечка газа в атмосферу, могут быть использованы обычные сальниковые набивки или контактные уплотнения торцевого типа. При наличии смазки последние уплотнения работают надежно, однако существует опасность проникновения смазки в рабочую полость насоса и загрязнения жидкого металла.

При работе с радиоактивными жидкими металлами утечка газа в атмосферу недопустима. Одно из конструктивных решений для такого случая показано на рис. 129.

Центробежный насос с газовым уплотнением, изображенный на рис. 129, спроектирован и изготовлен Ноллзской лабораторией атомной энергии для эвтектики Na — K. Производительность насоса $115 \text{ м}^3/\text{час}$ при числе оборотов 1750 об/мин, напоре 23 м и температуре Na — K 355°C . Электродвигатель и подшипники расположены над свободной поверхностью жидкого металла в атмосфере инертного газа и защищены от затопления благодаря соединению трубопроводом полости насоса с внешним сливным резервуаром большой емкости. В верхней части бака насоса установлено лабиринтное уплотнение вала для ограничения утечки газа при снятии кожуха мотора и предохранения подшипников и электродвигателя от паров перекачиваемого металла. При эксплуатации давление газа в верхнем и нижнем отсеках одинаково

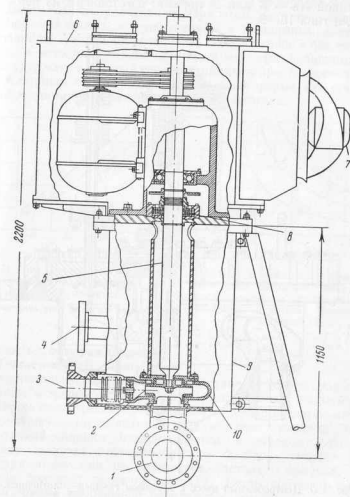


Рис. 129. Центробежный насос для сплава Na — K с лабиринтным газовым уплотнением.

1 — всасывающий патрубок; 2 — рабочее колесо; 3 — напорный патрубок; 4 — сливной патрубок; 5 — вал; 6 — кожух мотора; 7 — охлаждающий вентилятор; 8 — лабиринтное уплотнение; 9 — бак насоса; 10 — корпус.

и утечки газа в атмосферу не происходит. Наружная поверхность верхнего кожуха охлаждается воздухом от вентилятора, что вызывает охлаждение двигателя. Все детали насоса, соприкасающиеся с эвтектикой Na—K или ее парами, изготовлены из нержавеющей стали типа 18—8.

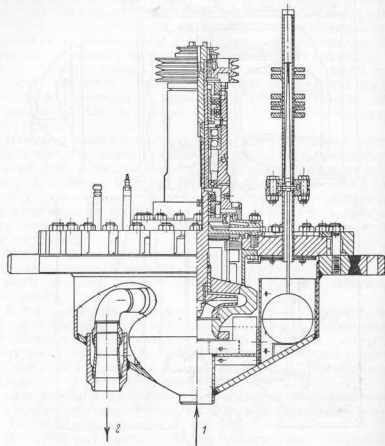


Рис. 130. Центробежный насос с торцевым газовым уплотнением.

1 — вход жидкости; 2 — выход.

На рис. 130 показан центробежный насос Окриджской лаборатории [145], рассчитанный на температуру жидкого металла до 750°С. Уплотнение торцевого контактного типа расположено в среде нейтрального газа над свободным уровнем горячей жидкости. Для обеспечения нормальных условий работы уплотнения предусмотрено местное охлаждение корпуса и шейки вала. В качестве трущейся пары уплотнения приняты кольца из серебряно-графитовой керамики и закаленной стали. Неподвижные раз-

ъемные фланцевые соединения насоса снабжены металлическими прокладками овального сечения.

В жидкометаллическом поршневом насосе для химического производства при температуре до 250°С и напоре до 7,6 м было применено газовое уплотнение. При этом никаких специальных проблем, связанных с уплотнением и трущимися элементами, не возникло. Утечка через поршень возвращалась в бак-отстойник насоса, а шток уплотнялся обычными мягкими набивками, с тем чтобы удержать инертный газ в отстойнике в пространстве за поршнем. Клапанам была придана специальная форма для предотвращения заедания и забивания окислами металла.

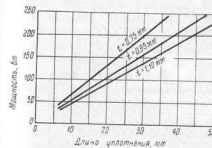


Рис. 131. Затрата мощности на преодоление трения в натриевом замораживающемся уплотнении.

t — толщина слоя жидкого металла.

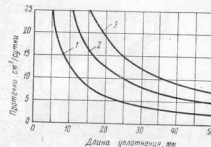


Рис. 132. Зависимость величины протечек через натриевое замораживающееся уплотнение от его длины при различных перепадах давления на уплотнении (Δp).

1 — $\Delta p = 1,4$ атм; 2 — $\Delta p = 2,8$ атм;
3 — $\Delta p = 4,2$ атм; $n = 1800$ об/мин;
 $d_{\text{вала}} = 63,5$ мм.

Насосы с замораживающим уплотнением. В принципе замораживающееся уплотнение представляет собой подшипник скольжения трения с малым зазором, заполненным жидким металлом. Шейка вала трется по поверхности замороженного металла, образуя тонкую, но достаточно вязкую пленку металла. За счет тепла трения пленка поддерживается в жидком состоянии, но ввиду высокой теплопроводности быстро отводит тепло. Благодаря этому она не становится настолько толстой, чтобы возникла большая протечка металла. Тепло горячего металла и тепло трения непрерывно отводится с помощью специального охлаждения жидкостью или газом.

Мощность, затрачиваемая на преодоление трения, прямо пропорциональна длине уплотнения и обратно пропорциональна толщине слоя жидкого металла (рис. 131) [145].

Величина протечек через уплотнение определяется скоростью истечения жидкости через узкую кольцевую щель при переменном давлении. На рис. 132 приведены данные по протечкам, относящиеся к уплотнению вала $\varnothing 63,5$ мм и скорости вращения $n = 1800$ об/мин.

Для нормальной работы уплотнения большое значение имеет температура охлаждения и чистота жидкого металла, так как уплотнение действует в отношении примесей подобно холодной ловушке (см. гл. VII). Загрязнение натрия в замораживающемся уплотнении окислами может вызвать заедание и аварию насоса, в связи с чем содержание кислорода в металле не должно превышать 0,005 %.

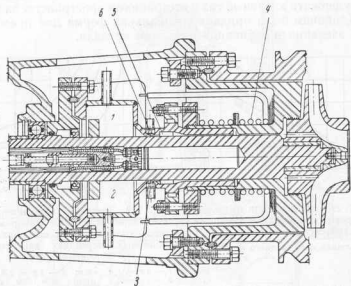


Рис. 133. Центробежный насос для натрия с замораживающимся уплотнением.

1 — полость инертного газа; 2 — полость для протечек; 3 — замороженный натрий; 4 — нагреватель; 5 — расширяющийся натрий с температурой не более 100–110° С; 6 — подвод охлаждающей среды.

Целесообразно изолировать уплотнение в тепловом отношении от всей системы и организовать непосредственно рядом с ним питающую полость жидкого металла. Замороженная зона должна быть возможно более короткой, чтобы уменьшить расход мощности на трение.

В изображенной на рис. 133 конструкции насоса длина уплотнения составляет от 6 до 19 мм. Свободная поверхность жидкого металла защищается инертным газом от окисления.

Замораживающееся уплотнение не способно удерживать перепады давления большие, чем несколько десятых атмосферы.

При горизонтальном расположении вала необходимо принимать меры к тому, чтобы прогиб его у втулки уплотнения не превышал 0,1 мм. Битие вала не должно превышать 0,025 мм во избежание пластической деформации замороженного металла, а также излишнего тепловыделения. При горизонтальном расположении

вала в случае, когда давление жидкого металла в щели меньше давления инертного газа, возможен разрыв пленки жидкого металла и проникновение газа в рабочую полость насоса. Этих недостатков лишены насосы с вертикальным расположением вала. На рис. 134 представлен американский натриевый центробежный насос с замораживающимся уплотнением, рассчитанный на производительность 5,3 м³/мин и напор 30,5 м при температуре 650° С. Насос имеет вертикальный вал, снабженный замораживающимся уплотнением, и герметичный кожух, заполняемый инертным газом. Уплотнение вала Ø 76 мм расположено под нижним подшипником на расстоянии от него 380 мм. Для охлаждения кожуха на внешней его поверхности предусмотрена обойма Ø 508 мм и длиной 152 мм. Детали насоса изготовлены из нержавеющей стали типа 410; для такой стали поверхностного упрочнения шеек вала под уплотнение после шлифовки не требуется.

На рис. 135 показана экспериментальная кривая мощности, поглощаемой уплотнением этого насоса. Максимальный пусковой момент для вала Ø 76 мм составляет 4,15 кг·м. По мере приближения температуры застывшего металла к точке плавления уменьшаются силы сцепления, а следовательно, и пусковой момент. Уплотнение металлом с высокой теплопроводностью позволяет иметь температуру в кольцевой щели, близкую к температуре замерзания. Кривые на рис. 136 изображают характеристики уплотнений на натрий, показанных на рис. 137 и 138 [64].

Как показал опыт, кольцо уплотнения с конической внешней и цилиндрической внутренней поверхностями, образующее конусообразную пленку металла толщиной 0,5 мм со стороны газа

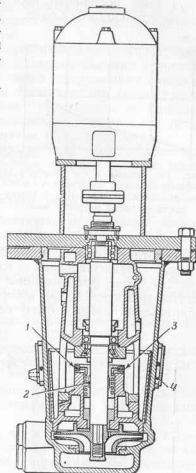


Рис. 134. Центробежный насос для натрия с замораживающимся уплотнением и с вертикальным расположением вала.

1 — вход охлаждающей среды (толуола); 2 — кольцо замороженного натрия; 3 — выход охлаждающей среды; 4 — рубашка охлаждения.

и 1,5 мм со стороны жидкого металла, работает более плавно, чем кольцо цилиндрической формы. Очевидно, при уменьшающемся радиальном зазоре твердые включения в жидком металле могут быть постепенно перетерты раньше, чем они приведут к повреждению шейки вала.

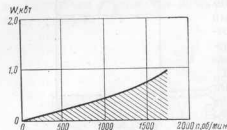


Рис. 135. Мощность, поглощаемая замораживающимся уплотнением насоса, изображенного на рис. 134, в зависимости от числа оборотов вала.

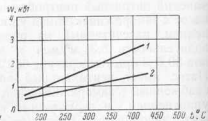


Рис. 136. Мощность охлаждения для замораживающегося уплотнения в зависимости от температуры натрия. 1 — уплотнение, рис. 137; 2 — уплотнение, рис. 138.

(число оборотов вала 1200 об/мин, температура уплотнения 50° С, перепад давлений 0,035 кг/см²).

Уплотнительная втулка насоса, представленная на рис. 137, имеет фрезерованные двухзаходные спиральные каналы для охлаждающей среды, которая протекает сверху вниз в одном спиральном канале и снизу вверх — в другом.

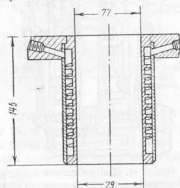


Рис. 137. Замораживающееся натриевое уплотнение с одним охлаждающим каналом.

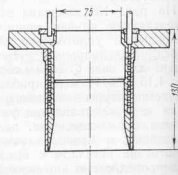


Рис. 138. Замораживающееся натриевое уплотнение с двумя охлаждающими каналами.

Конструкция с двумя независимыми охлаждающими каналами показана на рис. 138. Нижний охлаждающий контур образуется двойным спиральным каналом. Охлаждающий контур создает предварительное охлаждение жидкого металла в области большого радиального зазора, где обеспечивается осаждение посторонних

включений прежде, чем они смогут отложиться в верхнем участке щели. Верхний контур охлаждения представляет кольцевую камеру, которая обеспечивает замораживание жидкого металла на участке узкой кольцевой щели. Небольшая длина и малый радиальный зазор в области замороженного металла снижают вращающий и пусковой моменты.

Центробежные насосы с замораживающимся уплотнением удобны в эксплуатации и ремонте; обладают высоким значением к. п. д. из-за отсутствия трущихся частей, погруженных в жидкий металл. Прекращение циркуляции теплоносителя (вода, толлуол и т. д.), идущего на замораживание уплотнения, не приводит к мгновенному выходу из строя уплотнения, в связи с чем всегда имеется несколько минут для принятия экстренных мер.

Вращающиеся замораживающиеся уплотнения не пригодны для жидкостей, содержащих абразивные частицы, которые вызывают быстрый износ вала и уплотнения.

36. Электромагнитные насосы

Для перекачивания жидких металлов, обладающих низким электрическим сопротивлением по сравнению с другими жидкостями, помимо механических насосов, используются электромагнитные.

Электромагнитные насосы имеют более низкий к. п. д. и большие габариты и вес по сравнению с механическими, однако находят применение благодаря следующим преимуществам:

- 1) возможность полной герметизации конструкции вследствие отсутствия каких-либо уплотнений;
- 2) простота эксплуатации и ремонта вследствие отсутствия движущихся и вращающихся частей (подшипников), требующих замены и смазки;
- 3) удобство расположения в системе вследствие отсутствия специальных бачков со свободной поверхностью на всасывании насоса;
- 4) возможность регулирования производительности в широких пределах путем изменения величины входного напряжения.

Практически выгодным является применение электромагнитных насосов лишь для перекачивания щелочных металлов, обладающих сравнительно небольшим удельным весом и низким электрическим сопротивлением. Расход энергии на их перекачку относительно мал и в связи с этим к. п. д. насоса не оказывает решающего влияния на выбор его типа.

К настоящему времени накоплен значительный опыт работы различных типов электромагнитных насосов в крупных экспериментальных установках. Американская фирма Джeneral ЭлектрИк Компани построила и испытала электромагнитный насос производительностью 115 м³/час для судовой установки подводной лодки «Морской волк».

Во всех электромагнитных насосах используется принцип

работы электродвигателя, т. е. движущая сила создается проводником, несущим ток в магнитном поле. По жидкому металлу, который выполняет роль такого проводника, течет ток в направлении, перпендикулярном силовым линиям; жидкость перемещается перпендикулярно направлению тока и линиям поля; направление перемещения определяется по правилу левой руки.

Типы электромагнитных насосов. В соответствии с принципом действия электромагнитные насосы делятся на индукционные и кондукционные. В обоих классах насосов магнитное поле создается сердечниками, устанавливаемыми непосредственно вблизи канала. В индукционных насосах электрический ток в жидком металле возбуждается от катушек, расположенных вне канала, в то время как в кондукционных насосах ток подводится и снимается с помощью шин, присоединяемых непосредственно к каналу. Кондукционные насосы могут работать как на постоянном, так и на переменном токе.

Ниже перечисляются наиболее важные типы электромагнитных насосов:

Кондукционные насосы

1. Насос постоянного тока.
2. Насос переменного тока.

Индукционные насосы

1. Спиральный индукционный насос.
2. Плоский линейный индукционный насос.
3. Кольцевой линейный индукционный насос.
4. Индукционный насос с вращающимися магнитами.

В спиральных насосах жидкий металл приобретает вращательное движение, в линейных насосах металл имеет только поступательное движение. Во всех типах линейных индукционных насосов используется бегущее поле многофазного тока.

Наиболее разработанными в настоящее время являются конструкции кондукционных насосов постоянного и переменного тока, а также плоских линейных индукционных насосов. В Англии и США исследуются спиральные и кольцевые индукционные насосы. Насосы с вращающимися магнитами изготавливаются лишь в небольших количествах промышленностью США.

Основным недостатком кондукционных насосов является большая сила тока и связанное с этим большое сечение токоподводящих шин, которые должны присоединяться к тонкостенным каналам для жидкого металла.

Преимущества электромагнитных насосов постоянного тока заключаются в простоте конструкции, удобстве эксплуатации и надежности электроизоляции. Имеется опыт длительной работы таких насосов при температуре жидкого металла до 800° С с естественным воздушным охлаждением обмотки.

Значение общего к. п. д. насосов постоянного тока, включая потери в источнике питания, составляет примерно 15—20% для

малых насосов и 40—50% для крупных агрегатов, источником питания которых служат униполярные генераторы. Кроме того, благодаря невысоким требованиям к свойствам электроизоляции, эксплуатация этих насосов в условиях интенсивной радиации не создает больших затруднений.

Общее преимущество электромагнитных насосов переменного тока состоит в возможности использования для них обычных источников питания. При больших производительностях они сравнимы по габаритам и к. п. д. с насосами постоянного тока.

Недостатком насосов переменного тока является требование специального охлаждения за счет принудительной циркуляции воздуха или какой-либо жидкости. Кроме того, они более сложны в производстве и дороги по сравнению с насосами постоянного тока. Большинство электроизоляционных материалов, применяемых для обмоток насосов переменного тока, чувствительно к действию радиоактивных излучений.

Основное преимущество индукционных насосов состоит в том, что их применение исключает необходимость подводить и отводить большие токи к тонкостенному каналу с помощью тяжелых шин от специальных источников питания.

Определенный интерес представляют насосы с вращающимися магнитами, которые не требуют токоподводящих шин и имеют простую систему питания.

Области применения различных типов электромагнитных насосов зависят от их особенностей. Кондукционные насосы переменного тока применяются для небольших установок; насосы переменного тока являются наилучшими для висмута в установках различной мощности. Индукционные насосы используются для перекачивания жидких металлов, имеющих низкое удельное сопротивление, малую вязкость и плотность (натрий, сплавы натрия—калий, литий). Спиральные индукционные насосы эффективны при малых производительностях и высоких напорах, а линейные индукционные насосы — при больших производительностях и различных давлениях. В табл. 45 указываются типы электромагнитных насосов, рекомендуемых для использования в различных условиях работы [42].

В табл. 46 приведены основные характеристики некоторых построенных электромагнитных насосов [43].

Расчет электромагнитных насосов. Приведем общие для всех типов насосов основные уравнения, характеризующие движение жидкого металла в магнитном поле насоса [43].

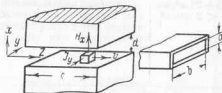


Рис. 139. К выводу уравнений, характеризующих движение жидкого металла в магнитном поле насоса.

Таблица 45

Типы электромагнитных насосов, рекомендуемые для различных условий работы

Расход и напор	Натрий, сплав Na—K	Висмут
$< 5 \text{ м}^3/\text{час}$ $< 2 \text{ кг/см}^2$	Кондукционный насос переменного тока на частоте сети, объединенный с трансформатором	Кондукционный насос переменного тока на частоте сети, объединенный с трансформатором
$5 \div 20 \text{ м}^3/\text{час}$ $< 2 \text{ кг/см}^2$	Линейный индукционный насос. Кондукционный насос на частоте сети с отдельным трансформатором или объединенный с ним	Кондукционный насос на частоте сети с трансформатором или без него
$< 10 \text{ м}^3/\text{час}$ $\sim 7 \text{ кг/см}^2$	Спиральный индукционный насос	Спиральный насос постоянного тока Спиральный кондукционный насос переменного тока с отдельным трансформатором
$< 20 \text{ м}^3/\text{час}$ $\sim 4 \text{ кг/см}^2$	Линейные индукционные насосы. Кондукционные насосы постоянного и переменного тока на частоте сети с отдельным трансформатором	Кондукционные насосы постоянного и переменного тока с отдельным трансформатором
$< 200 \text{ м}^3/\text{час}$ $< 7 \text{ кг/см}^2$	Линейные индукционные насосы. Кондукционные насосы постоянного и переменного тока пониженной частоты с отдельным трансформатором	Кондукционные насосы постоянного и переменного тока пониженной частоты с отдельным трансформатором
$> 200 \text{ м}^3/\text{час}$ $> 7 \text{ кг/см}^2$	Линейные индукционные насосы Кондукционный насос постоянного тока	Насос постоянного тока Кондукционный насос переменного тока пониженной частоты с отдельным трансформатором

Таблица 46

Основные характеристики электромагнитных насосов

Тип насоса	Металл	Производительность, м ³ /час	Давление, кг/см ²	Мощность, кВт	К. п. д., %	Коэффициент мощности	Напряжение, в	Ток, а	Частота, гц	Характеристика охлаждающего устройства
Кондукционный										
Переменного тока	Ртуть	1,6	1,0	0,05	4,0	0,26	—	—	—	—
Переменного тока	Натрий — калий при 400° C	5,5	0,7	0,10	—	—	—	—	—	—
Спиральный постоянного тока	Висмут при 500° C	0,2	4,2	0,02	1,0	—	1,2	1 400	—	—
Постоянного тока	Висмут при 200° C	2,7	4,2	0,31	12	—	0,6	4 400	—	—
Постоянного тока	Натрий — калий при 250° C	81,6	2,8	6,2	44	—	0,75	19 000	—	—
Постоянного тока	Висмут при 550° C	546	5,3	77	30	—	2,6	100 000	—	—
Постоянного тока	Натрий при 410° C	2260	5,3	320	50	—	2,5	200 000	—	—
Индукционный										
Спиральный	Натрий при 400° C	6,8	4,2	0,77	22	0,56	—	—	50	3—4 кот
Спиральный	Натрий при 400° C	85	2,8	6,4	18,5	0,8	—	—	25	28,3 м ³ /мин воздуха 3,5 кот
Кольцеобразный	Натрий — калий при 175° C	115	1,0	3,0	36	0,22	—	—	50	—
Кольцеобразный	Натрий при 500° C	109	3,5	10,3	36	0,3	—	—	50	10 кот
Кольцеобразный	Натрий при 400° C	327	5,3	320	45	0,48	—	—	50	—
Плоский	Натрий при 370° C	2260	2,8	25	36	0,45	—	—	60	56,6 м ³ /мин воздуха

Если элемент жидкости размерами dx , dy и dz (рис. 139) помещен в магнитное поле напряженностью H_x [эрс] и по элементу протекает ток, плотность которого I_y [ампер/см²], то в направлении z на него действует сила

$$\frac{\partial p_z}{\partial z} = \frac{J_y H_x}{10}. \quad (90)$$

Полное давление, развиваемое насосом при эффективной его длине l ,

$$p_z = \int_0^l \frac{J_y H_x}{10} dz. \quad (91)$$

Тогда мощность на выходе насоса

$$P_0' = \frac{P_2 \eta}{10^3} \text{ ат,} \quad (92)$$

где $q = abv \text{ см}^3/\text{сек}$;

a и b — размеры сечения канала, см (см. рис. 139);

v — скорость течения металла в канале, $\text{см}/\text{сек}$.

Основные потери мощности в насосе состоят из омических потерь в жидком металле (P_f), в обмотках (P_w), стенках канала (P_r), а также гидравлических потерь на трение жидкости о стенки канала (P_h).

Омические потери в жидком металле могут быть определены из следующего выражения:

$$P_f = ab\rho \int_0^l j_v^2 dz \text{ ат,} \quad (93)$$

где ρ — удельное электрическое сопротивление металла, $\text{ом}\cdot\text{см}$.

Обычные методы расчета гидравлических потерь на трение не могут быть применены при проектировании электромагнитных насосов в связи с высокой проводимостью жидкого металла и воздействием на него магнитного поля. При движении жидкости в ней наводятся токи, взаимодействие которых с магнитным полем приводит к образованию сил, вызывающих дополнительное сопротивление ее перемещению и, следовательно, увеличение гидравлических потерь.

Потеря напора, затрачиваемая на преодоление трения в прямоугольном канале с большим отношением длин сторон, определяется из выражения

$$h = \frac{c_f l v^2}{ag}, \quad (94)$$

где c_f — коэффициент трения;

l — длина канала;

v — скорость течения жидкости;

a — длина большей стороны сечения канала;

g — ускорение силы тяжести.

Для турбулентного потока в канале с гладкими стенками и при отсутствии заметного влияния магнитного поля коэффициент трения может быть определен из обычного уравнения

$$\frac{1}{\sqrt{c_f}} = 4 \lg (2 \text{ Re } \sqrt{c_f}) - 1,6, \quad (95)$$

где $\text{Re} = \frac{2va}{\nu}$;

ν — кинематическая вязкость жидкости, $\text{см}^2/\text{сек}$.

Исследование влияния магнитного поля на движение ртути показало, что с увеличением напряженности поля эффективная

вязкость металлической жидкости увеличивается. В этом случае коэффициент трения может быть определен из уравнения

$$\left. \begin{aligned} c_f &= \frac{8m}{\text{Re}}; \\ m &= \frac{\nu_m H_a}{(4 + 10^9 \mu \rho)^2}, \end{aligned} \right\} \quad (96)$$

где H_m — магнитная проницаемость жидкости;

H_a — магнитная индукция, гс ;

μ — динамическая вязкость жидкости, $\text{г}/\text{см}\cdot\text{сек}$;

ρ — удельное электрическое сопротивление жидкости, $\text{ом}\cdot\text{см}$.

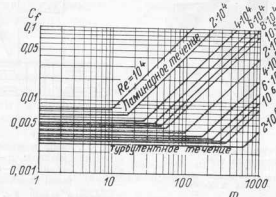


Рис. 140. График для расчета коэффициента трения при течения жидкого металла через прямоугольный канал в магнитном поле.

Если принять, что уравнение (95) справедливо при малых значениях m , а уравнения (96) — при больших m , то зависимость $c_f = f(m)$ может быть представлена графически для различных Re (рис. 140).

Для расчета индукционных насосов могут быть получены основные уравнения, дающие зависимость между параметрами насоса и электрическими величинами (плотностью тока, напряжением в витке, намагничивающими ампер-витками), а также позволяющие рассчитывать к. п. д. насоса. Соответствующие расчетные зависимости приводятся в упомянутой работе [43]. Там же даются основные уравнения, позволяющие рассчитывать кондукционные насосы постоянного тока с учетом влияния эффекта, аналогичного реакции якоря электрических машин, или с учетом компенсации этого эффекта с помощью компенсационной обмотки. Для расчета кондукционных насосов переменного тока могут быть использованы эти же уравнения, но должно быть учтено влияние

потерь от вихревых токов в металле, а также наведенных токов в компенсационной обмотке и в стенках канала.

Кондукционный насос постоянного тока. На рис. 141 представлена схема кондукционного насоса постоянного тока. Между полюсами электромагнита расположен канал прямоугольного сечения, являющийся участком трубопровода жидкого металла. Ток, подводимый по припаянным к каналу медным шинам, про-

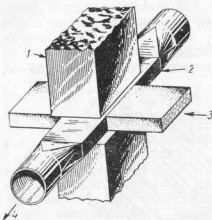


Рис. 141. Схема кондукционного насоса постоянного тока.

1 — полюс магнита; 2 — канал; 3 — медная шина; 4 — поток жидкости.

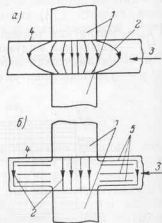


Рис. 142. Распределение линий тока в жидком металле: а — без изоляционных экранов; б — с изоляционными экранами.

1 — медные шины; 2 — линии тока; 3 — поток жидкого металла; 4 — стенка канала; 5 — изоляционные экраны.

ходит через жидкость и частично через стенки канала. Для того чтобы свести к минимуму потери мощности, стенки канала делают возможно более тонкими и из материала с большим электрическим сопротивлением. В жидком металле часть тока проходит в зоне сильного магнитного поля, вызывая осевые движущие жидкость силы, а часть, идущая в обход зоны сильного поля (см. рис. 142, а), в значительной мере теряется для полезной работы насоса. Уменьшение этих потерь может быть достигнуто установкой специальных изоляционных экранов в магнитном поле, удлиняющих путь паразитным токам, подобно тому, как это показано на рис. 142, б.

Анализ уравнений движения металла в магнитном поле насоса показывает, что при постоянной силе тока его производительность и напор связаны между собой линейной зависимостью, что подтверждается экспериментальными характеристиками подобных насосов (см. рис. 148).

Магнитное поле, создаваемое протекающим через жидкость током, искажает основной магнитный поток, а именно, приводит к увеличению его интенсивности на стороне входа и уменьшению

на стороне выхода металла, чем вызывает падение производительности насоса. Для небольших насосов при высокой интенсивности магнитного поля и относительно слабых токах такое снижение производительности не имеет существенного значения. Для насосов же значительной производительности, работающих с токами большой силы и с весьма протяженными полями, необходимо предусмотреть компенсацию неоднородности магнитного поля.

Компенсация достигается двумя способами.

Первый из них состоит в том, что по проводнику, расположенному над или под каналом, пропускается ток в направлении, противоположном направлению тока в жидком металле (рис. 143). Некоторую разновидность этого способа представляет применение двухступенчатых насосов с каналом подковообразной формы. В этом случае поле, создаваемое одной ветвью канала, компенсируется полем другой ветви.

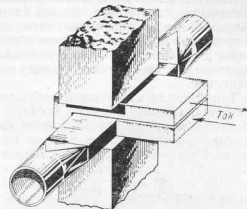


Рис. 143. Компенсация неоднородности магнитного поля с помощью изменения направления тока.

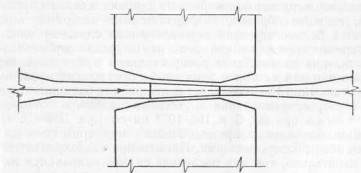


Рис. 144. Компенсация неоднородности магнитного поля с помощью изменения формы зазора между полюсами магнита.

Второй способ состоит в обеспечении клиновидной формы зазора между полюсами, так чтобы магнитный зазор был шире у входа в канал (рис. 144). Кроме того, сечение канала делается сужающимся, благодаря чему скорость металла возрастает до такой степени,

пени, что противостоит э. д. с., а следовательно, и плотность тока в зоне магнитного поля, остается постоянной. Недостаток последнего способа состоит в том, что компенсация оказывается полной только при определенных величинах интенсивности тока и поля.

Общей проблемой для всех электромагнитных насосов является обеспечение достаточно низкой температуры электрической обмотки. В данном типе насоса ее температура может быть снижена до требуемой величины удалением обмотки возбуждения на достаточное расстояние от канала с расплавленным металлом, а также созданием тепловой изоляции между каналом и полюсными наконечниками.

Тип используемой обмотки возбуждения электромагнита насоса зависит, главным образом, от эксплуатационных требований. Обмотки независимого возбуждения являются обычно многослойными и имеют высокое рабочее напряжение. В этом случае основной проблемой является охлаждение электрической изоляции обмотки. С другой стороны, серийная обмотка может состоять всего из нескольких медных витков (или только одного витка для крупных насосов) с большим поперечным сечением. Поскольку падение напряжения в такой обмотке обычно не превышает 1 в, проблема электрической изоляции разрешается достаточно просто. Например, насосы с воздушным охлаждением за счет естественной циркуляции воздуха работали без чрезмерного нагрева обмотки при температуре жидкого металла до 430° С, что дало возможность использовать изоляцию с лаковым покрытием.

Канал описываемых насосов изготавливается сварным (из листов металла) или путем обжима тонкостенной круглой трубы до требуемой формы. Толщина стенки канала 0,5—1,5 мм.

Абсолютные размеры поперечного сечения канала обусловлены, главным образом, гидравлическими потерями, которые становятся большими, если сечение канала слишком мало.

Материал стенок канала зависит от рода перекачиваемой жидкости, причем наиболее распространено применение нержавеющей стали для натрия и хромистой стали для висмута. Аустенитная сталь типа 18—8 обладает подходящими величинами удельного электросопротивления в области рабочих температур ($72 \cdot 10^{-6}$ ом·см при 20° С и $108 \cdot 10^{-6}$ ом·см при 500° С). Стали с высоким содержанием хрома обладают примерно теми же значениями электросопротивления. Применение низкохромистых сталей нежелательно, так как последние сильно окисляются на воздухе при высокой температуре, что недопустимо для стенок канала, как правило, весьма тонких.

Желательно, чтобы стенки канала, параллельные поверхностям полюсов насоса, обладали хорошими магнитными свойствами, а стенки, присоединенные к электродам, были бы немагнитными. Нержавеющие стали аустенитного класса немагнитны, в то время, как хромистые стали являются хорошими ферромагнетиками.

Если для трубы применяется магнитная сталь, то стенки, присоединенные к электродам, замыкают часть основного потока и ослабляют поле вблизи электродов, что должно быть учтено при расчете. Благодаря тому, что в насосах обычно применяются большие магнитные потоки, отмеченное ослабление поля невелико.

Медные шины, припаянные к стенкам канала, иногда целесообразно разбить на несколько раздельных участков, что позволяет уменьшить термические напряжения, возникающие вследствие различия тепловых расширений шины и материала канала. Следует учитывать, что материал шин (медь), работающий при высокой температуре, сильно окисляется на воздухе.

При 500° С скорость окисления ~2,5 мм/год. Окисление может быть уменьшено при работе шин в кожухе, заполненном инертным газом.

В насосах постоянного тока можно применять постоянные магниты, но тогда увеличиваются размеры и стоимость агрегата, в связи с чем это выгодно только для небольших насосов.

Насосы постоянного тока требуют для питания ток большой силы (от одного до нескольких тысяч ампер) и низкого напряжения (около 1—2 в). В качестве источников тока таких параметров применяются выпрямители и униполярные генераторы. В настоящее время используются два типа униполярных генераторов: с утопленным коллектором и с дисковым коллектором. В первом из них якорь полностью погружен в жидкий металл; во втором — якорь смачивается металлом только в местах расположения коллекторов. Изготавливаются униполярные генераторы, дающие ток до 100 тыс. а с к. п. д. 80%.

На рис. 145 показан небольшой кондукционный насос постоянного тока [171], результаты его испытаний приведены на рис. 146.

Спроектирован и испытан крупный насос постоянного тока производительностью $115 \text{ м}^3/\text{час}$ и давлением $1,65 \text{ атм}$, предназначенный для перекачивания сплава Na—K в контуре ядерного реактора. Канал насоса представляет никромовую трубу конической формы со средним размером поперечного сечения $38 \times 83 \text{ мм}$ при толщине стенки 0,64 мм. Полюса магнита имеют ширину 102 мм и длину 380 мм; ширина магнитного зазора изменяется от 4,7 мм у входа до 3,8 мм у выхода.

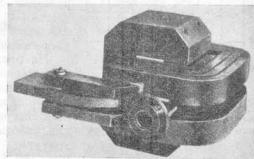


Рис. 145. Небольшой кондукционный насос постоянного тока.

Обмотка возбуждения состоит из двух медных витков сечением 152×152 мм и соединена последовательно с шинами, подводящими ток к жидкому металлу.

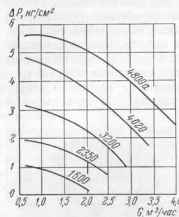


Рис. 146. Результаты испытаний кондукционного насоса постоянного тока, изображенного на рис. 145.

расход жидкого металла, равный $2250 \text{ м}^3/\text{час}$ при напоре $5,3 \text{ кг/см}^2$. Он потребляет $250\,000 \text{ а}$ при напряжении $2,5 \text{ в}$. Сечение канала для прохода жидкости между полюсами магнита 150×450 мм при длине канала 1070 мм и толщине его стенки $1,6$ мм.

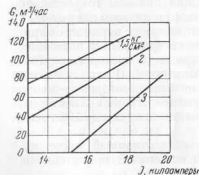


Рис. 147. Зависимость производительности кондукционного насоса постоянного тока от величины потребляемого тока.

Скорость натрия в канале 10 м/сек . Униполярный генератор приводится во вращение электромотором мощностью 1250 л. с.

Насосы постоянного тока успешно применялись для перекачки жидкого металла, имеющего температуру 800°С ; охлаждение

канала и магнит расположены внутри сварного кожуха из нержавеющей стали, служащего для удержания жидкого металла в случае повреждения стенки канала. В конструкции насоса применена слюдяная изоляция канала и сердечника электромагнита без наружного охлаждения. Насос питается от выпрямителя с водяным охлаждением, дающего 20 тыс. а при напряжении 1 в .

На рис. 147 и 148 представлены характеристики насоса при температуре жидкого металла 250°С .

Более крупный насос с униполярным генератором, спроектированный для работы в первичном натриевом контуре реактора, показан на рис. 149 [171]. Насос рассчитан на

расход жидкого металла, равный $2250 \text{ м}^3/\text{час}$ при напоре $5,3 \text{ кг/см}^2$. Он потребляет $250\,000 \text{ а}$ при напряжении $2,5 \text{ в}$. Сечение канала для прохода жидкости между полюсами магнита 150×450 мм при длине канала 1070 мм и толщине его стенки $1,6$ мм.

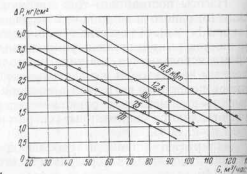


Рис. 148. Характеристики кондукционного насоса постоянного тока.

их происходило только за счет естественной конвекции окружающего воздуха и излучения.

Кондукционный насос переменного тока. Кондукционный насос переменного тока по принципу работы и конструкции аналогичен описанному насосу постоянного тока. Необходимым условием работы насоса является совпадение по фазе тока, создающего магнитный поток, с током, проходящим через жидкий металл. Это условие удовлетворяется путем последовательного соединения обмотки возбуждения и канала насоса.

Данный насос не нуждается в громоздких источниках питания. Для этой цели служит силовой трансформатор, магнитный сердечник которого включен в магнитный контур насоса.

Объединение магнитных цепей трансформатора и насоса может быть выполнено различными способами. Четыре возможных способа показаны на рис. 150. Наибольшее распространение получили насосы, изображенные на рис. 150, а и 150, б. Конструкция, показанная на рис. 150, б, проста в производстве и используется для небольших насосов. Характеристики одного из таких насосов, работающего на ртути при $t = 100^\circ \text{С}$, приведены на рис. 151 и даны в табл. 47. Насос имеет вес $39,5 \text{ кг}$ и габариты $220 \times 229 \times 178 \text{ мм}$.

Общий вид и характеристика кондукционного насоса переменного тока для перекачивания щелочных металлов показаны на рис. 152 и 153.

В кондукционных насосах переменного тока целесообразно применять одновитковую обмотку возбуждения, так как при боль-

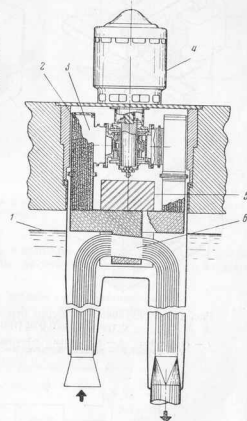


Рис. 149. Крупный кондукционный насос постоянного тока с униполярным генератором.

1 — уровень натрия; 2 — медные шины; 3 — полюс, залитый натрием; 4 — электрогенератор; 5 — магнитный сердечник; 6 — канал насоса.

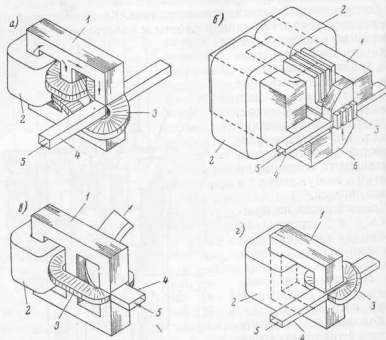


Рис. 150. Кондукционные насосы переменного тока, объединенные с трансформатором (типы а, б, в, г).

1 — сердечник; 2 — первичная обмотка; 3 — вторичная обмотка; 4 — труба; 5 — жидкий металл; 6 — полюсный наконечник.

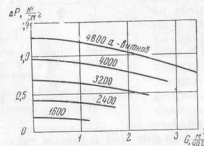


Рис. 151. Характеристики кондукционного насоса переменного тока, работающего на ртути.

шом числе витков увеличиваются габариты насоса и снижается коэффициент мощности. Для уменьшения потока рассеяния

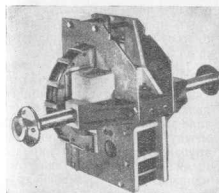


Рис. 152. Общий вид натриевого кондукционного насоса переменного тока.

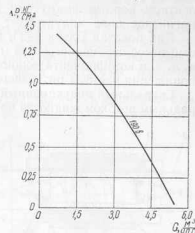


Рис. 153. Характеристика насоса, показанного на рис. 152.

обмотке следует придавать возможно меньшие размеры и располагать ее на минимальном расстоянии от магнитного зазора.

Таблица 47
Конструктивные и рабочие характеристики насоса переменного тока для ртути, объединенного с трансформатором

Наименование характеристики	Величина
Номинальный диаметр трубы, мм	19
Сечение канала, мм ²	8,6 × 24
Толщина стенок канала, мм	0,56
Сечение первичной обмотки, см ²	25,8
Сечение сердечника первичной обмотки, см ²	46,5
Сечение вторичной обмотки, см ²	9,76
Номинальные первичные ампер-витки	4800
Потребляемая мощность, кВт	1,65
Коэффициент мощности	0,32
Максимальный напор, кг/см ²	1,2
Максимальная производительность, м ³ /час	3,2
Максимальный к. п. д., %	6,5

К. п. д. кондукционных насосов переменного тока вследствие значительных потерь мощности не превышает 10—15%, т. е. ниже,

чем у насосов постоянного тока (до 40%). Один из главных источников потерь состоит в том, что в потоке жидкого металла, эквивалентном короткозамкнутому витку трансформатора, переменное магнитное поле индуцирует паразитную э. д. с.

Как показал Блэйк [42], при больших размерах кондукционный насос переменного тока может быть приближен по значениям к. п. д. и коэффициента мощности к насосу постоянного тока путем понижения частоты питающего тока до 5—10 гц.



Рис. 154. Схема спирального индукционного насоса.

1 — многослойная обмотка; 2 — ярмо; 3 — труба; 4 — жидкий металл; 5 — стержень; 6 — направляющие; 7 — медное кольцо.

Трехфазная обмотка служит для создания вращающегося магнитного поля, которое индуцирует в жидкости э. д. с. и вызывает в ней токи, подобные токам ротора индукционного двигателя. Взаимодействие между полем и токами в жидкости заставляет последнюю вращаться вокруг внутренней трубы и, благодаря спиральным перегородкам, перемещаться в осевом направлении. К внутренней стенке канала на входе и выходе припаяны медные кольца, обеспечивающие замкнутую цепь тока. К обжим торцам кольцевой полости примыкают улиткообразные коллекторы для жидкости, связанные соответственно с всасывающим и нагнетательным патрубками насоса.

Поскольку в стенках труб, образующих кольцевой канал насоса, возникают потери на вихревые токи, толщина их должна быть минимальной. Обмотка статора, расположенная непосредственно у внешней стенки канала, защищается от перегрева слоем теплоизоляционного материала, а также за счет принудительного воздушного охлаждения. Условия работы электроизоляции обмоток насосов могут усложниться еще воздействием радиоактивных излучений. Возможно, что полное решение проблемы защиты изоляции как от действия тепла, так и радиации будет найдено путем применения керамических изоляционных материалов.

Спиральные насосы целесообразно применять при сравнительно высоких напорах жидкости (см. табл. 45), а также когда от конструкции требуется максимальная компактность. Высокий перепад давлений в насосе достигается за счет выбора малого угла подъема спиральных перегородок с тем, чтобы перекачиваемая жидкость многократно подвергалась воздействию каждого из полюсов.

Натриевые насосы этого типа были построены на напор до $7,5 \text{ кг/см}^2$.

На рис. 155 и 156 приводятся характеристики одного из спиральных индукционных насосов, имеющих производительность

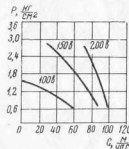


Рис. 155. Характеристики спирального индукционного насоса на натрии.

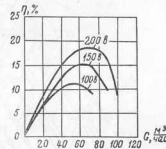


Рис. 156. К. п. д. спирального индукционного насоса на натрии в зависимости от производительности.

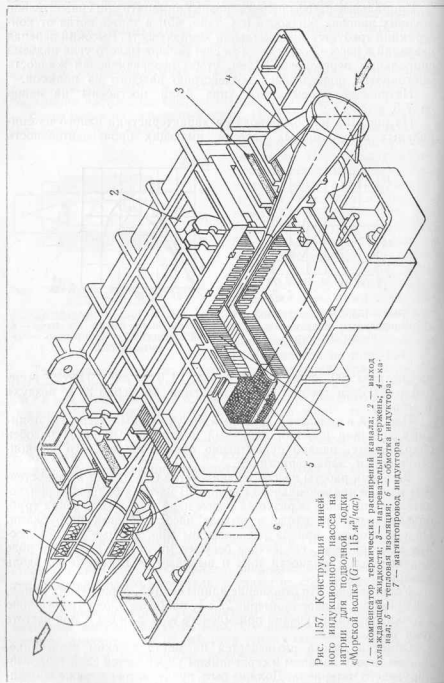
по натрию $90 \text{ м}^3/\text{час}$ при напоре $1,5 \text{ кг/см}^2$. Насос весит около 700 кг и требует для охлаждения примерно 30 м^3 воздуха в минуту.

Плоский и кольцевой линейный индукционный насос. По принципу действия плоский линейный индукционный насос подобен спиральному, однако существенно отличается от него по конструкции и характеристикам.

Во время работы насоса жидкий металл протекает в тонкостенном канале прямоугольного сечения. В насосах большой производительности канал образуется рядом параллельных плоских труб, объединяемых на входе и выходе насоса общими патрубками. По обе стороны канала расположены многофазные многополюсные обмотки тока, создающие бегущее магнитное поле. Это поле индуцирует в жидкости токи и вызывает ее перемещение вдоль канала.

Установлено, что отношение длины секций, образующих канал, к их ширине, равное примерно $25 : 1$, наиболее удовлетворительно с точки зрения получения приемлемого к. п. д. и $\cos \varphi$ при частоте тока 60 периодов.

Обмотка насоса размещается на металлическом сердечнике, причём между каналом и сердечником укрепляется слой теплоизолирующего материала. Должна быть предусмотрена также компен-



сация разности тепловых расширений канала и внешнего кожуха насоса. Для поддержания надлежащей температуры обмотки предусматривается воздушное или водяное охлаждение кожуха.

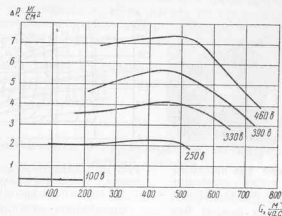


Рис. 158. Характеристики линейного индукционного насоса на натрии.

На рис. 157 показана конструкция одного из подобных насосов (для подводной лодки «Морской волк»), а на рис. 158 и 159 приведены характеристики линейного насоса.

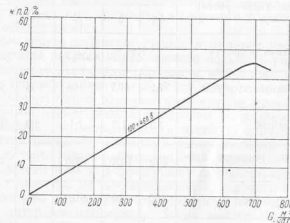


Рис. 159. Зависимость к. п. д. от производительности для линейного индукционного насоса на натрии.

Индукционные насосы этого типа целесообразно применять в тех случаях, когда основную роль играют уменьшение расхода энергии на перекачку и габариты насоса. К. п. д. крупных насосов достигает 45% при $\cos \varphi = 0,42$. Плоские линейные насосы детально

разработаны в нескольких типоразмерах и некоторые из них длительно работали при температуре жидкого металла 400—450° С.

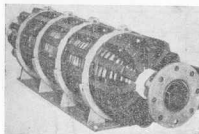


Рис. 160. Общий вид линейного индукционного насоса с кольцевым зазором (кожух насоса снят).

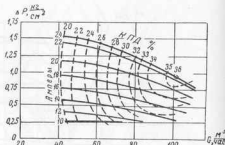


Рис. 161. Характеристики линейного насоса с кольцевым зазором, показанного на рис. 160.

В табл. 48 приведены некоторые сведения о линейных индукционных насосах фирмы «Инглиш Электрик».

Таблица 48

Технические данные линейных индукционных насосов фирмы «Инглиш Электрик»

Наименование характеристик	Номер насоса					
	1A	6	10	10	15	20
Перекачиваемая жидкость	Na	Na — K (30%K)			Na	
Производительность, м³/час	7,2	40,7	108	108	270	685
Давление, кг/см²	1,5	1,2	1,1	2,0	2,15	2,1
Общая длина (включая диффузор), мм	510	1020	1360	—	2080	2280
Общая высота, мм	150	305	510	—	610	610
Общая ширина, мм	150	405	760	—	1090	1220
Диаметр выходного отверстия диффузора, мм	25	51	102	—	152	213
Вес, кг	365	2500	6800	—	12500	16000

В последнее время большое внимание уделяется линейным индукционным насосам с кольцевым зазором для движения жидкого металла. Придание стенкам канала цилиндрической формы несколько увеличивает к. п. д. насоса по сравнению с плоским зазором за счет снижения концевых потерь в зазоре и позволяет иметь незначительную толщину стенок канала при достаточной их прочности.

Общий вид одного из линейных насосов с кольцевым зазором и его характеристики (на сплыве натрий — калий) показаны на рис. 160 и 161 [171].

37. Теплообменники и парогенераторы на натрии и сплаве натрий — калий

Жидкие металлы, обладающие благоприятными теплопередающими и ядерными свойствами, высокой точкой кипения и устойчивостью при высоких температурах, являются перспективными теплоносителями для систем охлаждения ядерных реакторов. Для реакторов на быстрых нейтронах жидкие металлы являются единственным возможным охладителем.

Использование жидких металлов в качестве теплоносителей позволяет работать при высокой температуре без значительных давлений, что дает возможность получения относительно высокого к. п. д. установки при сравнительно простом и дешевом теплообменном оборудовании.

Теплообменники на литии, свинце и сплавах свинец — висмут не получили до настоящего времени большого распространения и применялись главным образом в небольших экспериментальных установках. Значительный опыт проектирования, изготовления и эксплуатации накоплен по экспериментальным и полупромышленным теплообменным аппаратам на натрии и сплавах натрий — калий. Эти металлы имеют высокую теплопроводность, низкую точку плавления, высокую точку кипения и хорошую термическую устойчивость. Очищенные от примесей Na и сплав Na — K обладают низкой коррозионной активностью: низкоуглеродистые, хромистые и хромоникелевые нержавеющие стали, никель, инконель и цирконий коррозионноустойчивы в их среде в рабочем интервале температур. Из-за малого удельного веса и малой вязкости этих металлов на их перекачивание расходуются незначительные мощности (примерно такие же, как для перекачивания воды). Благодаря низкому электрическому сопротивлению циркуляция натрия и сплавов Na — K в системах успешно осуществляется электромагнитными насосами, работающими на этих металлах с относительно высокими к. п. д.

Недостатком Na и сплавов Na — K является сравнительно низкая теплоемкость, в связи с чем для отвода тепла при одина-

ковых температурных перепадах требуется расход металла больший, чем воды.

При проектировании теплообменников и парогенераторов на натрий и сплавы Na—K необходимо также учитывать ряд специфических требований:

1. Обеспечение полной герметичности аппарата. Должна быть исключена возможность утечки жидкого металла, иногда радиоактивного, а также соединения его с водой или воздухом. Реакция щелочных металлов с водой сопровождается выделением газообразного водорода и большого количества тепла и может привести к аварии установки. При соединении с воздухом расплавленный металл легко воспламеняется, что представляет опасность для обслуживающего персонала. Кроме того, исследованиями установлено резкое повышение коррозионной активности щелочных металлов при загрязнении их кислородом и образовании малорастворимых окислов.

Эти окислы представляют также опасность в смысле закупорки трубопроводов, в первую очередь на относительно холодных участках.

В связи с требованием высокой эксплуатационной надежности получили распространение конструкции с двумя трактами рабочих жидкостей, изолируемых третьей жидкостью — прослойкой, не вступающей в реакцию с рабочими жидкостями. Введение прослойки сильно увеличивает общее термическое сопротивление переносу тепла в аппарате. В промежуточных теплообменниках, устанавливаемых между ядерным реактором и парогенератором, в качестве такой третьей жидкости применяется натрий; в парогенераторах прослойкой между жидкометаллическим и пароводяным трактами служит обычно ртуть. Появление течи в одном из трактов фиксируется по изменению давления в прослойке, в связи с чем устанавливается постоянный контроль давления в полости прослойки.

Для достижения высокой плотности конструкции все соединения рекомендуется выполнять сварными, в том числе и присоединение труб к трубным доскам. Дополнительно к обычным методам контроля сварных соединений используются рентгено- и гамма-скопия, испытание на плотность с помощью гелиевого течеискателя и ультразвуковая дефектоскопия.

2. Обеспечение высокой степени чистоты системы. Все внутренние поверхности теплообменника должны быть тщательно очищены от грязи и жиров, для чего готовый аппарат подвергается обезжириванию (дихлорэтаном или другим растворителем жиров), промывке, просушке и заполнению инертным газом (аргоном, азотом или гелием). Должен быть обеспечен полный слив металла, а также исключено образование газовых карманов при заполнении теплообменника. Обеспечение чистоты теплообменника в процессе эксплуатации достигается средствами, являющимися общими для всей системы.

3. Обеспечение предварительного обогрева натриевого тракта теплообменника. Во избежание опасности, связанной с закупоркой каналов, до начала циркуляции должен быть осуществлен равномерный прогрев теплообменника до температуры, превышающей 98° С. Для этой цели теплообменники снабжаются системой электрического или парового обогрева различной конструкции.

При проектировании теплообменников необходимо обращать особое внимание на компенсацию термических расширений.

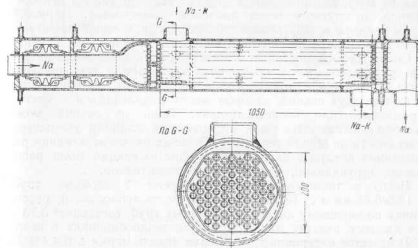


Рис. 162. Теплообменник натрий — сплав Na—K с двойными трубами.

Ряд ценных выводов относительно работоспособности конструкций в условиях термических напряжений был накоплен при эксплуатации теплообменников.

В том случае, когда пароводяной и натриевый тракты парогенератора не отделены друг от друга стенками, между которыми залита третья жидкость, желательно, чтобы контур жидкого металла был способен выдерживать максимальное давление пароводяного контура. Во избежание резкого подъема давления натриевый контур должен снабжаться предохранительным клапаном большого сечения. Повышение давления в системе при проникновении в нее воды может сопровождаться резкими местными повышениями температуры. Поэтому важно оборудовать установку автоматическими устройствами, которые отсекали бы в случае аварии теплообменник от остального контура и быстро прекращали подачу воды в систему.

Ниже дается описание некоторых конструкций теплообменников и парогенераторов, теплоносителями в которых являются натрий и сплав Na—K.

Теплообменники. На рис. 162 показан противоточный однокходовой кожухотрубчатый теплообменник, в котором тепло передается от охлаждающего реактор натрия к сплаву Na — К. В теплообменнике применена система двойных concentрично расположенных труб и двойных трубных досок. По внутренним трубам протекает натрий, кольцевой зазор между трубами заполнен неподвижным натрием (прослойка), а в межтрубном пространстве циркулирует сплав Na — К. Перегородок в межтрубном пространстве нет. Внутренние трубы вварены в наружные трубные доски, одна из которых приварена к кожуху теплообменника непосредственно, а другая — через линзовый компенсатор. Наружные трубы вварены во внутренние трубные доски, у одной из которых также расположен линзовый компенсатор тепловых расширений.

Сплав Na — К поступает в теплообменник через шесть патрубков, расположенных у «холодного» его торца и выходит через шесть патрубков с противоположной стороны. Теплообменник состоит из двух секций, которые могут подключаться к системе параллельно или последовательно. Одна из секций может полностью отключаться для исследования влияния уменьшения поверхности на общий теплосъем. В целях изучения влияния расположения аппарата на его работу одна из секций была расположена вертикально, а другая — горизонтально.

Всего в теплообменнике установлено 72 двойных трубы $\varnothing 12,5/0,85$ мм и $\varnothing 16/1,0$ мм. Поверхность теплоотдачи, рассчитанная по внешнему диаметру наружных труб, составляет $3,73 \text{ м}^2$ для каждого участка или $7,46 \text{ м}^2$ для теплообменника в целом.

В качестве материала труб выбран никель марки L (99,4% Ni, 0,1% Cu, 0,15% Fe, 0,2% Mn, 0,05% Si, 0,02% макс. C), имеющий высокую теплопроводность. Все остальные детали теплообменника изготовлены из нержавеющей стали типа 347.

Расход натрия через теплообменник составляет $46,2 \text{ т/час}$, а сплава Na — К — $47,0 \text{ т/час}$, температура натрия на входе 510°С , температура сплава Na — К на выходе 482°С . При этих расходах общий коэффициент теплопередачи составляет $4880 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}^\circ \text{С}$, а теплосъем — $930\,000 \text{ ккал/час}$.

Преимущество рассмотренной конструкции состоит в сравнительно небольшом гидравлическом сопротивлении кожуха теплообменника.

Недостатком конструкции является недоступность для осмотра и ремонта внутренних трубных досок, а также значительное термическое сопротивление системы двойных труб.

На рис. 163 и 164 показан противоточный однокходовой теплообменник натрий — сплав Na — К с плоскими Г-образными трубами. Теплообменник предназначен для тех же целей, что и предыдущий и рассчитан на те же параметры теплоносителей.

Натрий и сплав Na — К протекают по различным чередующимся пучкам труб, входя с торца теплообменника и выходя сбоку. Пространство между трубами заполняется натриевой

прослойкой. Применение изогнутых труб позволяет обходиться без специальных компенсаторов теплового расширения.

В конструкции используются сплюснутые трубы, имеющие цилиндрическую форму на участках подсоединения к трубным доскам. Плоские трубы были получены путем обжима труб $\varnothing 19/0,9$ мм до размеров 26×6 мм. Такие размеры сечения трубы были определены как оптимальные с точки зрения получения

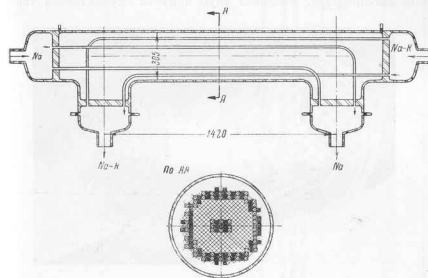


Рис. 163. Теплообменник натрий — сплав Na — К с плоскими Г-образными трубами.

наибольшей теплопередающей поверхности при сохранении приемлемого гидравлического сопротивления.

В теплообменнике установлено 170 труб, из них по 86 протекает сплав Na — К, а по 84 — натрий. Эффективная поверхность теплообмена, рассчитанная по наружной поверхности труб, составляет $5,55 \text{ м}^2$. Коэффициент теплопередачи на расчетном режиме $9750 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}^\circ \text{С}$, теплосъем равен $1,01 \cdot 10^6 \text{ ккал/час}$.

Теплообменник цельносварной, вварка труб из никеля марки L в трубные доски велась в защитной атмосфере гелия.

Преимущества данной конструкции состоят в сравнительно небольшом гидравлическом сопротивлении для обоих теплоносителей, высоком общем коэффициенте теплопередачи и доступности трубных досок для ремонта.

Недостатком конструкции являются большие габариты теплообменника и высокая стоимость изготовления. Изготовление может быть значительно удешевлено путем применения круглых труб,

однако при этом значительно возрастают габариты и падает коэффициент теплопередачи.

На рис. 165 изображен противоточный однокходовый теплообменник сплав Na — К — натрий кожухотрубчатого типа без промежуточного заполнителя (прослойки). Греющей средой является сплав Na — К, который течет сверху вниз внутри 35 труб $\varnothing 9,5/0,6$ мм. Натрий течет внутри кожуха в межтрубном пространстве. Разбивка труб в пучке осуществлена таким

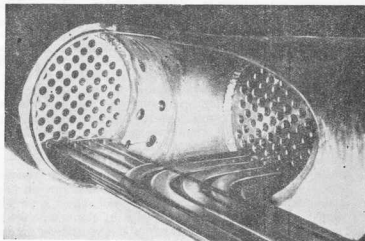


Рис. 164. Разводка пучка плоских труб теплообменника, изображенного на рис. 163.

образом, что центры окружностей, образованных их поперечными сечениями, располагаются в вершинах равносторонних треугольников с длиной стороны 15 мм.

Нижняя трубная доска присоединена к кожуху через линзовый компенсатор. Выходной патрубок сплава Na — К соединен с кожухом посредством защитной обоймы, предотвращающей вытекание натрия в атмосферу в случае повреждения линзового компенсатора. Для обеспечения необходимой жесткости конструкции теплообменник снабжен четырьмя перегородками, которые поддерживают трубный пучок. Перегородки выполнены в виде сегментов, связанных двумя стяжками. Между трубами и отверстиями в перегородках имеется зазор 0,4 мм, достаточный, чтобы при расчете можно было считать межтрубное пространство лишенным перегородок. Трубы завальцованы в трубных досках и заварены в атмосфере инертного газа. В теплообменнике предусмотрены соответствующие дренажные и вентиляционные линии для обеспечения полной эвакуации газа при загрузке и полного слива

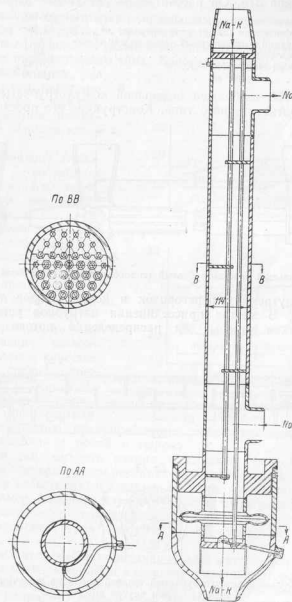


Рис. 165. Теплообменник натрий — сплав Na — К с перегородками в кожухе.

металла после работы. Теплообменник изготовлен из нержавеющей стали типа 316. Он рассчитан на следующие данные:

Общий теплосъем, ккал/час	925 000
Эффективная поверхность нагрева, м^2	1,45
Средний температурный напор между теплоносителями, $^{\circ}\text{C}$	40
Объем сплава Na—K, м^3	0,0142
« натрия, м^3	0,0099

На рис. 166 изображен небольшой кожухотрубчатый теплообменник противоточного типа. Конструкция его проста; кожух

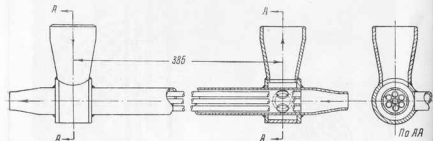


Рис. 166. Небольшой кожухотрубчатый теплообменник на щелочных металлах.

не имеет внутренних перегородок и компенсаторов теплового расширения. В местах присоединения патрубков установлены цилиндрические камеры для распределения потока жидкого металла.

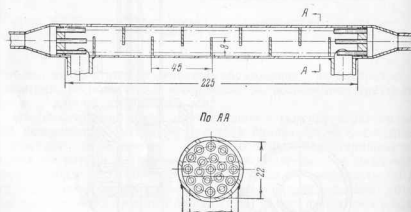


Рис. 167. Небольшой кожухотрубчатый теплообменник на щелочных металлах с перегородками внутри кожуха.

Кожухом служит труба из нержавеющей стали типа 304, имеющая наружный диаметр 284 мм; материалом семи труб теплообменника $\varnothing 60/9$ является также сталь типа 304.

Теплообменник имеет коэффициент теплопередачи порядка $10\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^{\circ}\text{C}$, при общем тепловом потоке $25\,000 \text{ ккал/час}$. Он обладает сравнительно небольшим гидравлическим сопротивлением межтрубного пространства.

На рис. 167 показан также небольшой кожухотрубчатый теплообменник противоточного типа. Конструкция его аналогична рассмотренной выше, за исключением перегородок внутри кожуха. Теплообменник изготовлен из нержавеющей стали.

Коэффициент теплопередачи составляет $\sim 12\,000 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^{\circ}\text{C}$ при общем теплосъеме $\sim 25\,000 \text{ ккал/час}$.

Теплообменник характеризуется высоким коэффициентом теплоотдачи в межтрубном пространстве.

Парогенераторы.

Особенности конструкций парогенераторов, использующих щелочные металлы в качестве греющей среды, определяются, в основном, высокой рабочей температурой теплоносителя и необходимостью предупреждения соприкосновения расплавленного металла с водой и паром.

Низкая теплоемкость натрия и сплавов Na—K приводит к большим температурным перепадам в теплообменниках. Разности температур воды (пара) и жидкого металла обычно также велики, как, например, можно видеть из рис. 168 а, б, где показано распределение температур теплоносителей вдоль поверхности теплообмена в парогенераторах на Na и Na—K тепловой мощностью 1000 кВт .

В связи с этим выбор конструктивных материалов и проблема термических напряжений в элементах парогенераторов приобретают первостепенное значение. Одной из серьезных проблем является, например, компенсация расширений, вызываемых различным удлинением труб и кожуха парогенератора.

На рис. 169 показан парогенератор производительностью $3 \text{ м}^3/\text{час}$ при давлении $33,7 \text{ атм}$ и температуре насыщенного пара 260°C с естественной циркуляцией в пароводяном контуре. Паро-

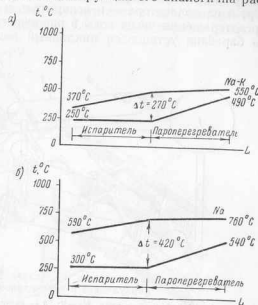


Рис. 168. Распределение температур вдоль поверхности нагрева в парогенераторах на натрий и сплаве натрий — калий тепловой мощностью 1000 кВт .

генератор состоит из двух испарителей, пароперегревателя и барабана. В качестве греющей среды применен сплав Na—K, который поступает в пароперегреватель при температуре 482°C и давлении $3,4 \text{ атм}$ и затем по параллельным трубопроводам — в испарители, которые покидает с температурой 326°C . Вода поступает в барабан, откуда через две опускные трубы — в общий коллектор, а из коллектора — в испаритель и обратно в барабан. Для предотвращения уноса воды в пароперегреватель на выходе пара из барабана установлен циклонный водоотделитель.

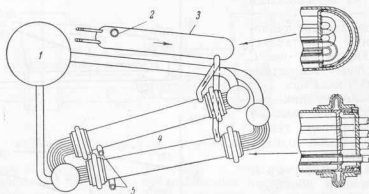


Рис. 169. Парогенератор на сплаве Na—K с естественной циркуляцией в пароводяном контуре.

1 — барабан; 2 — вход Na—K; 3 — пароперегреватель; 4 — испарители; 5 — выход Na—K.

В целях предотвращения возможности контакта сплава Na—K с водой и паром принята конструкция из концентрических труб. Кольцевое пространство между трубами заполнено ртутью. Давление в прослойке между трубами поддерживается равным от 13,6 до 17 атм с помощью подушки из инертного газа (гелия). Сплав Na—K протекает в межтрубном пространстве пароперегревателя и испарителя, омывая в продольном направлении поверхность наружных труб. Пароперегреватель представляет собой многоходовый (со стороны пара) кожухотрубчатый теплообменник, испарители — кожухотрубчатые противоточные теплообменники.

Компенсация теплового расширения труб пароперегревателя достигается при помощи устройства типа «плавающей головки» в испарителях для этой цели используются линзовые компенсаторы, соединяющие внутреннюю трубную доску с кожухом.

В парогенераторе применены наружные трубы $\varnothing 45/2,5 \text{ мм}$ из стали марки SA213T19 и внутренние трубы $\varnothing 38/3 \text{ мм}$ из стали марки SA280.

На рис. 170 показан парогенератор с принудительной циркуляцией в пароводяном контуре. Он предназначен для той же установки и работает на тех же параметрах, что и предыдущий.

Парогенератор имеет два барабана, два испарителя и пароперегреватель. Жидкометаллический тракт снабжен вентилями, позволяющими пропускать сплав Na—K через испарители последовательно или параллельно. Испарители и пароперегреватель изготовлены в виде многоходовых (для воды и пара) и однохо-

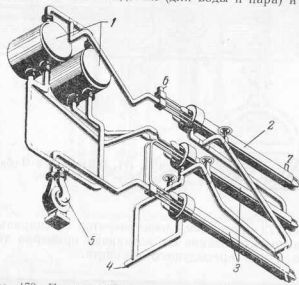


Рис. 170. Парогенератор на сплаве Na—K с принудительной циркуляцией в пароводяном контуре.

1 — барабаны; 2 — пароперегреватели; 3 — испарители; 4 — выход Na—K; 5 — вход Na—K; 6 — выход пара; 7 — вход Na—K.

вых (для сплава Na—K) теплообменников. Сплав протекает в межтрубном пространстве, омывая поверхность наружных труб. Для предотвращения возможности контакта сплава Na—K с водой кольцевой зазор между трубами заполнен ртутью.

Тепловое расширение труб компенсируется за счет свободного перемещения трубной доски испарителя в кожухе. Испарители и пароперегреватель идентичны по конструкции. Наружные трубы $\varnothing 45/2,5$ изготовлены из стали марки SA213T11, а внутренние трубы $\varnothing 38/3$ из стали марки SA213T19.

На рис. 171 изображен испаритель, в котором компенсация теплового расширения достигается применением U-образных труб. Однако значительная разность температур горячей и холодной ветвей труб может привести к появлению термических напряжений в трубной доске такого испарителя.

В изображенном на рис. 172 парогенераторе компенсация достигается за счет применения изогнутых труб. В местах присое-

динения труб к трубным доскам возникают значительные напряжения, тем не менее парогенератор такой конструкции проработал без повреждений в течение 1000 часов.

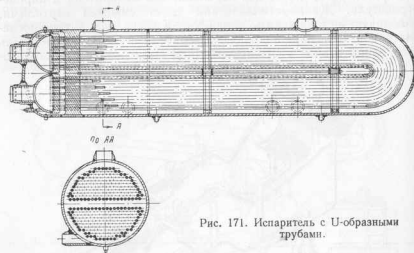


Рис. 171. Испаритель с U-образными трубами.

На рис. 173 представлен парогенератор со спиральными трубами. При проектировании его возникают примерно те же проблемы, что и для предыдущего варианта.

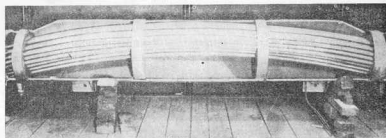


Рис. 172. Парогенератор с изогнутыми трубами.

Проблема компенсации теплового расширения может быть также решена применением конструкции «труба в трубе» (рис. 174). В этом случае одна из трубных досок должна воспринимать значительные деформации. Сложность проектирования заключается также и в том, что внешняя труба должна иметь достаточно большой диаметр для обеспечения приемлемой скорости течения жидкого металла в кольцевом зазоре.

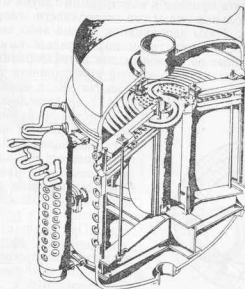


Рис. 173. Парогенератор со спиральными трубами.

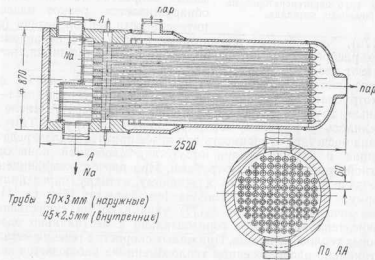


Рис. 174. Использование конструкции «труба в трубе» для пароперегревателя на натрии.

Необходимость надежного отделения тракта щелочного металла от парового тракта привели к конструкции с двумя стенками труб, имеющих продольные пазы на поверхности соприкосновения труб (рис. 175). Пазы заполняются какой-либо химически нейтральной жидкостью или газом под определенным давлением.

Опытные данные по теплопередаче в теплообменниках и парогенераторах. Результаты измерений коэффициента теплопередачи в теплообменнике натрий — сплав Na—K с плоскими никелевыми трубами (см. рис. 163 и 164) [47] представлены на рис. 176.

В качестве определяющего размера при расчете числа Re принят эквивалентный гидравлический диаметр канала, образованного сечением плоской трубы. Там же показана схема относительного расположения труб теплообменника и их основные размеры. При расчете коэффициента теплопередачи эффективная поверхность теплообмена определялась проекцией внутренней поверхности труб с греющей средой (натрием) на трубы с нагреваемой средой (сплавом). При малых скоростях течения сплава обнаруживается резкое падение интенсивности теплопередачи (см.

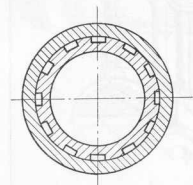


Рис. 175. Пазы на поверхностях двойных труб парогенераторов на щелочных металлах.

рис. 176), что объясняется авторами работы [47] неравномерностью распределения потока по трубкам теплообменника, которые имеют неодинаковую длину.

Зависимости коэффициента теплопередачи от числа Re для кожухотрубчатого теплообменника натрий — сплав Na—K с двойными трубами (см. рис. 162) приведены на рис. 177. Число Re определялось по внешнему диаметру наружной трубы. Там же показана расчетная зависимость для коэффициента теплопередачи, найденная в предположении отсутствия свободной конвекции в рутинной прослойке между трубами. При расчете коэффициенты теплоотдачи от стенок труб к жидкому металлу определялись по формуле Мартинелли — Лайона [см. формулу (55), гл. III]. Данные испытаний (см. рис. 177) указывают на существенное различие тепловой работы горизонтально и вертикально расположенных теплообменников. При малых скоростях течения металла в вертикально расположенном теплообменнике наблюдается некоторое повышение интенсивности теплообмена. Оно вызывается, очевидно, влиянием дополнительной подъемной силы, возникающей вследствие изменения температуры жидкости по высоте теплообменника и увеличивающей скорость ее движения в межтрубном пространстве и внутри труб.

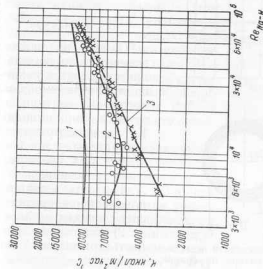


Рис. 177. Коэффициент теплопередачи в теплообменнике натрий — сплав Na—K с двойными трубами.

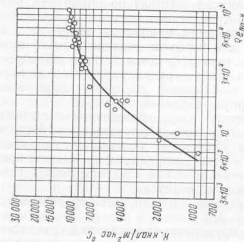
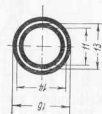


Рис. 176. Коэффициент теплопередачи в теплообменнике натрий — сплав Na—K с плоскими трубами.

Значения коэффициента теплопередачи в испарительном участке парогенератора на сплаве Na—K с двойными трубами (см. рис. 169) приведены на рис. 178.

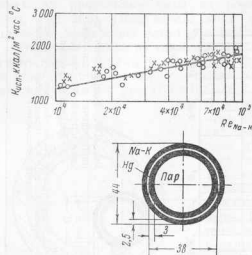


Рис. 178. Коэффициент теплопередачи в испарительном участке парогенератора на сплаве Na—K с двойными трубами.

○ — принудительная циркуляция пароводяной смеси; × — естественная циркуляция пароводяной смеси.

4) нулевая протечка жидкого металла по штоку при работе вентилей в первичном контуре;

5) отсутствие привариваемости клапана к седлу.

В качестве материала для корпусов вентилей можно применять нержавеющую сталь типа 347, которая показала хорошие результаты при испытаниях на интергранулярную коррозию в среде натрия. Для получения необходимой плотности применяются не литые, а кованные корпуса вентилей.

Испытания на термический удар, проведенные с отливками и поковками вентилей из стали типа 347, показали, что благодаря пластической деформации происходит релаксация напряжений даже в том случае, когда местные напряжения превышают предел текучести. Однако при проектировании следует избегать резких изменений в толщине стенок корпуса.

При высоких температурах жидкого металла применяется жаропрочная сталь типа 316.

Для предохранения от приваривания клапанов к седлам желательно размещать вентили в тех местах системы, где температура не превышает 650° С. Седла обычной конструкции, изготовленные из стеллита, удовлетворительно работают в среде натрия при температуре до 950° С, однако не всегда обеспечивают полную герме-

38. Арматура

Одним из важных элементов жидкометаллических систем является арматура — различного рода вентили, задвижки и клапаны. К их конструкции и материалам предъявляется ряд специфических требований:

1) высокая сопротивляемость коррозии в среде жидких металлов;

2) достаточная прочность при высокой температуре;

3) высокая сопротивляемость конструкции по отношению к термическим ударам;

тизацию канала. Когда канал должен быть перекрыт абсолютно надежно, можно применить замораживание металла в нем. Замораживание может производиться при не очень больших сечениях крытия канала; в связи с этим применение данного уплотнения на дренажной линии недопустимо.

Опыты с различными набивочными материалами для сальников штоков вентилей (порошок графита, асбест, свинцовый шлак, порошок металлического никеля и др.) не привели к положительным результатам.

В настоящее время для систем с жидкими металлами удовлетворительными оказались безнабивочные типы уплотнений. Широкое распространение получили уплотнения с помощью сильфонов, а в некоторых ответственных случаях — двойных сильфонов с газовым заполнением полости между ними.

Эффективным оказывается применение вентилей с замораживающимся уплотнением штока. Наружный конец штока окружается полый обоймой, интенсивно охлаждаемой водой. В тонкий кольцевой зазор между штоком и обоймой подается жидкий металл, который, застывая, образует уплотняющую пробку. Так как напряжения среза применяемых для этой цели металлов невелики, затвердевшее кольцо будет легко срезаться у поверхности соприкосновения со штоком при вращении последнего.

Наибольшую опасность для такого уплотнения представляет прекращение циркуляции охлаждающей воды. Однако замороженная пробка сохраняется в течение минуты и более, т. е. имеется достаточно времени для пуска вспомогательной системы охлаждения. Срок службы замораживающегося уплотнения неограничен, если уплотняющий металл свободен от посторонних твердых частиц, оказывающих абразивное действие на поверхность.

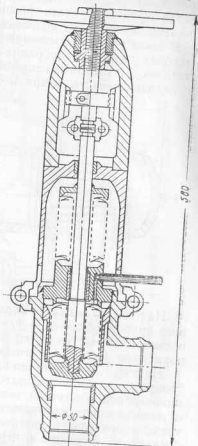


Рис. 179. Запорный вентиль $d_v = 50$ мм с двумя сильфонами.

На рис. 179 изображен запорный вентиль $d_y = 50$ мм с двумя сильфонами. Так как гармоничные мембраны (сильфоны) имеют сравнительно малую частоту собственных колебаний, при их применении появляется опасность возникновения резонансных колебаний большой амплитуды. При проектировании рекомендуется предусматривать разницу между частотой импульсов и собственной частотой колебаний мембраны не менее 15%.

В зонах резкого изменения направления потока и при больших расходах возможна вибрация сильфонов. Такое явление может иметь место в запорных вентилях, в связи с чем сильфоны защищают от гидравлического удара соответствующими щитками.

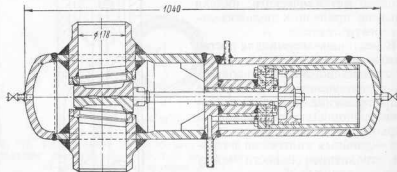


Рис. 180. Задвижка натриевого трубопровода $d_y = 178$ мм.

На рис. 180 показана управляемая от поршня задвижка натриевого трубопровода $d_y = 178$ мм. Поскольку рабочей жидкостью в данном случае является перекачиваемая среда, протечки через поршневое кольцо не имеют существенного значения.

На рис. 181 схематично изображен вентиль со встроенным электроприводом. Обмотка статора отделена от ротора стальной или никелевой оболочкой толщиной 1,6 мм. Управление вентилем осуществляется переключателем, создающим вращение полюсов трехфазного электродвигателя с индукционной обмоткой. Ротор следует за вращением переключателя в том же направлении и с той же скоростью, одновременно перемещаясь в осевом направлении, что приводит соответственно к открытию или закрытию вентили.

На рис. 182 показан стопорный клапан, устанавливаемый на натриевом трубопроводе $d_y = 76$ мм. Все детали клапана изготовлены из нержавеющей стали типа 316. На посадочные поверхности клапана наварен стеллит. Направляющая втулка корпуса изготовлена из стеллита 21, а поршневое кольцо из стеллита 25. Клапан управляется гидравлически, причем в качестве рабочей среды применяется перекачиваемый натрий.

На рис. 183 показан качающийся питательный клапан для натриевого трубопровода $d = 203$ мм. Клапан закрыт со всех

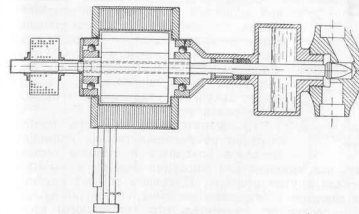


Рис. 181. Вентиль со встроенным электроприводом.

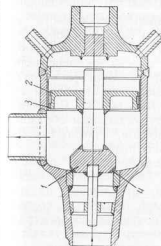


Рис. 182. Стопорный клапан для натриевого трубопровода $d_y = 76$ мм.
1 — клапан; 2 — поршень;
3 — направляющая втулка;
4 — стеллитовые накладки.

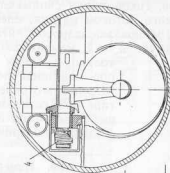


Рис. 183. Качающийся питательный клапан для натриевого трубопровода $d_y = 203$ мм.
1 — проточное; 2 — пружина проточного; 3 — заслонка клапана; 4 — пружина поворотной заслонки.

сторон, поэтому отсутствует проблема уплотнения каких-либо его элементов. Подшипники скольжения защищены от загрязнения, заносимого потоком натрия, специальными перегородками.

На рис. 184 показан шаровый питательный клапан, установленный на трубе $d_y = 3$ мм. Клапан позволяет жидкости течь только в одном направлении и действует под влиянием перепада давлений на нем. Шарик изготовлен из нержавеющей стали типа 440, остальные детали — из нержавеющей стали типа 316. Клапан был успешно испытан на натрии при температуре до 760°C .

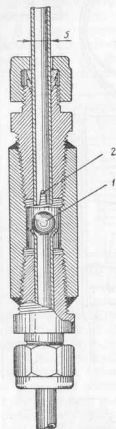


Рис. 184. Шаровый питательный клапан для натриевого трубопровода $d_y = 3$ мм.

1 — шарик $d = 6$ мм;
2 — прорез для прохода натрия при поднятом давлении.

может быть использовано для снижения опасности, вызываемой течью металла внутри прибора. Примером служит прибор для измерения давления в натриевых системах, состоящий из датчика давления и собственно измерительного (вторичного) прибора, регистрирующего давление газа в полости датчика. Если длина

39. Измерительные приборы

Общие положения. Особенности конструкции измерительных приборов для жидкометаллических систем определяются, главным образом, видом теплоносителя и величиной рабочей температуры прибора. Последние в современных установках колеблется в пределах $100-600^\circ\text{C}$. Рабочее давление не влияет существенным образом на конструкцию приборов, поскольку оно обычно сравнительно невелико.

Благодаря специфическим свойствам жидких металлов, в частности, высокой электропроводности, применение их в качестве теплоносителей привело к созданию приборов, ранее почти не распространенных, например, электрических указателей уровня и магнитных расходомеров.

Особенность эксплуатации измерительных приборов в жидкометаллических системах заключается в том, что степень чистоты металла влияет на их работоспособность, так как наличие в металле окислов и прочих загрязнений меняет его свойства, например, электропроводность, и способствует закупорке подводящих и отводящих магистралей приборов.

То обстоятельство, что при комнатной температуре большинство из применяемых металлов находится в твердом состоянии,

подводящей магистрали вторичного прибора достаточно велика, то металл в случае течи внутри магистрали. Проводились специальные опыты по определению длины трубы, обеспечивающей застывание натрия в ней при данных температурных и прочих условиях. Результаты опытов приводятся в табл. 49 и на рис. 185, где показано расстояние, проходимое натрием в неизолированной стальной трубе $d = 6,5$ мм до места его затвердевания, в зависимости от температуры окружающей среды (воздуха). Как показывают опыты, температура металла и его давление не оказывают существенного влияния на величину указанного расстояния.

Наличие относительно холодных зон внутри измерительных приборов нежелательно, так как пары металла могут конденсироваться в этих зонах, вызывая в дальнейшем закупорку внутренних отверстий прибора.

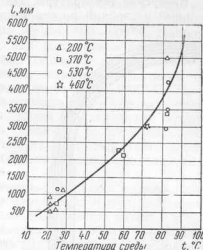


Рис. 185. Затвердевание натрия в стальной трубе при охлаждении естественной конвекцией окружающего воздуха.

Таблица 49
Длина труб, необходимая для застывания текущего через них натрия (в условиях охлаждения естественной конвекцией окружающего воздуха)

Материал трубы	Внутренний диаметр трубы d , мм	Температура натрия t , $^\circ\text{C}$	Давление натрия p , атм	Температура окружающей среды t , $^\circ\text{C}$	Необходимая длина L , м
Медь	6,3	315	7,0	80	2,05
"	6,3	315	7,0	80	2,30
Нержавеющая сталь	6,8	315	7,0	80	>6,10
То же	15,8	295	7,0	80	>18,3
"	15,8	315	7,0	50	7,5
"	15,8	300	7,0	70	8,95
"	15,8	327	7,0	80	11,40
"	4,6	370	8,8	80	3,65
"	15,8	310	7,0	70	7,30
"	15,8	150	7,0	60	5,50
"	15,8	540	7,0	60	7,70
"	15,8	540	7,0	60	7,00
"	4,6	370	8,8	60	2,20

Поэтому следует предусматривать интенсивный и достаточно равномерный обогрев всех его узлов.

Измерение температуры. На рис. 186 показан высокочувствительный и стойкий по отношению к механическим воздействиям

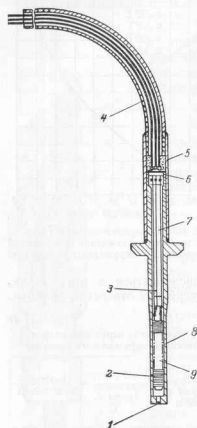


Рис. 186. Платиновый термометр сопротивления, применявшийся для измерения температуры расплавленного натрия.

1 — сваренная пробка; 2 — платиновая проволока; 3 — никелевая проволока; 4 — кабель; 5 — алундовый цемент; 6 — стеклянная пробка; 7 — изолятор; 8 — трубка из нержавеющей стали; 9 — сердечник катушки.

что дает возможность замены проводов термопары. Так как окись магния активно впитывает влагу и благодаря этому теряет свои электроизоляционные свойства, следует предохранять изоляцию от соприкосновения с водой и водяными парами.

платиновый термометр сопротивления, применявшийся для измерения температуры расплавленного натрия. Точность прибора составляет $\pm 0,5^\circ \text{C}$ в области температур до 120°C и $\pm 1,5^\circ \text{C}$ при температурах до 550°C ; его инерционность не превышает 3–4 сек. Минимальная глубина погружения термометра в жидкий металл ~ 50 мм. Градуировка термометра вполне устойчива при температурах до 550°C и не меняется под влиянием радиоактивности жидкого металла. Для измерения температур, больших 550°C , очевидно, пригоден термометр сопротивления с вольфрамовым чувствительным элементом.

В тех случаях, когда размер датчика температуры должен быть возможно меньшим, используются термопары. Термоэлектроды хромель-алюмелевых термопар помещаются обычно в оболочках из нержавеющей стали диаметром 1,5 мм и 3 мм и изолируются порошкообразной окисью магния. Ввод термопар во внутреннюю полость системы производится в относительно холодном ее месте, для того чтобы обеспечить уплотнение ввода затвердевшим металлом. Уплотнение ввода чехла термопары за пределами холодной зоны достигается пайкой. Конец чехла заваривается наглухо, причем горячий спай термоэлектродных проводов после сборки должен свободно выходить из чехла,

Желательно производить индивидуальную градуировку каждой термопары подобной конструкции, так как их показания могут отличаться от стандартной кривой. Инерционность термопар составляет примерно 1,0–1,5 сек.; максимальная погрешность измерения $\pm 2^\circ \text{C}$ при температуре порядка 500 – 600°C . Наибольшая длина изготовленных термопар была равна семи метрам. Температурный предел применения термопар данной конструкции, обусловленной уменьшением сопротивления изоляции при высоких температурах, составляет, вероятно, $\sim 1000^\circ \text{C}$. Термопара с диаметром чехла 1,5 мм использовалась в условиях радиоактивного излучения для измерения температуры натрия, омывающего тепловыделяющий элемент экспериментального ядерного реактора. Хорошая гибкость и прочность термопары позволяют заводить ее в длинные каналы, имеющие большое число изгибов.

Измерение температуры поверхности труб жидкометаллического контура может быть произведено стандартными термопарами, изолированными нитью из стеклянного волокна и прикрепленными к поверхности обычными способами (зачеканкой, с помощью прижимных планок и т. д.). Широко распространение получила приварка термопар к стальной поверхности током разряда батареи конденсаторов. Соответствующее устройство может быть использовано для сварки термоэлектродных проводов и приварки горячего спая термопары к стенке защитного чехла. Привариваемая термопара зажимается либо обыкновенными плоскогубцами с электрически изолированными губками, либо в специальном зажимном приспособлении и подносится к месту сварки. Сварка осуществляется электрической дугой, возникающей между спаем термопары и данным участком поверхности во время разряда конденсаторов.

Измерение давления. Для измерения давления в системах, содержащих сплавы натрия — калий, применялись обычные манометры с чувствительным элементом в виде трубки Бурдона. В нескольких случаях отмечалось закупоривание трубок, что было вызвано, очевидно, недостаточной чистотой жидкого металла. В натриевых системах точное измерение давления трубками Бурдона осуществить затруднительно, так как манометр должен непрерывно подогреваться, а это вносит погрешность в его показания. В случае закупорки трубки застывшим натрием прибор обычно выходит из строя, так как попытка выплавить металл приводит к разрушению трубки или недопустимому изменению ее упругих свойств. Иногда манометры устанавливаются на специальных бачках, заполненных частично жидким металлом и частично — инертным газом (рис. 187). Основным затруднением при эксплуатации манометров с разделительными бачками оказывается конденсация паров металла в верхней, более холодной части бачка и вызванное ею закупоривание подводящей магистрали манометра. Рекомендуется снабжать бачки конденсаторами паров.

металла в виде охлаждаемых труб возможно большего поперечного сечения (см. рис. 187). Бачок должен быть снабжен указателем уровня жидкого металла. Иногда устанавливаются два указателя уровня, электрически связанных с соленоидными клапанами, регулирующими впуск инертного газа в бачок и выпуск его из бачка, что позволяет поддерживать уровень металла в бачке постоянным и предохраняет газовые магистрали и манометр от заброса расплавленного металла.

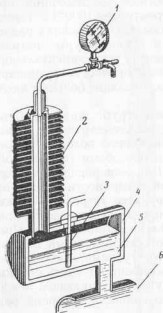


Рис. 187. Манометр с разделительным бачком.

1 — манометр; 2 — конденсатор паров металла; 3 — указатель уровня; 4 — разделительный бачок; 5 — жидкий металл; 6 — трубопровод.

попадания в нее металла при разрыве одной из мембран. Изменения давления в пространстве между мембранами влияют на величину давления, передаваемого в воздушную полость, если площади мембран неодинаковы. Это делает необходимым искусственно поддерживать давление в этом пространстве постоянным. Материалом мембран служит инконель X, материалом корпуса — датчика — инконель. Регулирование предела измерений достигается за счет изменения давления в воздушной полости или при помощи изменения положения сопла (см. рис. 189).

¹ Нулевое положение соответствует равенству давлений с обеих сторон мембраны.

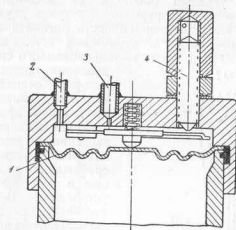


Рис. 188. Датчик давления с одинарной мембраной.

1 — мембрана; 2 — отвод на манометр; 3 — подвод газа; 4 — сопло.

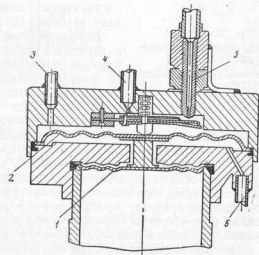


Рис. 189. Датчик давления с двойной мембраной.

1 и 2 — мембраны; 3 — отвод на манометр; 4 — подвод газа; 5 — сопло; 6 — подвод газа в промежуточную полость.

Точность мембранных датчиков давления составляет примерно $\pm 3\%$; их инерционность равна 10—15 сек. Датчики давления описанного типа успешно работали на жидкометаллических (натриевых) установках непрерывно в течение двух лет.

Сравнительно высокая инерционность пневматических датчиков заставляет переходить к электрической системе передачи давления. На рис. 190 дана схема малойнерционного сигнализатора

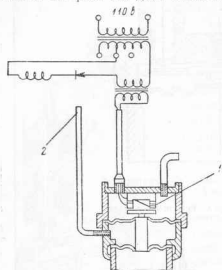


Рис. 190. Схема индукционного сигнализатора давления.

1 — катушка индуктивности; 2 — подвод воздуха.

ности системы; он непосредственно соприкасается с жидким металлом. С помощью стержня из нержавеющей стали нижний сифлон присоединяется к верхнему сифлону, имеющему внутри пружину. Жесткость пружины выбирается достаточно большой по сравнению с жесткостью нижнего сифлона для того, чтобы случайные деформации последнего, а также деформации соединительного стержня, вызванные колебаниями температуры, не отразились на положении сердечника, прикрепленного к верхнему сифлону. Сердечник изготовлен из мягкого железа и играет роль подвижного сердечника трансформатора. Каждая из обмоток трансформатора имеет две катушки, которые наматываются таким образом, чтобы исключить влияние температуры на их общее сопротивление. Так как при изменении давления жидкого металла сердечник перемещается вверх или вниз, напряжение на выходе трансформатора оказывается пропорциональным измеряемому давлению. Верхняя часть прибора защищается от воздействия высокой температуры охлаждением оребренных стоек естествен-

давления, принцип действия которого основан на изменении индуктивности катушки датчика при изменении давления в системе. При повышении давления сверх заданного допустимого уровня срабатывает реле, приводящее в действие сигнальное устройство. В эксплуатационных условиях такой сигнализатор давления показал высокую надежность; отклонение давления, при котором срабатывало реле, от заданного не превышало 0,3—0,4 кг/см^2 . Инерционность сигнализатора составляет не более 0,2 сек.

Индукционный датчик с передачей давления через упругие сифлоны показан на рис. 191. Нижний сифлон обеспечивает герметич-

ной конвекцией окружающего воздуха. В случае разрыва нижнего сифлона металл замерзает в узком кольцевом канале, проходящем вокруг центрального стержня. Если же металл частично вытечет через канал, то он замерзнет в полости верхнего сифлона.

Приборы описанной конструкции применялись для измерения как небольших (до 2 кг/см^2), так и значительных давлений

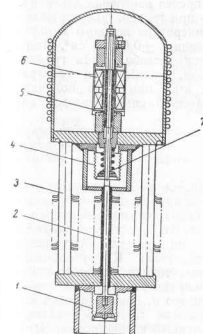


Рис. 191. Индукционный датчик с передачей давления через упругие сифлоны.

1 — нижний сифлон; 2 — стержень; 3 — мембранный сифлон; 4 — оребренная стойка; 5 — корпус; 6 — контактная пружина; 7 — уплотняющая прокладка.

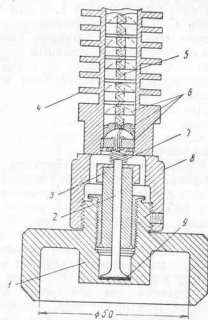


Рис. 192. Емкостный датчик давления.

1 — диафрагма; 2 — стержень; 3 — мембранный сифлон; 4 — оребренная стойка; 5 — корпус; 6 — контактная пружина; 7 — уплотняющая прокладка.

(до 25 кг/см^2) в натриевых контурах. Их инерционность не превышает одной секунды. Испытания приборов показали, что они хорошо выдерживают многократные (до 5000 циклов) повышения давления от нуля до 20 кг/см^2 при температурах порядка 500° С. Зависания нижнего сифлона окисью натрия не происходило. Очевидно, здесь благоприятную роль играет то обстоятельство, что рабочая температура нижней части прибора достаточно высока.

Для измерения давления могут быть использованы датчики емкостного типа. Схематический чертеж емкостного датчика дан на рис. 192. Корпус датчика выточен из инкоеля X. Толщина

диафрагмы, служащей одной из пластин конденсатора переменной емкости, 0,5 мм. Вторая пластина конденсатора удерживается на своем месте с помощью полого цилиндра, изготовленного из металлокерамики и служащего одновременно уплотнением для жидкого металла (в случае нарушения плотности диафрагмы) и электрическим изолятором пластины. Верхняя часть датчика обрешена для улучшения ее охлаждения.

Описанный датчик имеет верхний предел измерения давления, равный 15 кг/см^2 . Он может работать при температуре окружающей среды до $100-150^\circ\text{C}$ и при температуре жидкого металла до 450°C . Точность определения давления $\pm 0,015 \text{ кг/см}^2$. Недостатком емкостных датчиков является нестабильность градуировки, вызываемая, главным образом, колебаниями температуры жидкого металла. В связи с этим они могут получить широкое распространение лишь в качестве сигнализаторов давления.

Датчики электросопротивления, представляющие собой мембранные датчики с прикрепленными к мембране тензодатчиками, оказались менее пригодными для использования, чем датчики указанных выше типов.

Измерение расхода. Наиболее широкое распространение для измерения расхода жидких металлов получили магнитные расходомеры с постоянными магнитами. Такой расходомер представляет собой немагнитный участок трубопровода для жидкого металла, помещенный между полюсами магнита. Материалом участка служит обычно нержавеющая сталь. К трубопроводу в двух диаметрально противоположных точках, расположенных в плоскости, перпендикулярной к направлению силовых линий магнита и к направлению течения жидкости, привариваются или припаиваются два электрода. Вторичным прибором является обычный милливольтметр, присоединенный к электродам. Электродвижущая сила, развиваемая расходомером, пропорциональна скорости течения жидкости.

Расходомеры с постоянными магнитами имеют определенные преимущества перед расходомерами с электромагнитами. При использовании электромагнитов требуется обеспечить отделение сигнала, вызываемого индукцией катушек магнита, от сигнала, вызываемого течением жидкости. Кроме того, электромагниты требуют стабилизации напряжения питания обмоток. Электромагнитные расходомеры целесообразно использовать для измерения расхода жидкостей, обладающих высоким электрическим сопротивлением. В жидкометаллических системах, как правило, применяются расходомеры с постоянными магнитами.

Как показал опыт работы натриевых контуров, эти приборы не выносят дополнительных гидравлических сопротивлений в систему, могут работать в широком диапазоне температур и расходов, обладают высокой чувствительностью и достаточно стабильной градуировкой.

Если не требуется особенно точного определения расхода, магнитный расходомер может устанавливаться без предварительной градуировки. Расчет расходомера производится следующим образом. Развиваемая им электродвижущая сила

$$E = Bvd \cdot 10^{-5}, \quad (97)$$

где E — э. д. с., мв;

B — магнитная индукция в зазоре между полюсами магнита, гауссы;

V — скорость течения жидкости, см/сек;

d — внутренний диаметр трубопровода, см.

В формулу (97) должно быть введено несколько поправочных множителей. Первый из них (K_1) учитывает электрическое сопротивление стенки трубопровода и определяется по формуле:

$$K_1 = \frac{2 \frac{d}{D}}{\left[1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2\right] + \frac{\rho_l}{\rho_w} \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right]}, \quad (98)$$

где $\frac{d}{D}$ — отношение внутреннего и наружного диаметров трубопровода;

$\frac{\rho_l}{\rho_w}$ — отношение удельных электрических сопротивлений жидкости (ρ_l) и материала трубопровода (ρ_w).

Коэффициент K_1 вводится в формулу (97) только при расчете тех расходомеров, трубопроводы которых имеют проводящие стенки.

Поправочный множитель K_2 учитывает неравномерность магнитного поля по длине трубопровода. Значения коэффициента K_2 представлены графически на рис. 193 в зависимости от отношения длины полюсного наконечника магнита¹ к внутреннему диаметру трубопровода.

Наконец, поправочный множитель K_3 учитывает влияние температуры на свойства магнита и на величину зазора между его

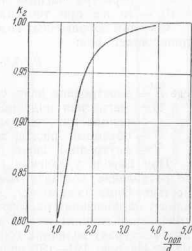


Рис. 193. Поправочный множитель K_2 в формуле (100) для расчета магнитного расходомера.

¹ Под длиной полюсного наконечника понимается его размер вдоль направления течения жидкости. Если наконечник в сечении образует круг, этот размер равен диаметру круга.

полосами. Если температура магнита изменилась от t_1 до t_2 , то коэффициент K_3 может быть найден из выражения:

$$K_3 = \frac{1 - \frac{(B_{t_1} - B_{t_2})(t_m - 25)}{B_{t_1}(t_2 - 25)}}{1 - \frac{b}{a} 12,5 \cdot 10^{-6} (t_m - t_b)}, \quad (99)$$

где a — длина зазора между полюсами магнита, см;
 b — длина основания, на котором крепится магнит, см;
 t_m — температура магнита вблизи его полюсов, °C;
 t_b — температура магнита вблизи его основания, °C;
 B_{t_1} — магнитная индукция в зазоре между полюсами при температуре магнита t_1 , Гс;
 B_{t_2} — то же при температуре t_2 .

С учетом поправочных коэффициентов K_1 , K_2 и K_3 формула (97) приобретает вид:

$$E = 3,6 \cdot 10^{-4} \frac{BG}{d} K_1 K_2 K_3, \quad (100)$$

где E — электродвижущая сила, мВ;
 B — магнитная индукция в зазоре между полюсами, измеренная при температуре 25° C, гауссы;
 G — объемный расход жидкого металла, м³/час;
 d — внутренний диаметр трубопровода, мм.

При выводе уравнения (100) не учитывалось электрическое сопротивление контакта между стенкой трубопровода и жидкостью. Опыт показывает, что наличие сопротивления сильно влияет на показания расходомера. Можно думать, что в условиях смачивания жидким металлом стенки трубопровода (как в натриевых контурах) величина сопротивления контакта пренебрежимо мала. На рис. 194—197 приводятся номограммы и графики для поправочных множителей, позволяющие приблизительно рассчитывать магнитные расходомеры при работе на натрия и сплаве Na—K. Правила пользования этими номограммами таковы же, что и для номограмм, приведенных на рис. 61—64 (гл. III).

Во время эксплуатации расходомера необходимо периодически проверять величину магнитной индукции B , поскольку при высоких температурах индукция постепенно снижается.

Материалы трубопровода и привариваемых к нему электродов должны быть, по возможности, одинаковыми во избежание появления паразитных термоэлектродвижущих сил. Если же приходится применять разнородные материалы, то следует избегать разностей температур между точками приварки электродов.

Измерение расхода жидких металлов производится не только магнитными расходомерами, хотя последние получили наибольшее распространение. Для измерения расхода могут быть использованы обычные сопловые расходомеры, линии отбора давления от которых специально обогриваются. Для измерения перепада

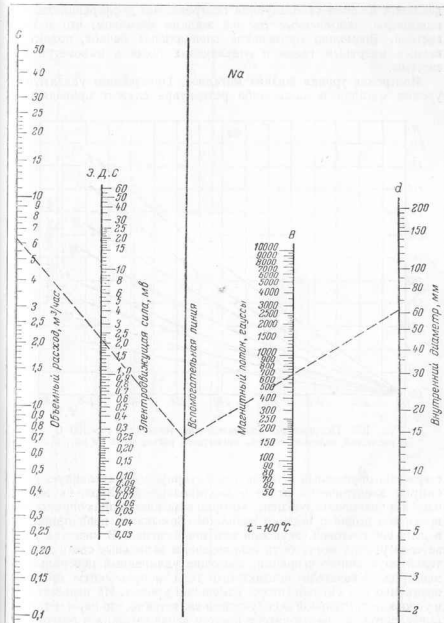


Рис. 194. Расчет электродвижущей силы магнитного расходомера на натрия.

давлений в сопле используются обогреваемые дифференциальные манометры, заполненные тем же жидким металлом, что и вся система. Возможно применение специальных бачков, подпитываемых инертным газом и отделяющих полость манометра от системы.

Измерение уровня жидких металлов. Простейшим указателем уровня металла в каком-либо резервуаре служит проводящий

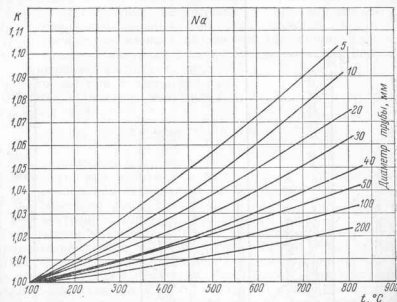


Рис. 195. Справочный множитель для температур $t > 100^\circ\text{C}$ к расчетной величине э. д. с. магнитного расходмера на натрии.

стержень, опущенный в глубь резервуара на определенную глубину и электрически от него изолированный. Стержень включается в низковольтную цепь, которая замыкается при соприкосновении его конца с жидким металлом. Замыкание цепи приводит в действие световой, звуковой или иной сигнал. В качестве указателей уровня могут быть использованы запальные свечи двигателей внутреннего сгорания, имеющие удлиненный центральный электрод. Указатели контактного типа используются преимущественно как сигнализаторы изменения уровня. Их недостатком в условиях длительной эксплуатации является то, что пары металла конденсируются на изоляторе в месте ввода стержня в резервуар (если температура в этом месте относительно низка) и вызывают замыкание цепи. Если же указатель работает при высокой температуре, изоляторы оказываются недостаточно стойкими в парах металла, как показал опыт работы натриевых контуров.

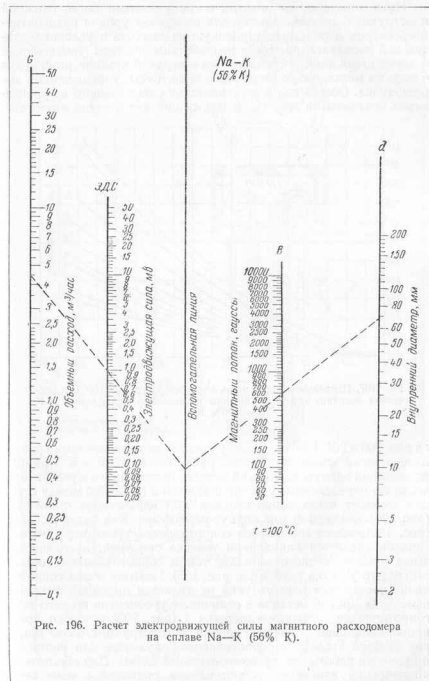


Рис. 196. Расчет электродвижущей силы магнитного расходмера на сплаве Na—K (56% K).

Ниже описываются электрические указатели более сложной конструкции, использованные для измерения уровня радиоактивного натрия и показавшие высокую надежность в условиях длительной эксплуатации. Были разработаны два типа уровнемеров: с двумя стержнями, укрепляемыми в верхней крышке резервуара с жидким металлом; со стержнем в виде трубы, укрепленной в дне резервуара. Общий вид и электрическая схема первого из уровнемеров показаны на рис. 198 и 199, общий вид и схема второго —

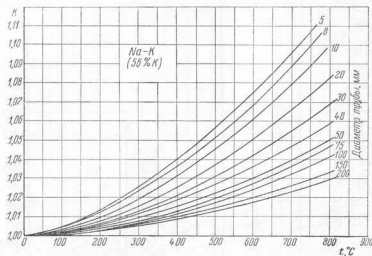


Рис. 197. Поправочный множитель для температур $t > 100^\circ \text{C}$ к расчетной величине ε , д. с. магнитного расходомера на сплаве Na-K (56% K)

на рис. 200 и 201. Разность между предельными значениями уровня, измеряемыми этими приборами, равна около 1000 мм. Принцип их действия одинаков. Жидкий металл, находящийся в резервуаре, замыкает определенные участки стержней 2 (рис. 198) между собой или выводит часть сопротивления цилиндрического стержня 1 (рис. 200), замыкая его на корпус резервуара. Как видно из схемы (рис. 199), общее измеряемое сопротивление уровнемера первого типа определяется как длиной участка стержней, находящегося выше уровня жидкого металла, так и сопротивлением соответствующего участка труб 3 (см. рис. 198). Поэтому общее сопротивление уровнемера первого типа не является линейной функцией изменения уровня металла в отличие от уровнемера второго типа, сопротивление трубчатого стержня 1 (рис. 200) которого прямо пропорционально изменению уровня. В конструкцию обоих приборов введено эталонное сопротивление, служащее для настройки и проверки работы электронизмерительной схемы. Для обеспечения компенсации изменения сопротивления стержней с изменением

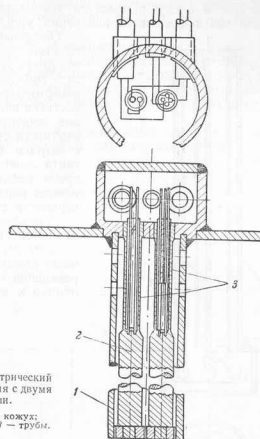


Рис. 198. Электрический указатель уровня с двумя стержнями.

1 — защитный кожух;
2 — стержни; 3 — трубы.

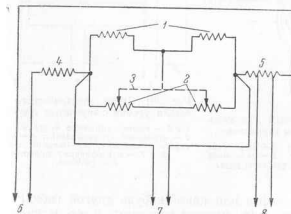


Рис. 199. Схема электрического указателя уровня с двумя стержнями.

1 — сопротивление труб; 2 — сопротивление стержней;
3 — жидкий металл;
4 — компенсационное сопротивление;
5 — эталонное сопротивление;
6 — питание; 7 и 8 — к вторичному прибору.

температуры в схему включается специальное сопротивление. Максимальная погрешность измерения уровня составляет 8%.

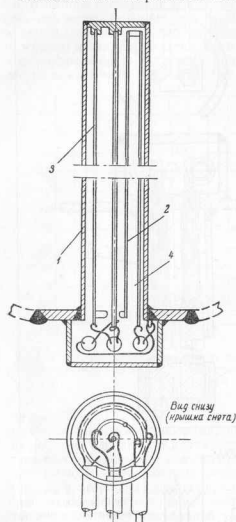


Рис. 200. Электрический указатель уровня с трубчатым стержнем.

1 — трубчатый стержень; 2 — компенсационное сопротивление; 3 — эталонное сопротивление; 4 — минеральная вата.

Основными факторами, вредно влияющими на работу электрических уровнемеров, являются сопротивление контакта измерительного стержня с жидкостью и накопление слоя окислов жидкого металла на поверхности стержня. При работе с натрием сопротивление контакта заметно только в первое время работы, т. е. до наступления полного смачивания поверхности стержня жидкостью.

Для измерения уровня применяются также поплавковые уровнемеры. В этих приборах более сложной конструкции перемещение поплавка передается обычно к вторичному прибору

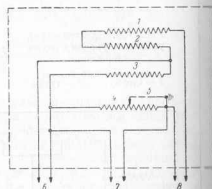


Рис. 201. Схема электрического указателя уровня с трубчатым стержнем.

1 и 2 — компенсационные сопротивления; 3 — эталонное сопротивление; 4 — сопротивление стержня; 5 — жидкий металл; 6 и 7 — к вторичному прибору; 8 — питание.

меры изготавливались на пределы измерений уровня от 300 до 1800 мм и на рабочую температуру до 400° С. Эти приборы имеют следующие недостатки:

1. Показания прибора зависят от плотности жидкости, и, следовательно, изменяются вместе с изменениями ее температуры.

2. Измерение уровня невозможно производить в баках малого объема, так как существует минимально допустимый объем поплавка, величина которого связана с характеристиками гибкого элемента.

Погрешность поплавковых уровнемеров составляет примерно $\pm 1\%$ от предельной величины измеряемого уровня.

через мембрану, сифон или какой-нибудь другой гибкий элемент. Вторичным прибором служит вольтметр, а его датчиком — подвижной сердечник трансформатора. Поплавковые уровне-

ГЛАВА VII

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Применение жидких металлов в качестве теплоносителей вносит свои особенности в эксплуатацию лабораторных и промышленных установок. Это относится ко всем рассматриваемым металлам, однако щелочные металлы имеют специфические свойства, позволяющие рассматривать их отдельно.

Опыт эксплуатации систем с щелочными металлами был накоплен, в основном, при изучении ртутно-водяных энергетических установок. Щелочные металлы отличаются сравнительно большой химической стойкостью в атмосферных условиях, что существенно облегчает работу с ними во время заполнения и опорожнения систем, их ремонта и т. п. В противоположность этому, высокая химическая активность щелочных металлов вызывает дополнительные эксплуатационные трудности. Данные трудности связаны как с наличием сложного дополнительного оборудования для защиты металлов от окисления, их очистки, отбора проб и т. д., так и с повышенной опасностью Na, K и Li для обслуживающего персонала, вызываемой прежде всего их легкой воспламеняемостью. Вопросы очистки, отбора проб и т. п. встречаются и в практике использования щелочных металлов, но там они, как правило, разрешаются гораздо легче. Методы очистки некоторых из этих металлов, применяемые в лабораторных условиях, описаны в гл. II «Химические свойства». В промышленных условиях методы очистки щелочных металлов изучались мало. Например, известно, что для очистки ртути могут быть применены вещества (титан, магний), связывающие некоторые примеси, и в первую очередь кислород, в нерастворимые соединения, которые всплывают в жидком металле и могут быть удалены с его поверхности в случае необходимости.

Специфика эксплуатации жидкометаллических установок обусловливается:

- 1) наличием в системе инертного газа;
- 2) необходимостью отбора проб металла для определения содержания окислов и прочих загрязнений;

- 3) использованием устройств для очистки металла, характерных, в особенности, для натриевых контуров;
- 4) необходимостью специального обогрева системы;
- 5) появлением значительных внутренних напряжений в материале конструкции при колебаниях температуры жидкого металла.

40. Подготовка системы к работе

Испытания на плотность. Испытания контура на плотность производятся следующими методами:

- 1) проверкой на утечку керосина, наполняющего испытываемую емкость;
- 2) гидропробой;
- 3) просвечиванием рентгеновскими и гамма-лучами;
- 4) обнаружением неплотности гелиевым теческателем.

Последний метод является наиболее надежным; при наличии вакуума внутри испытываемого сосуда и среды гелия снаружи теческатель с чувствительным масспектрометром позволяет обнаружить неплотность, протечка гелия через которую составляет не более $3 \cdot 10^{-11}$ $\text{м}^3/\text{час}$. Если применение гелиевого теческателя невозможно или не представляется целесообразным, для обнаружения места течи можно применять теческатель с использованием галогеносодержащих органических веществ.

Иногда хорошие результаты дает испытание плотности контура путем создания в нем давления воздуха или какого-либо газа и нанесения мыльной эмульсии на поверхность проверяемых сварных швов, фланцевых соединений и т. д. Однако в практике известны случаи течи жидкого металла в тех местах, где при испытании на мыльную эмульсию не наблюдалось появления пузырьков газа.

Предварительная промывка. Все детали и узлы оборудования контура перед его загрузкой металлом должны быть полностью очищены от посторонних веществ (грязи, масла и т. д.), которые могут впоследствии взаимодействовать с жидким металлом или же стать источником закупоривания магистралей.

Для удаления следов масла или жира с внутренней поверхности труб применяются различные обезжиривающие вещества; эта поверхность может быть обработана травильными растворами. Необходимо внимательно следить за тем, чтобы после промывки в системе не оставалось никаких следов моющего вещества, в особенности, следов обезжиривающих веществ, содержащих углеводороды. Как известно, наличие углеводородов в системе может привести к науглероживанию поверхности труб из нержавеющей стали, а наличие галогенозамещенных углеводородов в натриевых и натрий-калиевых контурах еще более опасно, так как данные вещества бурно взаимодействуют со щелочными металлами.

Удалять моющие вещества из контура удобнее всего горячей водой, поступающей под сильным напором. После такой промывки

контур должен быть тщательно высушен под вакуумом или в токе инертного газа.

Особенности подготовки натрия к загрузке в установку. Перед заполнением системы натрием необходимо тщательно очистить поверхность металла от окиси¹ и от слоя смазки, предохраняющей его от окисления во время хранения в железных бочках или других контейнерах. После грубой механической очистки от наружного слоя загрязнений натрий загружается отдельными блоками или брикетами в плавильный бак, где его следует выдерживать при температуре порядка 250° С в течение нескольких дней, что способствует частичной очистке металла от органических веществ. Затем с целью удаления окислов натрия охлаждают до 120° С и пропускают через пористые металлические фильтры, диаметр отверстий которых составляет не более 15 мк. Такие фильтры могут быть включены в загрузочную магистраль контура; для облегчения слива натрия параллельно фильтрам устанавливается дренажная магистраль, снабженная вентилем. Конструкция фильтров должна предусматривать возможность их отключения от контура для очистки и промывки.

Для предварительной очистки натрия используются также фильтры в виде холодных ловушек.

Предварительный разогрев контура. Все оборудование установки перед заполнением жидким металлом должно быть прогрето до температуры, превышающей точку плавления металла.² Применяются электрический и паровой разогрев, причем первый из них нашел более широкое распространение.

В случае небольших размеров обогреваемого участка или сложной его конфигурации в качестве нагревателя служит обмотанная вокруг участка проволока или лента, защищенная температуростойкой электроизоляцией. Для обогрева значительных по размерам участков используются изготовленные отдельно нагреватели в виде керамических стержней, труб с навитой на них проволокой или лентой и т. п. Такие нагреватели укрепляются непосредственно на обогреваемой поверхности.

Индукционный электрообогрев эффективен для деталей, изготовленных из углеродистых сталей; однако в применении к аустенитным сталям этот метод требует тока очень высокой частоты и поэтому невыгоден.

Паровой обогрев осуществляется следующим образом. В непосредственном контакте с трубопроводом для жидкого металла прокладывается труба или несколько труб меньшего диаметра, по которым циркулирует пар.

Обогрев контура следует производить таким образом, чтобы температуры различных его участков были бы все время примерно

¹ Для удаления пленки окиси с поверхности металлического натрия хорошо использовать десяти-двадцатипроцентный раствор изопропилового спирта в керосине.

² Натрий-кальевые контуры обычно не требуют предварительного разогрева.

одинаковы. Желательно, чтобы темп нагрева не превышал 5—10 градусов в час. Эти меры позволяют избежать чрезмерных термических напряжений в материале конструкции.

Заполнение системы жидким металлом. Перед загрузкой система либо вакуумируется, либо заполняется инертным газом после многократной продувки этим же газом, производимой с целью полного удаления кислорода. Заполнение под вакуумом применяется в тех случаях, когда в контуре возможно образование газовых мешков. Жидкость при за-

полнении может поступать в систему либо под давлением инертного газа над уровнем металла в загрузочном баке, либо под действием силы тяжести. Иногда поступление металла в контур обеспечивается с помощью насоса. Наиболее удобным и простым является первый из указанных методов. Второй метод применяется редко, так как загрузочный бак часто является одновременно сливным, в связи с чем он расположен в нижней точке контура.

Перед заполнением температура металла в загрузочном баке должна быть приблизительно равна температуре разогретого контура.

Загрузка твердого натрия в загрузочный бак может быть осуществлена с помощью двойного затвора, показанного на рис. 202. Загружаемый брикет натрия помещается в промежуточную камеру затвора после продувки ее инертным газом.

Для контроля за процессом заполнения контура служат указатели уровня металла в загрузочном баке и в других местах системы. За ходом загрузки можно следить и по показаниям термомпар, установленных на различных участках контура.

41. Обнаружение течи металла

Утечка жидкого металла из контура в окружающую среду или в контур другого теплоносителя может повлечь за собой опасные последствия. Степень опасности течи определяется рядом факторов: размером и местом утечки, температурой жидкого металла и др. Особое внимание при контроле плотности системы во время ее работы должно быть уделено сварным швам, и в особенности тем швам, в которых возможна чрезмерная концентрация внутренних напряжений (места сварки труб в трубные доски

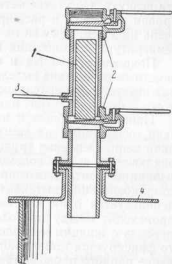


Рис. 202. Двойной затвор для загрузки натрия в загрузочный бак.

1 — брикет натрия; 2 — затворки; 3 — подпиточный инертным газом; 4 — бак.

и т. п.). Возможно появление течи металла вследствие усталостного разрушения сильфонов, мембран и других тонкостенных деталей, а также вследствие недоброкачества изготовления или сварки труб (шлаковые включения, непровар). В меньшей степени вероятна утечка металла через неплотности, вызванные коррозией стенок труб или теплообменников.

Если вытекающий металл радиоактивен, то для его обнаружения используются приборы, служащие для измерения активности воздуха. Об утечке металла можно судить также по снижению уровня жидкости в расширительном баке, однако этот способ не очень надежен, так как на положение уровня оказывают влияние температурные колебания в системе.

Появление течи Na и сплава Na — K в контуре становится заметным вследствие выделения белого дыма окиси Na. Дым обнаруживается либо визуально, либо с помощью телевизионных установок, фотоэлементов или химических анализаторов воздуха.

Наиболее удобным и надежным является способ обнаружения течи, основанный на замыкании вытекшим металлом электрической цепи. Основная трудность изготовления подобных устройств заключается в необходимости создания надежной электрической изоляции контактного провода, допускающей беспрепятственное соприкосновение вытекающего металла с этим проводом. Если используется один контактный провод, то короткое замыкание происходит между проводом и поверхностью сосуда или трубопровода с жидким металлом; если же используются два провода, то фиксируется момент короткого замыкания между ними. Применение парного провода предпочтительнее, так как замыкание происходит в небольшом зазоре и надежность обнаружения течи больше. Контактную проволоку лучше всего изолировать керамическими бусами, форма которых позволяет жидкости свободно соприкасаться с отдельными участками проволоки.

Издаются возможности применения термисторов для обнаружения течей (по местному повышению температуры) в тех местах системы, где невозможно разместить контактные сигнализаторы.

Своевременное обнаружение течи металла внутри каких-либо теплообменных аппаратов и, в особенности, парогенераторов имеет большое значение. Парогенераторы на натрии имеют часто систему труб с двойными стенками, между которыми помещается теплопередающая прослойка. По повышению давления в полости прослойки можно судить о появлении течи.

42. Ремонт и промывка натриевых контуров

Ремонт натриевого контура. Производство каких-либо работ на действующем натриевом контуре требует принятия определенных мер для предотвращения окисления металла.

Если ремонт контура связан с большим объемом работ, он производится после полного слива натрия из системы и ее промывки.

При небольшом объеме работ рекомендуются два способа, способствующих уменьшению окисления металла во время ремонта:

1. Натрий сливается из контура или же из того участка контура, который подлежит ремонту. После понижения давления инертного газа в системе примерно до 0,05 атм в стенке удаляемой части трубы просверливается отверстие диаметром 20—50 мм (в зависимости от диаметра трубопровода). В отверстие вводится пустой резиновый баллон (рис. 203), который наполняется газом так, чтобы давление в нем на 0,1—0,2 атм превышало давление в контуре. Таким образом окисление металла атмосферным воздухом предотвращается. При просверливании отверстия для баллона надо избегать попадания стальных стружек внутрь трубы. После того, как удаляемый участок магистрали контура отрезан, около баллона на стенке трубопровода образуется слой окиси натрия, который нужно удалить ватой или ветошью, смоченной в спирте. После установки отремонтированного (или вновь изготовленного) участка трубы на свое место газ из баллона выпускается, а баллон вынимается из отверстия, в котором затем вваривается пробка.

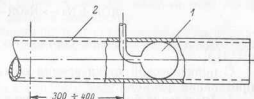


Рис. 203. Защита натрия от окисления во время ремонта контура с помощью резинового баллона.

1 — баллон; 2 — трубопровод.

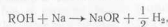
Описанный способ применяется для магистралей, имеющих диаметр 100 мм и выше. Для трубопроводов меньших диаметров вместо баллонов могут быть использованы резиновые заглушки.

2. Для защиты натрия от окисления используется сам металл, искусственно замороженный в одном из участков трубопровода. Этот способ менее удобен, чем первый, так как искусственное замораживание металла в трубе значительного диаметра требует много времени. К тому же наиболее эффективный метод охлаждения трубопровода водой или льдом часто бывает неприемлем по соображениям техники безопасности. Практически этот способ применим к трубопроводам диаметром не более 50 мм.

При резке труб, содержащих замороженный натрий и тем более натрий—калий, не следует смазывать режущий инструмент какими-либо маслами, так эти вещества активно взаимодействуют со щелочными металлами. По окончании резки поверхность металла необходимо защитить от дальнейшего окисления толстым слоем изоляционной ленты. Перед сваркой участка трубы на свое место натрий удаляется из основного трубопровода на длине не менее 100 мм ножом или стамеской, что ликвидирует возможность выплывания его из трубопровода при последующей сварке.

В том случае, когда ремонт не требует замены какого-либо участка контура, сварочные работы могут быть произведены на месте после полного слива металла и заполнения системы инертным газом, находящимся под давлением, несколько превышающим атмосферное. Предварительная промывка контура перед ремонтом желательна, но не обязательна.

Промывка натриевого контура после слива металла. Все используемые для удаления остатков натрия из системы вещества (за исключением жидкого аммиака) химически с ним взаимодействуют. Чаще всего для промывки используется пар, вода, метиловый спирт и этиловый спирт. При взаимодействии этих веществ с натрием происходит химическая реакция типа:



где буквой R обозначены соответствующие радикалы (H, CH₃ и C₂H₅).

С практической точки зрения важны следующие особенности протекания реакции:

1. Выделение большого количества тепла, которое может привести к сильному повышению температуры отдельных участков контура.

2. Выделение водорода, способствующее повышению давления в системе и создающее в некоторых случаях опасность взрыва смеси водорода и кислорода внутри контура или вне его.

3. Образование нерастворимых в воде, спирте и т. д. соединений типа NaOR, которые могут закупорить трубопроводы.

В связи с этим особое значение приобретает возможность осуществления тщательной промывки контура. Прежде всего должен быть обеспечен полный слив жидкого металла из всех узлов системы. Установка должна быть оборудована магистральями большого диаметра, служащими для сброса давления в случае выделения водорода во время промывки. Участки контура, соединенные между собой параллельно, по возможности снабжаются запорными вентилями, что позволяет промывать каждый из них в отдельности. Особое внимание следует уделить промывке параллельных линий, каждую из которых перекрыть нельзя, например, труб теплообменников. Те детали контура, которые могут быть сняты с установки, промываются отдельно.

Промывка спиртом. Преимуществом этого способа промывки является то, что при испарении спирт поглощает тепло, благодаря чему реакция взаимодействия его с натрием протекает не очень бурно в отличие от реакции натрия с водой. Для увеличения химической активности промывающего реагента во время промывки спирт можно постепенно разбавлять водой.

Этот способ имеет следующие недостатки:

— легкая воспламеняемость спирта и его паров;

— возможность резкого повышения давления вследствие выделения водорода при реакции спирта с натрием в контуре, большая часть объема которого занята спиртом;

— возможность разложения и коксования спирта, возникающего при больших количествах остатков натрия в системе;

— дороговизна спирта.

При промывке рекомендуется такая последовательность операций:

1) полностью слить натрий и дать контуру остыть до температуры ниже точки кипения спирта (60—70° C);

2) продуть систему инертным газом;

3) залить в контур небольшое количество этилового или метилового¹ спирта. Добавлять спирт в систему каждый раз, когда прекратится кипение уже залитой жидкости;

4) промыть после заполнения систему спиртом, включив циркуляционный насос или перемешав спирт каким-либо другим образом;

5) слить спирт и добавить в него 20% воды;

6) залить в контур смесь спирта с водой и промыть смесью;

7) промыть контур чистой водой.

Описанный способ промывки спиртом рекомендуется использовать для установок небольшого масштаба.

Промывка водяным паром. Этот способ промывки имеет следующие преимущества:

— температура, при которой производится промывка, превышает точку плавления натрия, что способствует полному завершению реакции;

— наличие газообразной среды внутри системы ограничивает возможность резкого подъема давления в ней в результате выделения водорода;

— дешевизна.

Недостатки способа заключаются в следующем:

— низкая теплоемкость водяного пара способствует перегреву отдельных участков контура;

— вследствие того, что на первых стадиях промывки содержащаяся в системе невелика, образующаяся при реакции щелочь может выделяться в твердом виде и закупоривать трубопроводы.

Рекомендуется следующая последовательность операций при промывке:

1) полностью слить натрий из контура;

2) наполнить контур инертным газом;

3) продуть предварительно нагретую до температуры 120—150° C систему сухим насыщенным или слегка перегретым водяным паром при давлении пара примерно 1 атм;

¹ Метиловый спирт взаимодействует с натрием более активно, чем этиловый.

4) уменьшить интенсивность обогрева контура и продукт его влажным паром; в дальнейшем прекратить обогрев контура и постепенно увеличивать степень влажности пара;

5) промыть систему водой.

Этот способ промывки можно рекомендовать для полупромышленных и промышленных установок.

Вместо пара при промывке можно использовать влажный инертный газ. При этом удается избежать перегрева отдельных узлов оборудования, так как инертный газ поглощает часть тепла, выделяющегося при реакции водяного пара с натрием. На первой стадии промывки контур продувается смесью, состоящей из 95% газа и 5% водяного пара. Затем подачу инертного газа в систему постепенно прекращают и переходят на промывку паром и водой.

После окончания промывки из контура должна быть полностью удалена вода. Сушку лучше всего производить под вакуумом в несколько десятых миллиметра ртутного столба и при температуре 100—150° С.

Промывка жидким аммиаком. Применение жидкого аммиака для удаления остатков натрия из контура дает хорошие результаты, однако необходимость создания значительного давления для сжижения аммиака (8 атм при 20° С) ограничивает область применения данного способа лабораторными установками небольших масштабов.

Реакция взаимодействия натрия с аммиаком протекает довольно медленно; при этом образуется амид натрия (NaNH_2). Так как жидкий аммиак не взаимодействует с оксидом натрия (Na_2O), образующейся во время работы установки, в него добавляют хлорид аммония в количестве от 2 до 5%. Это вещество реагирует с оксидом натрия, образуя хлористый натрий, малорастворимый в жидком аммиаке (растворимость составляет всего 3% по весу).

Добавлять хлорид аммония в систему следует только на последней стадии промывки, когда количество металла в контуре сравнительно невелико, так как хлорид аммония энергично взаимодействует с натрием, причем реакция сопровождается бурным выделением водорода.

Как показали специальные исследования, жидкий аммиак не вызывает сколько-нибудь заметной коррозии нержавеющей стали.

Уничтожение натрия и натрий-калия. Если возникает необходимость в уничтожении щелочных металлов, то можно рекомендовать ряд способов проведения этой операции.

Сжигание. Уничтожение натрия может производиться при сжигании его на воздухе. Недостатком этого способа является образование больших количеств вредного для здоровья белого дыма (окиси натрия). Сжигание щелочных металлов производится в больших открытых металлических баках. Дымообразование уменьшается при сжигании натрия, расплавленного обычным пульверизатором (этот способ используется в химической промышлен-

ности для производства перекиси натрия). Расплавленный металл подается в сопло пульверизатора потоком воздуха, распыливается и сжигается в специальной камере. Основное количество образующейся окиси натрия оседает на стенках камеры, а остаток улавливается с помощью циклонов, электростатических пылеуловителей и др.

Уничтожение натрия и натрий-калия в спирте. Для уничтожения щелочных металлов может быть применен этиловый, метиловый или пропиловый спирт. Уничтожаемый металл следует по кусочкам или по каплям добавлять в сосуд со спиртом; часть сосуда должна быть заполнена инертным газом. Продукты реакции помещаются в воду с целью полного их обезвреживания.

Ввиду дороговизны спирта и опасности возникновения пожара, описанный способ применяется лишь для уничтожения малых количеств металла.

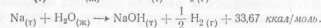
Уничтожение натрия и натрий-калия в воде. В этом случае уничтожение металла производится либо опрыскиванием его водой в специальном контейнере, либо путем подачи пара в контейнер. Особое внимание должно быть обращено на обеспечение свободного выхода из контейнера образующегося в нем водорода, а также на защиту выполняющего данную операцию персонала от выделяющегося дыма.

Более безопасным является распыливание жидкого металла внутри большого объема воды на значительном расстоянии от ее поверхности. Как показали специальные опыты, во время распыливания натрия на глубине 3 м не происходило заметного дымления на поверхности воды. Расход натрия через распыляющее сопло составлял при этом 2500 кг/час.

43. Взаимодействие расплавленных щелочных металлов с водой

Возможность соприкосновения щелочных металлов с водой или водяным паром может возникнуть: 1) во время эксплуатации парогенераторов на щелочных металлах; 2) при заполнении металлом недостаточно просушенного контура; 3) при промывке системы после ее работы; 4) при уничтожении металла в случае необходимости.

Химическая реакция $\text{Na} + \text{H}_2\text{O}$. Взаимодействие натрия и воды протекает в соответствии с одним из двух уравнений:



Сравнительные расчеты свободных энергий для этих реакций показывают, что при температуре, меньшей точки плавления

* Тепловые эффекты реакций даны для температуры 25° С.

гидрата окиси натрия (NaOH) ($\sim 318^\circ \text{C}$), взаимодействие натрия и воды всегда приводит к образованию NaOH и H_2 , даже в случае избытка натрия. При температуре, большей 318°C , избыточное количество натрия вступает в реакцию с NaOH , образуя окись натрия и гидрид NaH , а при температуре, большей 450°C , образуется окись и газообразный водород. Аналогичным образом про-

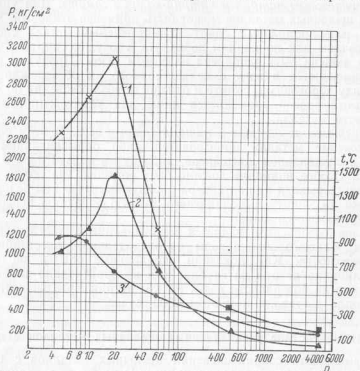


Рис. 204. Конечные величины температур и давлений, создающихся в прочном сосуде после завершения реакции ($\text{Na} + \text{H}_2\text{O}$), в зависимости от соотношения количеств реагирующих веществ.

1 — P (адиабатические условия); 2 — t (адиабатические условия); 3 — P (изотермические условия); n — число граммов воды, реагирующее с 23 граммами натрия.

текает взаимодействие воды со сплавом $\text{Na} - \text{K}$. Реакция взаимодействия натрия с водой практически необратима.

Результаты теоретических расчетов конечных величин температур и давлений, возникающих в прочном сосуде после полного завершения рассматриваемой реакции, показаны на рис. 204.

Механизм протекания реакции. При соприкосновении жидкого натрия с водой выделяющийся водород тотчас же разделяет реагирующие вещества, в связи с чем время, необходимое для завершения реакции, определяется главным образом условиями перемешивания натрия и воды между собой.

Проводились специальные опыты по изучению характера действия ударной волны, образующейся при реакции щелочных металлов с водой, происходящей в водяном объеме на глубине 3 м. Расчетная обработка опытов показала, что энергия образующейся при реакции ударной волны сравнительно невелика и не превышает $5 \text{ кал/г Na} - \text{K}$ или 0,4% от общего количества выделяющейся энергии. Более значительную долю общей энергии составляет энергия пузырей водорода — 16%. Очевидно, вся остальная часть энергии переходит в тепло.

Рассмотрим вопрос о температурных характеристиках данного процесса. Если реакция протекает при избыточном количестве воды, выделяющееся тепло затрачивается на ее испарение. Поэтому температура в зоне реакции не превышает точки кипения воды при данном давлении. Если же имеется избыток натрия, разогрев в зоне реакции является более сильным, так как в этом случае только испарение жидкого металла может поглощать выделяющееся тепло, снижая температуру до $\sim 900^\circ \text{C}$ (при атмосферном давлении).

44. Система инертного газа

Жидкие металлы, применяемые в качестве теплоносителей, активно взаимодействуют с кислородом воздуха, поэтому обязательным условием эксплуатации является защита металла от окисления подушкой инертного газа. Для создания защитной подушки используются обычно азот, аргон и гелий, некоторые физические свойства которых приведены в табл. 50. Из перечисленных газов наибольшее распространение получил азот вследствие максимальной доступности. Аргон, как наиболее тяжелый инертный газ, находит преимущественное применение для открытий постоянно или открываемых периодически сосудов с жидким металлом. Гелий обладает наилучшими ядерными свойствами и поэтому используется в системах, включающих в себя ядерный реактор.

Примеси в инертном газе. Наиболее важными являются следующие примеси: кислород, водород, водяной пар, некоторые углеводороды, и, в меньшей степени, окись углерода и углекислый газ.

Кислород представляет наиболее вредную примесь в инертном газе. Допустимое содержание O_2 в газовой подушке определяется с учетом предположения о том, что весь кислород вступит в реакцию с металлом. Очевидно поэтому, что чем больше количество инертного газа, тем тщательнее он должен очищаться от кислорода.

Водород, входящий в состав инертного газа, взаимодействует с натрием, образуя малорастворимый в жидком металле гидрид (см. гл. I), закупоривающий магистрали системы, и, кроме того, вызывающий нежелательные колебания реактивности ядерного реактора на быстрых нейтронах, если гидрид образуется в контуре реактора.

Таблица 50

Физические свойства некоторых инертных газов

Величина	Размерность	Газ		
		Гелий	Азот	Аргон
Молекулярный вес	—	4,003	28,016	39,944
Плотность при 0°С	г/л	0,17846	1,25049	1,78394
Точка плавления при 1 ама (°)	°С	—272,1	—210,02	—189,26
Точка кипения при 1 ама	°С	—268,92	—195,808	—185,86
Критическая температура $t_{кр}$	°С	—267,95	—147,16	—122,46
Критическое давление $p_{кр}$	ама	2,26	33,490	47,996
Удельная теплоемкость c_p	ккал/кг°С	1,251	0,2481	0,1252
Удельная теплоемкость c_v	ккал/кг°С	0,752	0,1774	0,075
Коэффициент теплопроводности λ	кал/см·сек°С	34,3·10 ⁻⁶	58,0·10 ⁻⁶	38,2·10 ⁻⁶

Содержание водорода в инертном газе обычно невелико и поэтому он вызывает меньше затруднений при эксплуатации, чем кислород. Водяной пар также представляет нежелательную примесь в инертном газе, так как при взаимодействии с натрием он образует гидрат окиси натрия, распадающийся затем на окись и гидрид.

Углеводороды, находящиеся в инертном газе, разлагаются при повышенных температурах в присутствии расплавленного натрия, что, во-первых, приводит к увеличению общего содержания водорода в системе, а, во-вторых, способствует науглероживанию поверхности стальных деталей контура. С целью снижения концентрации углеводородов рекомендуется использовать инертный газ, поставляемый промышленностью для газоразрядных осветительных приборов. Содержание примесей в таком газе приблизительно 0,005%, из которых большую часть составляет кислород, а примеси углеводородов практически не наблюдаются, так как для нагнетания газа в баллоны применяются компрессоры на водяной смазке вместо масляной.

Если жидкометаллический контур включает в себя ядерный реактор, то при выборе инертного газа приходится учитывать ряд дополнительных факторов, и, прежде всего, возможность активации газа и примесей, содержащихся в нем. Несмотря на малую растворимость инертных газов в жидком металле, такая возможность вполне реальна, так как газ в виде пузырьков может увлекаться потоком теплоносителя в активную зону реактора.

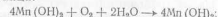
Из упомянутых газов (гелий, аргон и азот) только гелий не активируется в реакторе. Аргон имеет значительное сечение захвата нейтронов (0,6 барнов для тепловых нейтронов) и, будучи активированным, испускает бета- и гамма-лучи, имея период полураспада, равный 1,82 часа. Азот в этом отношении менее опасен, поскольку период полураспада изотопа N¹⁶ сравнительно невелик (7,3 сек). В табл. 51 дается сравнение ядерных свойств гелия, азота и аргона.

Таблица 51

Ядерные свойства некоторых инертных газов

Изотоп	Содержание, %	Поперечное сечение			Энергия нейтронов, эв	Тип реакции
		Поглощение, барны	Рассеяние, барны	Общее, барны		
He	100	—	41,4 ÷ 1,55	—	0,025	—
He ³	1,3·10 ⁻⁴	5000	—	—	Тепловые	(n, γ) До перехода в He ⁴
He ⁴	~100	—	—	—	—	(n, p) До перехода в H ³
N	100	1,45 ÷ 1,86	—	12,7	0,025	—
N ¹⁴	99,63	0,1	—	9,96	10 ÷ 200	—
N ¹⁴	—	1,7	—	—	Тепловые	(n, γ) До перехода в N ¹⁵
N ¹⁴	—	—	—	—	—	(n, p) До перехода в C ¹⁴
N ¹⁴	—	1,9·10 ⁻³	—	—	>10,7	(n, 2n) До перехода в N ¹³
N ¹⁵	0,37	8·10 ⁻⁵	—	—	Тепловые	(n, γ) До перехода в N ¹⁶
A	100	0,6	0,75	1,4	0,025	—
A ³⁶	0,337	6	—	—	Тепловые	(n, γ) До перехода в A ³⁷
A ³⁸	0,063	0,8	—	—	—	(n, γ) До перехода в A ³⁹
A ⁴⁰	99,6	0,6	—	—	—	(n, γ) До перехода в A ⁴¹
		0,93·10 ⁻³	—	—	1 Мэв	(n, γ) До перехода в A ⁴¹

Определение содержания примесей в инертном газе. Для определения концентраций кислорода, меньших 0,01%, используется метод Винклера, основанный на поглощении кислорода гидратом окиси марганца:



За счет некоторых усовершенствований чувствительность метода может быть повышена до 0,0005% O₂ при средней погрешности определения $\pm 0,00008\%$.

В ряде случаев бывает необходимым осуществить непрерывный анализ газа на кислород. Для этой цели с успехом применяются газоанализаторы с принципом действия, основанным на взаимодействии кислорода с водородом в присутствии катализатора (палладия или платины). Степень повышения температуры катализатора во время реакции позволяет определить концентрацию O₂ в газе, поступающем в анализатор. Чувствительность прибора составляет примерно 0,01% O₂. Она может быть повышена до 0,005%, если вместо измерения температуры катализатора находить количество образующегося водяного пара по изменению влажности (точки росы) проходящего через прибор газа.

Примесь водорода в газе определяется аналогичным методом каталитического сжигания. Вместо палладия или платины в качестве катализатора может быть использована окись меди, нагретая до 400° С. Чувствительность метода каталитического сжигания по отношению к водороду примерно в два раза ниже, чем к кислороду.

Количество водяных паров в газе находится измерением температуры точки росы. Особенно высокой чувствительности определения воды (несколько десятитысячных процента) добиваются, сжимая газ до давления 10—20 *атм*.

Точное определение содержания углеводородов в инертном газе встречает значительные методические трудности. Известны следующие методы анализа: каталитическое сжигание (катализатор — окись меди); измерение точки росы в газе после полного удаления из него влаги; ионизация газа, находящегося при пониженном давлении (глюющий разряд), позволяющая обнаруживать следы углеводородов и других примесей в благородных газах.

Очистка инертных газов от примесей. Максимально допустимые количества примесей в инертных газах приведены в табл. 52. Дополнительная очистка газа перед заполнением им системы нужна лишь в том случае, когда газ используется при отборе проб металла и при определении кислорода в пробе, а также, если газ случайно загрязнен при транспортировке и т. п. Наиболее надежные результаты очистки от кислорода получают при барботаже газа сначала через колонку с горячим сплавом Na—K (150—200° С), а затем через колонку с холодным сплавом (~20° С). Найдено, что содержание кислорода в азоте снижается с 0,15 до 0,01% после пропускания его под давлением 7 *атм* через колонку диаметром 100 мм и высотой 900 мм, заполненную плотной набивкой из стальной стружки и наполовину залитую сплавом Na—K. Можно полагать, что при барботаже газа через сплав происходит очистка его от водорода и водяного пара.

Таблица 52
Допустимое содержание примесей в инертных газах

Наименование примесей	Гелий	Аргон	Азот
	%,		
Чистота газа	99,9976	99,99	99,99
Кислород	—	0,002	0,002
Водород	0,00003	0,002	0,002
Азот	0,001763	0,001	—
Углерод	—	0,003	—
Метан	0,000001	—	—
Углекислый газ	0,000581	—	—
Аргон	0,000049	—	—
Влага (точка росы, °С)	—	—60	—60

Известен опыт очистки гелия и аргона от водяных паров продувкой газа над слоем натрия, стекающего по поверхности конического колпачка. Результаты очистки с помощью этого устройства в зависимости от времени его работы приведены в табл. 53.

Таблица 53
Результаты очистки аргона от водяных паров

Время опыта, час.	Парциальное давление водяных паров после осушки газа, мм рт. ст.	Точка росы, °С
2	0,5	—24,5
8	0,05	—45,7
120	<0,000015	—100

При промышленном получении калия для очистки азота от кислорода успешно используется медная стружка, нагретая до 600° С.

Содержание влаги в инертном газе может быть существенно понижено продувкой его через активированную окись алюминия. При этом температура точки росы для газа снижается по крайней мере до 6° С.

Небольшие количества газа осушаются вымораживанием влаги в ловушках, охлаждаемых жидким азотом.

Ловушки для паров жидкого металла. Пары щелочных металлов могут быть удалены из газа путем пропускания его через сетку

из нержавеющей стали, погруженную в сплав Na — K. При этом температура сплава не должна превышать 40—50°C. Если подобное устройство используется для удаления из газа паров натрия, то необходимо применять Na — K с избыточным содержанием калия в целях противодействия повышению температуры плавления сплава, происходящему по мере поглощения натрия.

45. Определение примесей в натрии и сплаве Na—K

Источники примесей. Загрязнение натрия ¹ примесями может происходить как в процессе его получения и транспортировки, так и во время работы установки. Образованию примесей способствует радиоактивное облучение металла в ядерном реакторе.

Технический натрий является довольно чистым продуктом (гл. II, табл. 12). Во время транспортировки и загрузки в установочный металл загрязняется в основном кислородом, поглощаемым из окружающей атмосферы, а также водородом и углеродом, входящими в состав защитной смазки. Металлические примеси попадают в натрий, главным образом, при сварке, резке и т. д. во время монтажа и ремонта оборудования. Содержание примесей, обусловленное растворимостью конструкционных материалов в жидком металле, обычно невелико, в особенности при температурах менее 500—600° С. Источниками примесей могут быть некоторые вещества (кислород, водяной пар, двуокись углерода), входящие в состав газовой подушки системы.

Влияние примесей на условия работы контура. Примеси в щелочных металлах, как правило, увеличивают скорость коррозии конструкционных материалов и снижают интенсивность теплообмена, а при использовании металла для охлаждения ядерного реактора повышают общий уровень активности теплоносителя. Кроме того, нерастворимые примеси могут вызвать трудности в процессе эксплуатации установки, полностью или частично забивая трубопроводы.

Особенно вредной является примесь кислорода. При содержании кислорода в натрии в количестве более 0,005—0,01% агрессивное воздействие Na на конструкционные материалы заметно возрастает.

Примесь углерода способствует науглероживанию поверхности деталей контура и увеличению хрупкости поверхностного слоя стали, что в ряде случаев оказывается опасным (для клапанов вентилей, втулок насосов).

Присутствующий в щелочных металлах кальций вреден, поскольку он взаимодействует с никелем, входящим в состав нержавеющей стали, образуя с ним соединение типа твердого раствора.

¹ Все приводимые в дальнейшем сведения по натрию относятся и к сплаву натрий—калий, за исключением случаев, оговоренных особо.

Закупорка магистралей действующего контура в первую очередь вызывается накоплением в них твердой окиси натрия. Вследствие ухудшения растворимости окиси в жидком металле при низких температурах (см. рис. 50) наиболее подходящие условия для полной или частичной закупорки создаются в относительно холодных участках системы, в частности на входе в реактор. В последнем случае даже частичная закупорка может иметь серьезные последствия, так как она приводит к неравномерному распределению жидкости по отдельным тепловыделяющим элементам реактора, в результате чего возможен перегрев некоторых элементов. В целях предупреждения подобных явлений следует поддерживать содержание кислорода в Na на низком уровне. Можно думать, что при относительном содержании O₂, равном 0,001—0,002%, образование пробок окиси даже в самых холодных участках тракта будет исключено.

Малорастворимые примеси в натрии дают также кальций, восстанавливающий его окись и образующий твердую окись кальция.

Наконец, закупорке трубопроводов способствуют органические соединения типа углеводородов, дающие при взаимодействии с натрием нерастворимые осадки.

Технология отбора проб металла. Отбор проб натрия на анализ может быть осуществлен как погружением пробоотборной трубки внутрь емкости системы, так и сливом порции металла в пробоотборник через специальную трубку.

Температура пробы не должна быть меньше температуры циркулирующего натрия во избежание выпадения на входе в пробоотборник примесей, растворимость которых в металле падает с уменьшением температуры. В частности, по этим соображениям не следует производить отбора проб из загрузочного (сливного) бака системы.

Важен правильный выбор материала пробоотборника. Если отбираемый на анализ металл сливается по трубке, то материал трубки должен быть таков же, что и материал трубопроводов контура. Однако последнее условие должно выполняться не всегда. Например, пробоотборник в виде черпачка, используемый при определении примесей железа в Na, должен быть изготовлен из материала, не содержащего в своем составе Fe (из никеля и т. п.). Если черпачок стальной, то обработка Na в пробоотборнике кислотой с целью извлечения из него железа может исказить результаты анализа.

Отбор должен производиться под защитой тщательно очищенного инертного газа. Признаком удовлетворительной чистоты газа может служить сохранение зеркального блеска поверхности жидкого натрия в пробоотборнике в течение длительного промежутка времени. Если газ очищен недостаточно хорошо, металл пробы покрывается серой или черной пленкой. Эту пленку не следует путать с белым налетом окиси, который появляется при

охлаждении металла, содержащего более чем 0,015% O_2 , даже в среде газа, свободного от кислорода.

Одно из приспособлений, использованных для отбора проб текущего или неподвижного металла при температуре до 650° С, изображено на рис. 205. Черпачок из никеля, рассчитанный примерно на 1 г Na, погружается в жидкость, затем извлекается из нее и переносится в камеру для амальгамирования натрия

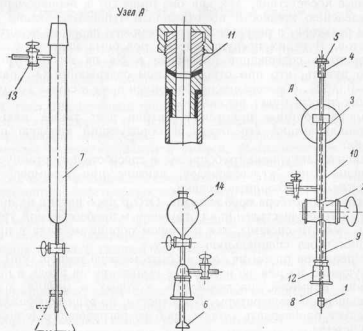


Рис. 205. Приспособление для отбора проб натрия и подготовки их для химического анализа.

1 — черпачок; 2 — кран; 3 и 11 — сальник; 4 — втулка; 5 — зажим; 6 — диск; 7 — камера; 8 — полый стержень; 9 — проволока; 10 — камера; 12 — конус; 13 — кран; 14 — колба для ртути.

ртутью, в которой примеси отделяются от основного металла. Все операции производятся под защитой инертного газа.

Как видно из рис. 205, черпачок прикрепляется к нижнему концу полого стального стержня длинной никелевой проволокой, согнутой в виде петли и пропущенной через стержень. Верхняя часть стержня вместе с проволокой закрепляется во втулке из тайгона винтовым зажимом. В стеклянной камере пробоотборника стержень удерживается за счет трения в сальнике, уплотненном двумя резиновыми кольцами. Сальник препятствует утечке газа из камеры, но в то же время позволяет свободно опускать или поднимать стержень вместе с черпачком. Нижней своей частью пробоотборник присоединяется к штуцеру вентиля, отсе-

кающего все устройство (в случае необходимости) от системы. Момент погружения черпачка в расплавленный металл фиксируется по замыканию электрической цепи, в которую включен стержень. После заполнения черпачок поднимается и в течение некоторого времени охлаждается в верхней части камеры. Затем кран закрывается, пробоотборник отсоединяется от вентиля и помещается над камерой для амальгамирования. После продувки камеры инертным газом, подводимым к ней через кран, черпачок опускается вниз, зажим освобождается и никелевая проволока вынимается из стержня, благодаря чему в камере для амальгамирования остается только черпачок с натрием. Вслед за этим при постоянном токе инертного газа через камеру пробоотборник быстро заменяется колбой со ртутью, после чего производится амальгамирование пробы. Ртуть поступает в камеру через полый стеклянный диск, что способствует разбрызгиванию ее на мелкие капли, которые сбивают пары, образующиеся во время реакции. Перемешивание жидкости в камере осуществляется за счет перемещения в ней черпачка под воздействием сильного магнита. Для полного амальгамирования отобранной пробы натрия достаточно 5—6 порций ртути по 50 мл каждая. После слива ртути в камере остаются лишь окислы щелочного металла и прочие нерастворимые в Hg примеси. Отсутствие натрия в камере можно установить, промыв ее раствором фенолфталеина. Оставшиеся примеси перемешиваются с небольшим количеством дистиллированной воды и немедленно обрабатываются 0,01N раствором соляной кислоты в микробюретке емкостью 5 мл. При этом следует учесть ошибку измерения, вызванную поглощением пробой углекислого газа из окружающей атмосферы. Остальная часть пробы, т. е. амальгама Na, обрабатывается определенным избыточным количеством HCl в целях полного удаления щелочей, после чего может быть произведено определение содержания в ней натрия.

Если проба отбирается только для определения металлических примесей в Na, специальные предосторожности против ее окисления оказываются излишними. В этом случае пробоотборник может заполняться в атмосфере технического азота; можно также непосредственно вводить стеклянные или металлические трубки в поток натрия и отсасывать по ним жидкость в пробоотборник. Отбор проб трубками из стекла «пирекс» успешно применялся вплоть до температур металла 500—600° С, однако при проведении анализа на кислород пользовались такими трубками не рекомендованные вследствие возможного растворения в натрии окислов, входящих в состав стекла.

Как указывалось выше, вместо отбора пробы из потока жидкости иногда используется слив части металла в сосуд, предназначенный для дальнейшей ее обработки и анализа. Одно из подобных устройств показано на рис. 206. Необходимым элементом приспособления является стальной ящик, наполненный очищенным инертным газом и снабженный обогреваемыми трубопроводами 12

и 3 для подвода и слива жидкого металла. В стенке ящика укреплен манипулятор, позволяющий устанавливать металлический стаканчик для Na либо на выходе подводящего трубопровода, либо над горловиной камеры для амальгирования. Жидкий металл под действием собственного веса поступает в стаканчик после открытия вентиля. Стаканчик заполняется после длительной циркуляции натрия через трубопровод 12 и расположенный прямо под ним трубопровод 3. Трубопровод 3 обычно присоединяется к сливному баку системы.

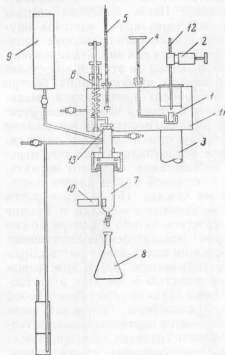


Рис. 206. Приспособление для отбора проб натрия и подготовки их для химического анализа, использующее слив части металла из магистральной.

1 — стаканчик; 2 — вентиль; 3 — слив; 4 — манипулятор; 5 — магнитный стержень; 6 — пружина; 7 — камера; 8 — колба; 9 — сосуд для ртути; 10 — магнит; 11 — общая камера; 12 — трубопровод; 13 — клапан.

По окончании заполнения стаканчик устанавливается над камерой и поднимается с помощью магнита, после чего манипулятор отводится в сторону. Затем открывается клапан и стаканчик с затвердевшим натрием опускается в камеру.

Дальнейшая операция амальгирования пробы полностью аналогична описанной выше для пробоотборника с никелевым черпаком. Дистиллированная ртуть в количестве 40—50 мл добавляется по каплям в верхнюю часть камеры из бачка. Для ускорения процесса амальгирования камера слегка подогревается пламенем газовой горелки, а стаканчик перемещается в ней вверх и вниз при помощи магнита; затем амальгама сливается по капиллярной трубке в колбу. Если описанную операцию повторить 4—5 раз, можно быть уверенным в том, что весь натрий удален из пробы.

Оставшиеся в камере примеси перемешиваются с дистиллированной водой и титруются фенолфталеином с целью определения содержания в них окиси Na. Слитая ранее из прибора амальгама также титруется, что позволяет найти количество натрия в пробе, а затем, используя результат первого определения, вычислить концентрацию кислорода в ней.

Стаканчик для жидкого металла изготавливается обычно из углеродистой стали или из никеля и имеет вид цилиндра диаметром 10 мм и высотой 25 мм. Вновь изготовленные стаканчики отжигаются в среде водорода при температуре $\sim 1000^\circ \text{C}$ с целью удаления пленки окиси с их поверхности. Перед началом отбора проб в камеру помещается несколько стаканчиков (обычно четыре) и весь прибор вносится в сушильный шкаф, где выдерживается в течение полчаса при температуре $\sim 80^\circ \text{C}$. Это позволяет избавиться от паров, адсорбированных их поверхностью. Во время пребывания в шкафу камера продувается инертным газом. Затем в нужный момент пружинный клапан открывается за счет создаваемого в камере избыточного давления газа и стаканчики переносятся на вращающуюся подставку манипулятора, после чего устройство для отбора проб готово к употреблению.

При отборе пробы в ящике прибора поддерживается давление инертного газа, равное 0,2—0,3 *атм*. Для предотвращения утечек газа все стержни, проходящие через стенку ящика, снабжены уплотнениями из термостойкой силиконовой резины. В стенке прибора имеется смотровое окно, позволяющее оператору наблюдать за всеми манипуляциями. Окно изготавливается из электропроводящего стекла. За счет пропускания тока можно поддерживать температуру окна на уровне 200°C и тем самым предотвратить конденсацию паров натрия на его поверхности.

Описанное устройство длительное время применялось для определения содержания окиси в натрии. В диапазоне концентраций кислорода, равном 0,001—0,02%, максимальная ошибка определения составила 0,002%. Прибор также использовался при работе со сплавом Na—K. В этом случае приходилось замораживать пробу в стаканчике с помощью сухого льда во избежание слишком бурного протекания реакции сплава со ртутью.

Методы определения примесей в натрии и сплаве Na—K. Натрий. Следы натрия можно обнаружить методом нейтронной активности, обладающим высокой чувствительностью. Спектрофотометрический метод анализа имеет чувствительность около одного микрограмма Na на литр водного раствора. Для определения оставшегося в системе после ее промывки металла может быть использован метод меченых атомов, для чего в натрий добавляется радиоактивный изотоп Na^{24} .

Кислород. Наиболее широко применяемым методом анализа является описанное выше амальгирование пробы с последующим титрованием отделенных от металла примесей. Этот метод при тщательном его осуществлении дает погрешность в определении кислорода, равную 0,001% (по весу). Если содержание O_2 в пробе превышает 0,015%, погрешность увеличивается до $\sim 0,002\%$. Применение амальгирования позволяет параллельно определять в металле содержание окиси натрия (Na_2O), гидроксида натрия (NaOH) и гидрата окиси ($\text{NaOH} \cdot \text{H}_2\text{O}$). Эффективные результаты дает амальгирование Na непосредственно в холодной ловушке, служащей для

улавливания окиси натрия. Однако часто такой способ неприемлем, так как он связан с использованием больших количеств ртути.

Достаточно точный анализ на кислород может быть также произведен методом, использующим реакцию между натрием и бутилбромидом в ксилене. При этом образуется бромистый натрий, а окись натрия остается непрореагировавшей. Смесь оставшегося после реакции избыточного количества бутилбромида и Na_2O отделяют от бромистого натрия и перемешивают с дистиллированной водой. Содержание бутилбромида в смеси находится с помощью азотнокислого серебра.

Погрешность анализа составляет $\pm 0,003\text{--}0,005\%$ O_2 . В литературе имеются сообщения о повышении точности анализа до $0,0006\%$ O_2 .

Наконец, последний из применяемых методов анализа основан на взаимодействии отобранной пробы Na с графитом при высокой температуре ($t \sim 2300^\circ\text{C}$). Объем окиси углерода, образующейся при этой реакции, зависит от количества кислорода в исходной пробе.

Для приближенного определения содержания O_2 в натрии в условиях эксплуатации используется простое устройство, называемое пробковым индикатором окислов. Пробковый индикатор (рис. 207) представляет небольшой участок трубопровода, включенный в контур параллельно основной магистрали

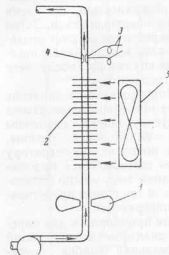


Рис. 207. Пробковый индикатор окислов в натрии.

1 — расходомер; 2 — холодильник; 3 — термометр; 4 — шайба; 5 — вентилятор.

и снабженный соплом (шайбой), расходомером и термпарой, а также устройством для охлаждения циркулирующего металла водой, воздухом и др. Течение жидкости через индикатор происходит за счет действия специального небольшого насоса, либо за счет разности давлений в системе.

Содержание кислорода определяется следующим образом. Приводят в действие холодильник, расположенный перед входом жидкости в зону сужения потока (шайбу), благодаря чему натрий постепенно охлаждается до температуры, соответствующей пределу растворимости в нем окиси. По достижении этой температуры окись натрия начинает выпадать из раствора и образует пробку в наиболее узком сечении канала, т. е. в шайбе, что фиксируется показаниями расходомера. Зная величину температуры, при которой началось образование пробки, и пользуясь кривой растворимости окиси (рис. 50), можно оценить содержание кислорода в металле.

Пробковый индикатор окислов, описанный в работе [90], был установлен на магистрали: $d = 6\text{ мм}$; местное сужение было образовано стальной пластинкой, имеющей восемь отверстий диаметром $1,3\text{ мм}$. Индикатор позволял определять содержание кислорода в пределах $0,0006\text{--}0,024\%$ в Na и Na-K (56% K) при $t = 100\text{--}370^\circ\text{C}$. Всего было проделано около 300 определений, причем результаты сходились с данными химического анализа с точностью $\pm 0,001\%$.

Скорость охлаждения индикатора следует поддерживать не более 3°C/мин . Охлаждение рекомендуется продолжать до тех пор, пока расход натрия не уменьшится наполовину, и убедиться

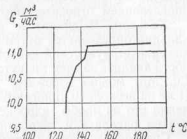


Рис. 208. Снижение расхода натрия через пробковый индикатор в зависимости от его охлаждения.

в том, что уменьшение циркуляции не было вызвано случайными факторами. Не следует допускать полного прекращения циркуляции жидкого металла через индикатор, так как образующаяся пробка окислов может быть тугоплавкой. Через $10\text{--}15\text{ мин}$. после начала нагревания индикатора расход полностью восстанавливается. Кривая, иллюстрирующая падение расхода с уменьшением температуры для одного из типов индикатора, показана на рис. 208 [90]. Помимо простоты конструкции, удобства и надежности в работе, достоинством пробкового индикатора является сравнительно малое время проведения анализа (около получаса).

Поскольку малорастворимыми примесями в Na могут быть не только окислы, но также и другие вещества, например кальций, следует ожидать влияния концентрации этих веществ в металле на работу пробкового индикатора. На практике такого влияния обнаружить не удалось, что можно объяснить сравнительно высокой чистотой анализируемого металла.

Калий. Если заранее известно, является ли сплав Na-K доэвтектическим или заэвтектическим, то относительное содержание калия в сплаве с точностью до 1% может быть найдено по температуре замерзания сплава. В противном случае сведения о том, какая из компонент в сплаве является преобладающей, может дать анализ формы кривой его охлаждения. Действительно, эффект переохлаждения жидкости вблизи точки затвердевания наблюдается только в сплавах, богатых натрием, что связано, очевидно, с образованием химического соединения Na_2K .

Указанные ниже химические методы определения калия являются более точными.

1. Сплав Na-K отбирается в специальную ампулу, взвешивается и обрабатывается спиртом. Затем продукты реакции

титруются кислотой с применением метилоранжа в качестве индикатора. Погрешность метода оценивается в $\pm 0,1\%$ К.

2. Сплав Na—K обрабатывают таким образом, чтобы получить смесь хлористых солей Na и K, относительное содержание которых в смеси находится с помощью азотнокислого серебра. Этот метод имеет примерно такую же точность, как и первый.

Высокой чувствительностью обладает спектрометрический метод анализа, однако точное определение одного из щелочных металлов в присутствии больших количеств другого затруднительно вследствие влияния взаимных помех. Повышение точности анализа может быть достигнуто за счет разделения солей натрия и калия методом ионного обмена с последующим фотометрическим определением относительного содержания солей.

Кальций. В диапазоне концентраций, равном 0,005—0,1%, кальций определяется путем титрования пробы раствором этилендиаминотетрауксусной кислоты (раствор Версена). Снижения точности анализа за счет присутствия в Na ряда металлов (Ni, Co, Fe, Cu, Mn) можно избежать. Весьма малые количества кальция (1 мкг на несколько килограммов натрия) определяются путем выделения его из пробы гидроксидноинионом с последующим осаждением оксалата и титрованием осадка перманганатом.

Спектрографический метод и метод, основанный на измерении нейтронной активности, также могут быть использованы для анализа на Ca.

Углерод. Углерод в натрия обычно определяется следующим образом. Проба нагревается до $t = 950^\circ\text{C}$ в атмосфере кислорода, в результате чего весь углерод превращается в углекислый газ, который затем собирают и взвешивают. Погрешность метода составляет $\pm 4\%$.

Второй метод анализа основан на превращении натрия в сульфат, сжигаемый вместе с горючей жидкостью Ван-Слайка в специальном приборе. Количество образующегося CO_2 находится объемным методом. Точность определения составляет $\pm 0,004\%$ C при содержании углерода в металле порядка 0,01%.

Третий метод анализа заключается в превращении натрия в гидрат окиси (NaOH) при воздействии на него влажного азота с последующим сжиганием остатка.

Водород. Водород, входящий в состав некоторых примесей в Na (NaOH, NaN и др.), определяется нагреванием пробы до 450°C в герметически закупоренной железной капсуле, находящейся в вакууме. Объем диффундирующего через стенку капсулы водорода измеряется; погрешность анализа составляет $\pm 0,2\%$.

Применение этого метода по отношению к сплаву натрий — калий не дало удовлетворительных результатов вследствие неполноты превращения KOH в окись калия при нагревании.

Принципиально возможно определение содержания гидрида натрия в Na с помощью устройства, аналогичного пробковому индикатору окислов, поскольку предел растворимости гидрида

в металле известен (рис. 51). На точность анализа может повлиять примесь окиси натрия в системе.

Металлы. Подготовка к проведению анализа натрия или калия на металлические примеси заключается в следующем. Отобранный из системы металл обрабатывается спиртом (этиловым, метиловым), в результате чего образуется алкогольат натрия (или калия). Эта операция продлевается при комнатной температуре, желательно под защитой инертного газа (азота), так как наличие в пробе перекисей щелочных металлов, в особенности калия, может придать реакции характер взрыва. Необходимо следить за тем, чтобы не происходило интенсивного испарения спирта и уноса части пробы вместе с его парами. С этой целью металл пробы замораживают, разрезают на мелкие кусочки и добавляют постепенно в смесь спирта с сухим льдом. К продуктам реакции после повышения их температуры до комнатной добавляется некоторое количество кислоты. Замедления реакции можно добиться, поместив натрий под слой минерального масла в химическом стакане и медленно заливая спирт в стакан в среде инертного газа. Подготовка пробы к анализу заканчивается растворением приготовленного алкогольата в воде.

Наиболее удобным и точным методом анализа на металлические примеси в натрии или калии является спектрографический метод, который может быть применен в широком диапазоне концентраций определяемых элементов (табл. 54).

Таблица 54

Чувствительность спектрографического метода определения некоторых элементов в щелочных металлах

Элемент	Определяемые количества, %	
	от	до
Алюминий	0,0025	0,025
Барий	0,0005	0,012
Кальций	0,0120	1,250
Медь	0,0025	0,125
Железо	0,0025	0,125
Калий	0,0250	1,250
Магний	0,0025	0,050
Никель	0,0120	0,125
Кремний	0,0050	0,125
Стронций	0,0005	0,012

Содержание некоторых металлических примесей находится методом радиохимического анализа. При этом может изучаться растворимость в натрии элементов, входящих в состав конструк-

ционных сталей в качестве основных компонентов или примесей, например, Fe, Co, Cr, Ta, Mn, Ag, Zn, Cd, Sb, Sn, Cs. Высокая чувствительность радиохимического анализа (табл. 55) делает его применение в ряде случаев единственно возможным для количественного определения примесей. Погрешность метода составляет примерно $\pm 10\%$ от определяемой величины.

Таблица 55

Чувствительность радиохимического анализа по отношению к некоторым элементам периодической таблицы

Na	Mg																	Al	Si	P	S	Cl
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br						
Rb	Sr	V	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I						
Cs	Ba	RE	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At						
Fr	Ra	Ac	Th	Pa	U																	

Обозначения: — плохая чувствительность (количество элемента, необходимое для проведения точного анализа, составляет 0,1—10 микрограмм);

 — хорошая чувствительность (необходимое количество элемента составляет 10^{-3} — 0,1 микрограмм).

RE — редкоземельные элементы.

Для некоторых металлов результаты анализа, полученные методами нейтронной активности и обычными химическими, сильно расходятся между собой. Например, содержание железа в натрии, отобранном из действующего контура, по данным радио-химического анализа оказывается обычно в 100—1000 раз меньшим, чем по данным обычного химического анализа, проводимого, например, по колориметрическому методу.

Перед проведением химического анализа на содержание металлов проба обрабатывается концентрированной соляной кислотой с последующим фильтрованием осадка, что позволяет частично отделить примеси, остающиеся в фильтрате, от основного металла. Химические методы анализа натрия и калия обычно используются для определения следующих примесей: хлоридов, азота, фосфатов, сульфатов, тяжелых металлов и железа.

Особый интерес представляет определение ртути в натрии и натрия в ртути, так как ртуть используется в жидкометаллических теплообменниках для заполнения пространства, разделяющего трубчатые системы теплоносителей, непосредственный контакт между которыми недопустим (например, вода и натрий). Большие количества ртути в щелочном металле определяются экстрагированием натрия из пробы с последующим взвешиванием остатка. Для определения малых количеств ртути лучше всего использовать спектрографический метод.

При содержании ртути в натрии или калии около $5 \cdot 10^{-6} \%$ проба обрабатывается так, чтобы ртуть оказалась в растворе солей щелочных металлов, откуда она затем извлекается амальгированием медного порошка в подкисленном растворе хлоридов.

46. Очистка натрия и сплава Na—K

Если не очищать периодически или непрерывно щелочные металлы от окислов, то с течением времени магистрали системы оказываются полностью закупоренными. Образование пробок окислов в трубопроводах более характерно для натриевых контуров, чем для натрий-калиевых, что связано с меньшим содержанием кислорода в Na—K по сравнению с натрием, так как Na в сплаве окисляется избирательно (см. гл. II). Максимальное количество кислорода, находящегося в Na в виде взвешенных частиц окислов, составляет 0,04—0,06% (по весу), в то время как в сплавах Na—K оно равно 0,02—0,03%.

Фильтрация. Хорошим методом очистки натрия от нерастворимых примесей является фильтрация. В качестве фильтрующего материала используются, главным образом, пористые насадки из нержавеющей стали или стекла и, в меньшей степени, металлическая сетка. Практика использования фильтров со стеклянными насадками ограничивается лабораторными опытами, проводившимися при сравнительно низкой температуре. Фильтры, изготовленные спеканием порошка нержавеющей стали, имеют средний размер пор, равный 10 мк.

Жидкометаллический контур, как правило, оборудуется фильтром, установленным на загрузочной магистрали. Во время эксплуатации установки в фильтре постепенно накапливаются окислы и прочие нерастворимые примеси. В связи с этим перепад давления, необходимый для определенного расхода жидкости через загрузочную линию, по мере увеличения времени работы установки возрастает.

Можно рассчитать, что при среднем размере отверстий фильтра, равном 5 мк, перепаду давления в 1 ата соответствует расход натрия через фильтр $\sim 4000 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{час}$, если температура металла составляет 120–150°С. Эти данные подтверждаются опытом.

Трудности, связанные с постепенным закупориванием фильтров, могут быть уменьшены, если их конструкция предусматривает возможность периодической очистки или промывки.

Коэффициент полезного действия фильтра с пористой металлической насадкой, т. е. отношение улавливаемого им количества окислов к общему количеству окислов в металле, проходящем через насадку, колеблется от 80 до 95 % в зависимости от условий фильтрации. К. п. д. повышается с увеличением количества окислов в исходном металле. Фильтры с пористыми насадками из нержавеющей стали улавливают частицы с размерами до 1—2 мк [135].

Применение фильтров способствует очистке натрия не только от окислов, но также и от других нерастворимых примесей, например от опилок, стружки и шлака, попадающих внутрь контура при монтаже и ремонте.

Очистка в холодных ловушках. Простейшая холодная ловушка представляет некоторую емкость, в которой циркулирующий металл охлаждается до температуры, соответствующей пределу растворимости в нем какой-нибудь примеси, например окиси, благодаря чему примесь высаживается в ловушке.

Холодные ловушки бывают двух типов: а) отстойники, в которых осаждение примесей происходит за счет диффузии последних из основного потока в область сравнительно низких температур (диффузионные ловушки); б) ловушки с принудительной циркуляцией металла, в которых натрий охлаждается по ходу движения.

Первый тип ловушки показан на рис. 209. Присоединенный к основной магистрали системы отстойник охлаждается за счет конвекции окружающего воздуха. Длина корпуса отстойника должна быть такой, чтобы обеспечить снижение температуры в нижней его части до 120—150° С. Как показывает опыт, при температуре натрия в основном трубопроводе, равной 500—600° С, эта длина составляет 250—300 мм. Диффузионная ловушка очищает натрий главным образом от окиси. Содержание окиси в металле, находящемся в отстойнике, после длительной работы ловушки может доходить до 20 % и более. Описан случай, когда в трубке длиной 12 мм, использованной в качестве диффузионной ловушки, количество Na_2O составило 70 % от всего содержимого трубки.

Конструкции применяемых в настоящее время отстойников нельзя еще считать окончательно отработанными. Наибольшее распространение получили ловушки в виде цилиндрического сосуда, соединенного с системой трубкой того же диаметра, что и основная магистраль; при этом отношение объема отстойника к объему всей системы составляет 0,01—0,03.

Выбор места установки диффузионной ловушки в системе не имеет большого значения, хотя с точки зрения интенсивности очистки лучше, чтобы ловушка была установлена на горячем участке контура, когда между верхней и нижней частями отстойника имеется максимальная разность температур. В то же время желательно, чтобы потери тепла, вызываемые ловушкой, не были велики. В том случае, когда эти потери должны быть минимальными, предпочтительнее установить отстойник на холодном участке контура.

В ловушках диффузионного типа высаживаются примеси некоторых металлов в натрий, например железо, кобальт, никель. Наблюдалось даже, что наличие отстойников в системе приводило к усилению агрессивного воздействия натрия на нержавеющую сталь. При этом в ловушке постепенно накапливались некоторые вещества, входящие в состав стали (Fe, Cr, Ni), за счет переноса их из более горячих участков контура. Механизм переноса неясен,

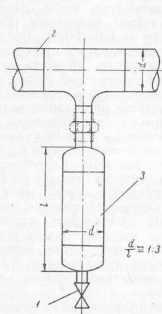


Рис. 209. Холодная ловушка диффузионного типа.

1 — дренажный вентиль; 2 — основной трубопровод; 3 — отстойник для окислов.

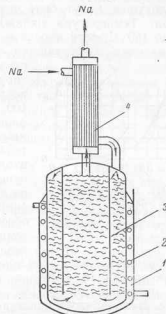


Рис. 210. Холодная ловушка с принудительной циркуляцией натрия.

1 — прокладка (жидкая); 2 — змеевик; 3 — насадка; 4 — экономайзер.

хотя можно предположить, что он сопровождается взаимодействием переносимого элемента с натрием и кислородом в натрии, поскольку большему содержанию окиси в системе обычно сопутствует большая интенсивность переноса. Отметим, что перенесенные в отстойник вещества могут быть постепенно возвращены обратно в систему, если ловушку нагреть до температуры циркулирующего натрия.

Перейдем теперь к описанию холодных ловушек с непрерывной принудительной циркуляцией металла. Такие устройства для очистки являются наиболее подходящими для крупных установок.

Конструкция ловушки вместе с теплообменником-экономайзером схематически показана на рис. 210. Ловушка устанавли-

вается параллельно основной магистрали системы, причем циркуляция металла через нее осуществляется либо за счет разности давлений в основном трубопроводе, либо специальным насосом. Установка теплообменника-экономайзера совместно с ловушкой не обязательна, но желательна, так как позволяет поддерживать температуру жидкости на выходе из устройства для очистки равной температуре ее на входе. В качестве охлаждающих сред для ловушек могут быть использованы вода, масло, даутерм, толуол. Температура охлаждения натрия выбирается обычно равной 150° С, хотя иногда ее снижают до 130—140° С. Внутренняя набивка изготавливается преимущественно из прессованной

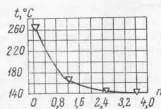


Рис. 211. Снижение температуры начала выпадения окислов в натрии, прошедшем через холодную ловушку n раз.

стальной проволоки. Ловушки проектируются на оптимальный расход жидкости, меняющийся в пределах 5—100 л/мин; время пребывания металла в них должно составлять не менее трех минут. Сечения внутренних каналов теплообменника-экономайзера, а также входных и выходных патрубков ловушки, выбираются возможно большими во избежание закупоривания их окислами. Система охлаждения должна обеспечивать равномерное снижение температуры металла по ходу его течения, в противном случае возможно

образование местных скоплений окислов внутри набивки. Удачно спроектированная ловушка может снизить содержание кислорода в натрии до 0,001%.

Желательно, чтобы очистка металла во время работы установок была непрерывной. Если в системе в начальный момент времени нет окислов в нерастворенном состоянии, то зависимость общего содержания в ней кислорода от времени может быть выражена следующим уравнением:

$$\frac{x - x_c}{x_0 - x_c} = e^{-\frac{Q}{W\tau}} \quad (101)$$

где x_0 — исходное содержание O_2 , %;

x_c — содержание O_2 , соответствующее пределу растворимости окислов при температуре холодной ловушки, %;

x — содержание O_2 в данный момент времени, %;

Q — объемный расход жидкости через ловушку, $m^3/час$;

W — общий объем системы, m^3 ;

τ — время работы ловушки, час.

Для снижения концентрации O_2 в системе до величины x_c требуется пропустить весь металл через ловушку примерно три раза (рис. 211).

Общее количество окислов, осаждаемое в ловушке за один цикл ее работы (до промывки), составляет не менее 10%

(по весу) Na_2O от общего количества натрия, которое она может вместить.

Холодные ловушки обеспечивают длительную эксплуатацию установок без загрязнения их окислами. Например, Холлом и Крофтом отмечается, что без ловушки их установка проработала всего несколько сотен часов, после чего опыты были прекращены из-за чрезмерного накопления окислов в системе. После установки холодной ловушки контур работал в течение 10 000 час. без загрязнения окислами.

Химическая очистка. Химическая очистка Na от кислорода заключается в добавлении в систему веществ, восстанавливающих его окись. Такие вещества можно выбрать, сравнивая термохимические характеристики реакций окисления различных элементов. Данные вещества не всегда могут оказаться пригодными. Например, окись бериллия обладает большей свободной энергией образования, чем окись натрия; однако бериллий в реально существующих условиях не восстанавливает Na_2O .

Вещества-восстановители могут быть разбиты на два класса. К первому из них относятся элементы, которые сами хорошо растворяются в жидком металле, но образуют малорастворимые окисы. Типичным примером такого элемента служит кальций, добавка которого в Na в количествах не менее одного процента была осуществлена на практике. Оказалось, что в большинстве случаев примесь кальция усиливает агрессивное воздействие жидкого металла на нержавеющую сталь, хотя, с другой стороны, были отмечены факты уменьшения коррозии в присутствии кальция. Очевидно, уменьшение коррозии связано с восстановлением окиси натрия, агрессивное воздействующей на ряд материалов (см. гл. IV). К этому же классу веществ относятся литий, магний и барий, которые, в противоположность кальцию, не ухудшают коррозионной стойкости стали.

Нерастворимые окисы элементов-восстановителей удаляются из системы фильтрацией или высаживаются в холодной ловушке, если она имеется в контуре. Одновременное использование веществ-восстановителей и ловушек не обязательно.

В литературе отсутствуют данные по удалению нерастворимых окислов магния, лития и бария в холодных ловушках.

Ко второму классу относятся вещества, которые сами нерастворимы в натрии и образуют нерастворимые окислы, например, уран, титан, цирконий.

В случае необходимости химические методы могут быть использованы для удаления Na из K и K из Na. Натрий из калия удаляется путем добавки в металл-кислорода с последующим удалением Na_2O фильтрацией или высаживанием в холодных ловушках. Удалить небольшое количество калия из натрия можно, нагревая металл до 300° С вместе с графитом и затем фильтруя его. При этом концентрация калия снижается до ~0,003%.

Аналогичные методы принципиально возможны для удаления Са из Na и Na из Са.

В практике эксплуатации жидкометаллических установок химические методы использовались в основном для очистки натрия от кислорода. Химическая очистка Na применялась также при испытаниях материалов на коррозионную стойкость. В частности, при испытаниях образцов из циркония натрий химически очищался от нитридов, гидридов и щелочи.

Добавляя в систему ядерного реактора вещества-восстановители, следует учитывать их ядерные свойства. Для этой цели нельзя применять элементы с большим поперечным сечением захвата нейтронов, а также элементы, продукты облучения которых в реакторе обладают значительным периодом полураспада или являются источниками радиоактивных излучений больших энергий.

Дистилляция. На первых этапах применения жидких металлов в качестве теплоносителей дистилляция использовалась для удаления из натрия кислорода. Впоследствии оказалось, что холодные ловушки обеспечивают не менее высокое качество очистки, чем дистилляционные установки; в то же время они более дешевы в производстве и удобны в эксплуатации. Однако дистилляция дает возможность очистить Na от щелочей и щелочно-земельных элементов, а также производить сверхтонкую очистку от всех примесей. Так, за счет вакуумной дистилляции чистота Na может быть доведена до 99,9995%.

47. Техника безопасности и противопожарная техника при работе со щелочными металлами

Щелочные металлы требуют специального рассмотрения с точки зрения техники безопасности и противопожарной защиты вследствие их высокой реакционной способности по отношению ко многим веществам. Так как опыт длительной эксплуатации жидкометаллических установок был накоплен, в основном, при работе с натрием и сплавом натрий — калий, приводимые ниже сведения по технике безопасности относятся почти исключительно к этим металлам. Следует ожидать, что меры техники безопасности при работе с литием должны быть аналогичными.

Соблюдение надлежащих мер предосторожности обеспечивает безопасность работы со щелочными металлами даже при высоких температурах и давлениях, причем эти предосторожности не больше, чем те, которые требуется применять при обращении с другими горючими и взрывоопасными материалами, производимыми ежедневно в количестве многих тонн. Как показал опыт эксплуатации установок на щелочных металлах в Ноллзской лаборатории атомной энергии (США), непрерывный период безопасной работы установок исчисляется десятками тысяч часов, если соблюдены меры техники безопасности.

Опасные для здоровья свойства щелочных металлов. Свойства Na, K и их сплавов, с точки зрения вреда для здоровья и опасности возникновения пожаров, сходны, однако:

1) в отличие от Na и K, их сплавы, применяемые в качестве теплоносителей, являются жидкими при комнатной температуре;

2) в отличие от натрия, калий при взаимодействии с кислородом воздуха образует перекиси, реакция которых с некоторыми органическими веществами носит взрывной характер.

Натрий и натрий-калий самовоспламеняются на воздухе при температуре порядка 120° С. Температура воспламенения зависит от величины относительной поверхности металла (степени измельчения) и влажности воздуха. После воспламенения температура горящей массы быстро повышается до 800—900° С. Натрий не может гореть в атмосфере, содержащей менее 5% кислорода.

Выделяющаяся во время горения натрия окись (в виде дыма) при попадании в дыхательные пути действует сильно раздражающим образом, однако не вызывает хронического поражения.

Щелочные металлы бурно взаимодействуют с водой, выделяя достаточное количество тепла для воспламенения образующегося водорода на воздухе. Если реакция происходит в замкнутом сосуде, выделение водорода приводит к резкому повышению давления в нем.

Попадание расплавленных щелочных металлов на кожу человека опасно вследствие возможности ожогов, вызываемых термическим и химическим воздействием металла. Такие ожоги требуют более продолжительного лечения по сравнению с обычными ожогами.

Известны многие случаи, когда при смешении перекисей щелочных металлов с углеводородами происходили сильные взрывы. Натрий может окисляться до перекиси на воздухе лишь при температуре выше 250° С, калий же дает перекись при комнатной температуре. Как перекись калия, так и перекись натрия восстанавливаются до окиси при длительном соприкосновении с жидким металлом. Поэтому в жидком металле, защищенном подушкой инертного газа, образование перекисей исключено. Однако во всех случаях при использовании углеводородов в натрий-калиевых контурах (для промывки и т. п.) следует соблюдать особую осторожность.

Меры техники безопасности, принимаемые во время эксплуатации контура. Конструкция системы должна предусматривать возможность быстрого слива жидкого металла. Линии слива должны все время поддерживаться при температуре, превышающей температуру наиболее холодного участка контура во избежание выпадения малорастворимых примесей в линии слива. Важно обеспечить хорошую вентиляцию системы инертного газа путем соединения всех газовых полостей между собой.

Защитная способность некоторых материалов по отношению к действию жидкого Na и сплава Na—K

Материал	Температура, °C				
	150	350		550	
	Na—K	Na	Na—K	Na	Na—K
Защита					
Стекло для обычных защитных очков	—	—	—	Хорошая	Хорошая
Стекло для защитных очков сварщика	—	—	—	"	"
Кожа (хромовая)	Хорошая	Хорошая	Хорошая	"	"
Листовой бакелит	"	"	"	"	"
Резина (для перчаток)	"	"	Плохая	Плохая	Плохая
Ацетат целлюлозы (для защиты лица и глаз)	"	"	"	"	"
Сукно	Удовлетворительная	Плохая	"	"	"
Хлопчатобумажная ткань	Плохая	"	"	"	"

Даже в том случае, если приняты меры к быстрому сливу, часть металла все же успеет вытечь и нужно принять меры для его обезвреживания. Вытекший натрий и сплав натрий — калий обычно сразу же воспламеняются, но горят сравнительно спокойно. Снабженный противогАЗами обслуживающий персонал может подходить к месту пожара, если нет опасности взаимодействия с водой, вызывающего разбрызгивание горящего металла. Для предотвращения попадания горящего натрия или сплава Na—K на бетонный пол должны использоваться металлические противни, так как тепло, выделяющееся при горении, вызывает раскалывание бетона.

Средства защиты персонала от поражения щелочными металлами. В том случае, когда давление в системе невелико, вполне достаточна степень защиты, создаваемая термической изоляцией оборудования. При повышенных давлениях необходима специальная защита. Часто применяется огораживание опасной зоны металлическими листами; при этом на полу устанавливаются металлические противни. Для уменьшения разбрызгивания металла при появлении течи необходимо быстро сбросить давление в системе.

Хорошей мерой защиты персонала от воздействия окиси натрия или калия при пожаре является вентиляция помещения.

Персонал, непосредственно обслуживающий жидкометаллические установки, имеет защитную одежду, отличную от той, которая требуется при проведении противопожарных работ.

С целью выбора материалов для изготовления средств защиты людей, работающих с расплавленными щелочными металлами, были произведены специальные испытания, результаты которых представлены в табл. 56. Как видно из таблицы, при одной и той же температуре, например при 350° C, действие сплава Na—K оказывается иногда более агрессивным, чем действие натрия. Это связано с тем, что натрий затвердевает после соприкосновения с защитным материалом, а сплав остается жидким.

Для защиты глаз используются очки, плотно прилегающие к лицу. Щитки из несгораемого материала используются в дополнение к этим очкам, но не в качестве их замены. Для защиты головы вполне пригодной является войлочная шляпа с широкими полями, а для защиты рук и ног — кожаные рукавицы и ботинки. Лица, работающие со щелочными металлами, должны быть одеты в просторные комбинезоны, а если есть возможность — в костюмы из огнеупорного материала. Специальной защиты дыхательных путей для этой категории персонала не требуется.

Защитная одежда при борьбе с пожаром. Поскольку персонал, который должен тушить горящий натрий или натрий-калий, снабжается респираторами (противогАЗами), специальная защита глаз не нужна. Для защиты головы в дополнение к войлочной шляпе применяется широкий капюшон из асбестовой ткани. Для защиты ног используются специальные ботинки из кожи

или асбестовой ткани, надеваемые поверх обычных рабочих ботинок. Аналогичным образом осуществляется защита рук. Для защиты тела применяются костюмы из асбестовой ткани, предохраняющие от брызг металла и от огня. В некоторых случаях могут быть использованы портативные металлические щиты. Для защиты органов дыхания от действия дыма окиси натрия используются респираторы типа фильтров. Предпочтительны респираторы самоочищающегося типа, пригодные при любой концентрации дыма. Все типы респираторов (противогАЗов) должны полностью закрывать лицо.

Первая помощь при поражении щелочными металлами. Промывание пораженных участков кожи может быть произведено водой с одновременной нейтрализацией образующейся щелочи слабым раствором уксусной кислоты (от 3 до 5%). Раствор кислоты нельзя применять для промывания глаз. В случае ожога глаз пораженный участок должен быть сначала промыт в течение 10—15 мин. струей чистой воды под слабым напором, а затем слабым раствором борной кислоты.

Особенно опасно, если брызги натрия или сплава натрий — калий попадают на одежду или кожу вместе с керосином. В таком случае наилучшим средством является промывание пораженного участка сильной струей воды.

Существует мнение о том, что промывание кожи целесообразнее

производить минеральным маслом при одновременном удалении частиц металла пинцетом. Такой способ промывания, безусловно, безопаснее, чем первый, т. е. промывание водой и кислотой; однако он не обеспечивает нейтрализации щелочи, глубоко проникающей в ткани.

Противопожарная техника. Для того чтобы потушить горящий натрий или сплав натрия — калий, необходимо прекратить доступ кислорода к очагу горения. При тушении пожара нельзя применять воду, четыреххлористый углерод, углекислый газ и бикарбонат натрия (двууглекислую соду). Доступ кислорода может быть прекращен засыпанием горящего натрия или сплава Na—K сухими хлоридами щелочных металлов, графитом, порошком безводной соды (Na_2CO_3) или песком. При этом опасность воспламенения натрия и возобновления пожара полностью не ликвидируется.

Действенным средством борьбы с пожаром является снижение концентрации кислорода в опасных местах. Опыты показали, что в атмосфере, содержащей 2,75% кислорода, из общего количества в 22 кг натрия сгорает 0,6 кг (начальная температура металла 450° C), а при содержании кислорода 7% из 17 кг Na сгорает 2,9 кг (при той же температуре).

Для тушения горящих щелочных металлов в некоторых лабораториях США используется порошок Met-L-X, который представляет собой специально обработанный хлорид натрия, обладающий хорошей сыпучестью и нечувствительный к изменениям влажности воздуха. Огнетушители, наполняемые этим порошком, изготавливаются емкостью в 9; 15; 70 и 155 кг. Порошок Met-L-X обладает тем ценным свойством, что при нагревании он образует на поверхности горящего натрия плотную корку, изолирующую расплавленный металл от кислорода воздуха. Образование корки облегчается, если металл горит на ровной горизонтальной поверхности.

Для тушения горящих щелочных металлов используется также пиреновый порошок марки G-1, состоящий в основном из графита.

Во всех случаях в районе пожара рекомендуется устанавливать металлические противни для стока горящего металла. Сверху противень может быть покрыт перфорированным железным листом, через отверстия в котором металл затекает внутрь противня. При этом доступ кислорода к поверхности металла ограничивается. Перфорированный лист дополнительно может быть покрыт слоем порошка Met-L-X.

Загоревшийся литый лучше всего тушить порошком G-1. Стандартные огнетушители, даже углекислотного типа, неэффективны и их применение может быть опасным, так как Li взаимодействует с углекислым газом.

Удаление остатков щелочных металлов после тушения пожара так же опасно, как и само тушение. Остатки металла следует осторожно перемешать с сухой содой и затем сжечь.

Во время пожара необходимо обеспечить максимально интенсивную вентиляцию помещения, так как выделяющийся при горении дым окиси не только затрудняет дыхание, но и резко ухудшает видимость.

Специфические требования техники безопасности при работе с радиоактивным натрием. В результате захвата натрием нейтронов в активной зоне реактора образуется радиоактивный изотоп Na^{24} . Расчеты показывают, что уровень активности Na^{24} в энергетическом реакторе мощностью порядка 50 000 *квт* находится в диапазоне 10^4 — 10^7 кюри. Na^{24} является мощным излучателем β -частиц с максимальной энергией $\sim 1,4$ Мэв и γ -частиц с максимальной энергией 2,76 Мэв. Он обладает периодом полураспада, равным 14,8 часа.

Почти весь Na^{24} , попавший в организм человека через пищевой тракт или дыхательные пути, быстро и равномерно распределяется в нем благодаря кровообращению. По нормам США, максимально допустимое общее количество изотопа Na^{24} в организме составляет 15 микрокюри. Сравнительно большая величина допустимой дозы объясняется тем, что скорость биологического вывода Na^{24} из организма довольно велика.

Очевидно, наиболее серьезная опасность для здоровья может возникнуть во время течи радиоактивного натрия в какой-либо системе и его воспламенения.

Максимально допустимая концентрация изотопа Na^{24} в воздухе по нормам США равна $2 \cdot 10^{-6}$ микрокюри/мл.

Защитная одежда при работе с радиоактивными щелочными металлами должна удовлетворять всем требованиям, относящимся к работе с нерадиоактивным металлом и, кроме того, требованиям, относящимся к работе с радиоактивными изотопами. Помещение, где установлено оборудование натриевого контура, должно быть снабжено приборами, указывающими уровень активности в нем, и соответствующей сигнализацией.

При попадании радиоактивного натрия на одежду следует немедленно снять ее с пострадавшего и промыть пораженные участки кожи сильной струей воды.

Тушение пожара, вызванного течью радиоактивного натрия, должно, как правило, производиться дистанционно путем прекращения доступа воздуха в помещение с очагом пожара и одновременной подачи инертного газа в это помещение. В последнем случае необходимо вывести зараженные газообразные продукты горения в атмосферу или в отведенную для этого зону. Иногда тушение пожара производится порошком Met-L-X, подаваемым к очагу горения системой специальных трубопроводов.

Если установлено, что натрий не содержит примесей долгоживущих радиоактивных изотопов, уничтожение его отходов может быть произведено обычными способами после выдержки в течение двух-трех недель.

48. Техника безопасности при работе со ртутью, свинцом, оловом и висмутом

Ртуть. Токсичность ртути очень велика и это заставляет принимать особые меры к обеспечению безопасности людей, обслуживающих ртутные установки. По нормам, принятым в США, максимально допустимое содержание ртути в воздухе составляет $0,1 \text{ мг на } 1 \text{ м}^3 \text{ воздуха}^1$. По данным Хилла, при 20°C упругость насыщенных паров ртути составляет $0,00182 \text{ мм рт. ст.}$ Отсюда можно рассчитать, что в нормальных условиях ($p = 760 \text{ мм рт. ст.}$, $t = 20^\circ\text{C}$) насыщению воздуха ртутными парами соответствует содержание ртути в атмосфере, равное 199 мг/м^3 , т. е. много больше допустимого предела.

Когда ртуть разливается по поверхности пола, стола и т. д., ее испарение облегчается, к тому же пыль и грязь препятствуют слипанию отдельных капелек металла и это также способствует испарению.

Для определения концентрации ртутных паров в воздухе используется прибор, основанный на поглощении парами ртути ультрафиолетовых лучей определенной длины волны, соответствующей линии ртути в спектре. Интенсивность поглощения измеряется чувствительным фотоэлементом.

Присутствие ртутных паров в воздухе может быть обнаружено по почернению листа бумаги, покрытого слоем сульфида селена (SeS).

При повышении концентрации ртутных паров сверх допустимого предела следует тщательно очистить помещение от ртути, используя аммоний или полисульфиды, растворенные в воде.

Помещение для работы со ртутью должно быть снабжено достаточно мощной вентиляцией.

Свинец. Свинец является весьма вредным для организма человека веществом. В особенности опасно для здоровья вдыхание или проглатывание паров свинца и мелкой свинцовой пыли. Опасность отравления свинцом увеличивается с уменьшением размеров частиц металла, причем вдыхание частиц более вредно, чем их проглатывание. Свинец попадает сначала в кровь человека; затем часть металла уносится из организма вместе с его выделениями, но часть остается, откладываясь в костях. Если отравившийся человек перестает подвергаться вредному действию свинца, то количество находящегося в его крови металла начинает постепенно уменьшаться. При этом возможна новая вспышка болезни, так как свинец, накопившийся в костях, может переходить обратно в кровь.

Помещения для работы со свинцом должны содержать в исключительной чистоте и быть оборудованы мощной венти-

ляцией. Персонал, работающий со свинцом, должен проходить периодическую проверку состояния здоровья (не реже одного раза в шесть месяцев).

Олово и висмут. Токсичность олова и висмута не столь велика, как токсичность ртути и свинца, однако помещения для работы с этими металлами должны быть в обязательном порядке оборудованы вентиляцией, исключающей возможность накопления паров металла в воздухе.

¹ Санитарные нормы СССР допускают концентрацию $0,01 \text{ мг/м}^3$. Ред.

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

НЕКОТОРЫЕ СОВЕТСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ

В этом разделе в сжатой форме рассмотрены некоторые результаты советских исследований жидкометаллических теплоносителей.

Рассматриваются результаты исследований по теплообмену и гидравлике жидких металлов, по определению их теплофизических констант, по выбору конструкционных материалов для жидкометаллических систем, по получению необходимой чистоты некоторых металлов, по расчету и созданию конструкций насосов, арматуры и измерительных приборов для жидких металлов.

Ртуть является первым из жидкометаллических теплоносителей, подвергнувшихся достаточно всесторонним теплофизическим исследованиям еще в довоенные годы. Эти исследования были организованы в Центральном Котлотурбинном институте с 1935—1936 гг. в специально созданной лаборатории. В первую очередь имелось в виду исследование теплообмена при течении ртути в трубах при кипении и отсутствии кипения, а также изучение процесса конденсации ртутного пара и гидродинамики потока ртути.

Постановка указанных исследований была вызвана необходимостью получения надежных расчетных данных, поскольку ртуть по своим теплофизическим свойствам резко отличается от воды и других ранее исследованных жидкостей. К числу специфических свойств ртути относятся: высокая теплопроводность, малая теплоемкость и вязкость жидкой фазы и паровой фазы, высокое поверхностное натяжение, обуславливающее несмачиваемость ртутью поверхности труб. Другие жидкие металлы также сильно отличаются своими свойствами от воды.

49. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при течении жидких металлов в трубах

Теплообмен без кипения. Первые исследования теплообмена при течении ртути внутри трубы были проведены в 1936—1938 гг. [20]. Исследования проводились на установках с радиационным электрообогревом при высоте обогреваемого участка 0,97—1,5 м и диаметре 16 мм, а также при течении ртути в коль-

цевом канале с эквивалентным диаметром 14,6 и 30,4 мм. Тепловая нагрузка изменялась в пределах 45 000—120 000 ккал/м²·час, температура ртути 360—450°С, число Рейнольдса — 50 000—220 000.

Сопоставление полученных в ЦКТИ экспериментальных данных с расчетом по эмпирическим формулам типа Крауссольтца, Кокса и др. ($Nu = ARe^mPr^n$) и по теоретическим формулам Прандтля — Кармана показало, что экспериментальные точки лежат значительно выше расчетных по Прандтлю — Карману и значительно ниже расчетных по Крауссольтцу.

При построении зависимостей типа $Nu = f(Re, Pr)$ допускались некоторые условности, в частности вызванные отсутствием надежных данных о теплоемкости жидкой ртути при температуре свыше 100—150°С. Анализ экспериментальных данных был также затруднен нестабильностью замеренных коэффициентов теплоотдачи при опытах с трубами из углеродистой и легированной стали. Трубы из углеродистой стали имели большую относительную шероховатость, и на них быстрее возникала и разрушалась оксидная пленка. При сопоставлении экспериментальных данных с расчетом по эмпирическим формулам $Nu = f(Re, Pr)$ учитывалось, что эти формулы получены в опытах с жидкостями, у которых $Pr = 0,7 \div 200$, тогда как у ртути при температуре 300—500°С число $Pr = 0,008 \div 0,009$.

В 1939—1940 гг. в той же лаборатории ЦКТИ были проведены более детальные исследования теплообмена к некипящей ртути [27]. Опыты велись на вертикальных трубах с высотой обогреваемого участка до 2,7 м при диаметре 16; 32; 40 и 42 мм. Тепловая нагрузка могла изменяться в пределах 45 000—150 000 ккал/м²·час, температура ртути — в пределах 450—520°С, число Рейнольдса — 180 000—360 000. Полученные в опытах величины коэффициентов теплоотдачи были более стабильны, в частности вследствие применения труб только из легированных сталей, а сам диапазон параметров (температура — скорость) был более широк по сравнению с ранее описанными первыми опытами. Результаты опытов обработаны в координатах $Nu = f(Re)$ и в таком виде рекомендованы для практических расчетов.

Из первых опытов ЦКТИ были сделаны следующие основные выводы:

1. Теплообмен при течении ртути в трубе не может рассчитываться по известным теоретическим и эмпирическим формулам. Для расчетов можно пользоваться полученными графическими зависимостями $\alpha = f(Re)$ или $Nu = f(Re)$.

2. Следует учитывать возможное снижение величины коэффициента теплоотдачи вследствие возникновения оксидной пленки на поверхности теплообмена, особенно при трубах из углеродистой стали.

3. В условиях опытов не выявлено зависимости коэффициента теплоотдачи от тепловой нагрузки.

В 1941 г. исследования были прекращены. После 1946 г. была

проведена дополнительная серия опытов по теплообмену в некипящей ртути, в частности при движении ртути по спиральной трубе в условиях принудительной циркуляции. Было отмечено, что искусственная турбулизация потока ртути (за счет спиральной траектории) несколько повышала эффективность теплообмена. Возможно, что этот эффект связан с разрушением окисной пленки. Подобный эффект наблюдался и в довоенных опытах, когда в обогреваемую трубку вводился сердечник, вызывавший турбулизацию потока ртути.

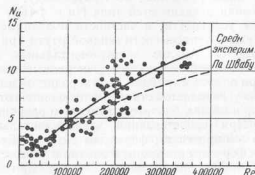


Рис. 212. Теплообмен в жидкой ртути.

Первую эмпирическую формулу для расчета теплообмена при течении жидкого металла в обогреваемой трубе предложил в 1951 г. А. А. Канаев на основе обработки довоенных и послевоенных опытов с ртутью [12].

В безразмерных величинах эта формула имела вид $Nu = f(Re) = f'(Re, Pr)$. Поскольку в большинстве опытов температура ртути была близка к 500°C , то выявить раздельное влияние чисел Re и Pr на величину числа Nu не представлялось возможным. При обработке экспериментальных данных принято $Pr = \text{const}$. Эмпирическая формула получила вид:

$$Nu = A Re^{0.75} \quad (102)$$

Как видно из рис. 212, результаты расчетов по формуле (102) близки к результатам расчетов по теоретической формуле В. А. Шваба [31], однако при $Re = 2 \cdot 10^5 \div 4 \cdot 10^5$ расчетные величины Nu ниже экспериментальных на 15–25%.

Численный коэффициент в формуле (102) $A = 0,0009 \div 0,001$, показатель степени $n = 0,74 \div 0,75$.

Окончательный вид расчетной формулы:

$$Nu = 0,001 \cdot Re^{0.75} \quad (103)$$

В таком виде формула удобна для инженерных расчетов с помощью логарифмической линейки.

На рис. 213 расчетные данные по формуле (103) сопоставлены

с первыми зарубежными экспериментальными данными Мюссера и Пэйджа (США) и Эльзера (Швейцария), полученными в послевоенные годы. Данные Мюссера и Пэйджа близко совпадают с данными ЦКТИ, экспериментальные величины Эльзера в 3–4 раза ниже советских и американских величин. По-видимому Эльзеру не удалось хорошо свести тепловой баланс и точность опытов оказалась неудовлетворительной.

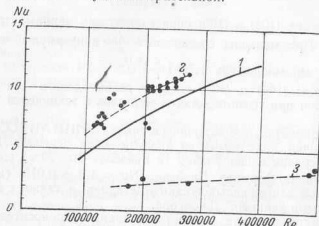


Рис. 213. Теплообмен в жидкой ртути (по формуле 103).
1 — по формуле А. А. Канаева; 2 — по Мюссеру и Пэйджу;
3 — по Эльзеру.

Более поздние исследования теплообмена при течении ртути и амальгам в трубах выполнены в ЦКТИ М. И. Корнеевым [16]. Результаты исследований близки к результатам предыдущих опытов.

Фундаментальные исследования теплообмена при течении жидких металлов в трубе выполнены в послевоенные годы в Энергетическом институте АН СССР в лаборатории академика М. А. Михеева. Результаты этих исследований в августе 1955 г. были доложены в Женеве на Международной конференции по мирному использованию атомной энергии [21]. Исследовалась теплоотдача ртути, олова, свинца, висмута, натрия и сплавов висмут — свинец и натрий — калий. Это позволило охватить числа $Pr = 4 \cdot 10^{-3} \div 3,2 \cdot 10^{-2}$ и числа $Re = 1 \cdot 10^4 \div 6,5 \cdot 10^5$. Тепловая нагрузка лежала в пределах $2 \cdot 10^4 \div 1 \cdot 10^6$ ккал/м²·час.

Для расчета теплоотдачи при турбулентном течении расплавленных металлов в трубах получена эмпирическая формула:

$$Nu = 4,5 + 0,014 (Re, Pr)^{0.8} \quad (104)$$

* Для практических расчетов вместо формулы (104) можно рекомендовать упрощенную формулу:

$$Nu = 6 + 0,002 Re, \text{ при } Re = 500 - 20\,000.$$

Как и в опытах ЦКТИ, отмечено влияние смачиваемости поверхности нагрева на теплообмен. Высказано предположение, что вследствие несмачиваемости жидкими металлами стенки трубы на ней выпадают окислы, создающие дополнительное термическое сопротивление. Для теплоотдачи от жидкого металла к окисленной поверхности нагрева получена формула:

$$Nu = 3 + 0,014 (Re Pr)^{0,8}. \quad (105)$$

Уравнения (104) и (105) справедливы для длинных труб при $\frac{l}{d} \geq 30$. При меньших отношениях $\frac{l}{d}$ в формулы вводится поправочный множитель $1,72 \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^{0,16}$.

Формулы (104) и (105) следует рекомендовать для расчета теплоотдачи при течении жидких металлов в технически гладких трубах.

Экспериментальные величины в опытах ЭНИН АН СССР лежат ниже величин, получаемых из аналитических решений Лайона и Себана и сравнительно близко (в пределах 10—20%) совпадают с данными по формуле Дайера: $Nu = 4,9 + 0,018 (Re Pr)^{0,8}$, полученной для тяжелых жидких металлов, а также с экспериментальными данными Джонсона.

Для металлических и неметаллических теплоносителей, различающихся по величине Pr на четыре порядка, в этой работе получена обобщенная формула:

$$Nu = (3,2 + 0,021 Re^{0,8} Pr^m) K. \quad (106)$$

Для малотеплопроводных жидкостей и газов $n = 0,43$; для расплавленных металлов $n = 0,9$. Коэффициент K учитывает влияние направления теплового потока и температурного напора. Для расплавленных металлов $K \approx 1$. Последнее уравнение является универсальным для расчета теплоотдачи при турбулентном течении любых теплоносителей в длинных трубах.

Для расчета теплоотдачи при естественной конвекции любых теплоносителей, включая жидкие металлы, рекомендована формула:

$$Nu = c Gr^m Pr^n; \quad (107)$$

при $Gr = 10^2 \div 10^9$, $c = 0,52$ и $m = 0,25$;
при $Gr = 10^9 \div 10^{13}$, $c = 0,105$ и $m = 1/3$.

Показатель степени $n = 0,3 + \frac{0,02}{Pr^{1/3}}$.

Таким образом, исследования, выполненные под руководством М. А. Михеева, по сравнению со всеми другими советскими и зарубежными исследованиями жидких металлов, дали наиболее глубокий физический анализ процессов теплообмена и наиболее универсальные и точные расчетные формулы.

В 1956 г. были опубликованы результаты экспериментальных исследований теплоотдачи при течении в трубах жидкого натрия,

выполненные под руководством И. И. Новикова [22]. Опыты велись на трубах из меди, никеля и нержавеющей стали. Измерительный участок имел длину 400 мм и внутренний диаметр 8,6 мм. Определяющие параметры изменялись в пределах:

$$Re = 1,5 \cdot 10^4 \div 2,1 \cdot 10^4;$$

$$Pr = (5 \div 9) 10^{-3};$$

$$Pe = 100 \div 1400.$$

Этими опытами подтвержден полученный в довоенных работах ЦКТИ вывод о влиянии окисной пленки в трубах на эффективность теплообмена.

Для интервала $Pe = 200 \div 1400$ И. И. Новиковым и др. получена эмпирическая формула

$$Nu = 5,9 + 0,015 Pe^{0,8}. \quad (108)$$

Формула (108) дает результаты, близкие с формулой (104) М. А. Михеева. Для области с $Pe < 200$ эмпирическую формулу получить не удалось, так как количество опытных точек было недостаточно.

В 1957 г. опубликованы результаты выполненных в ЦКТИ опытов С. С. Кутателадзе и В. М. Боришанского по теплоотдаче и сопротивлению в жидких металлах [5]. Изучался теплообмен при течении эвтектики свинец — висмут и натрия в круглых трубах диаметром 4 ÷ 35 мм при $Pr = 0,005 \div 0,035$, тепловых потоках $q = 3 \cdot 10^4 \div 1,3 \cdot 10^6$ ккал/м²час, $Pe = 170 \div 11\,000$.

При $Pe = 300 \div 1800$ и $\frac{l}{d} > 30$ экспериментальные точки для сплава висмут — свинец и для натрия дали общую зависимость в координатах $Nu - Re$, выражаемую уравнением

$$Nu = 5 + 0,0021 Pe. \quad (109)$$

При $Pe = 50 \div 300$ величины чисел Nu получились меньшими по сравнению с теоретическим решением для ламинарного течения. Для данной области Re рекомендована приближенная формула:

$$Nu = 0,7 Pe^{\frac{1}{3}}. \quad (110)$$

Достоверная зависимость $Nu = f(Pe)$ для этого диапазона величин Pe может быть получена при накоплении большего количества экспериментальных точек.

Результаты зарубежных исследований теплообмена в жидких металлах, опубликованные в 1951—1956 гг., достаточно хорошо укладываются в зависимости, полученные в ЭНИН.

Заново обработанные экспериментальные данные ЦКТИ по теплообмену в жидкой ртути и магниевой амальгаме (с использованием физических констант ртути по данным ЭНИН (см. приложение VII) также хорошо уложились в зависимости ЭНИН.

Гидравлическое сопротивление. В 1935 г. в ЦКТИ изучалось гидравлическое сопротивление гладкой стеклянной трубы при течении ртути в области $Re = 11 \cdot 10^3 \div 35 \cdot 10^3$. Полученные данные уложились в закономерность Блазиуса:

$$\xi = 0,3164 Re^{-0,25} \quad (111)$$

В 1938—1939 гг. в ЦКТИ А. Р. Сорин и И. Е. Семеновкер измеряли гидравлическое сопротивление стальных труб при течении в них ртути. При $Re > 5 \cdot 10^4$ выявлен квадратичный

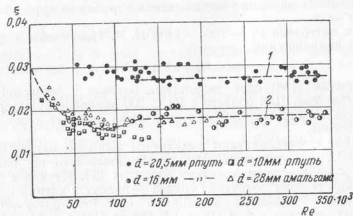


Рис. 214. Коэффициент трения при течении ртути и амальгамы в стальных трубах.

1 — углеродистые трубы, вышедшие в употреблении; 2 — новые углеродистые и легированные трубы.

закон сопротивления, но разброс точек был велик. А. А. Канаев и Л. И. Гельман провели более прецизионные опыты на трубах из углеродистой и легированной сталей при диаметре измерительных участков 10; 16 и 20,5 мм и $Re = 10 \cdot 10^3 \div 4 \cdot 10^5$. Эти опыты были повторены в послевоенные годы [12]. Для труб из углеродистой стали, бывших в употреблении, в квадратичной области сопротивления получено (рис. 214):

$$\xi = \frac{2g\Delta p d}{\gamma l W} = 0,027.$$

Этой величине коэффициента сопротивления соответствует эквивалентная шероховатость $K = 0,06 \div 0,08$ мм.

Для новых труб из углеродистой стали и для труб из легированной стали $\xi = 0,02$ и $K = 0,02 \div 0,04$ мм.

В послевоенные годы в ЦКТИ исследовалось гидравлическое сопротивление труб при течении в них магниево-амальгамы. Полученные коэффициенты сопротивления легли на кривую рис. 214 при эквивалентной шероховатости 0,03 мм.

В упоминавшейся работе [5] исследовалось гидравлическое сопротивление при изотермическом и неадиабатическом течении в трубах расплавленного висмута и эвтектики висмут — свинец. Опыты велись на трубке из стали 20 диаметром 10 мм при величинах Re до $180 \cdot 10^3$. Влияние величины теплового потока на гидравлическое сопротивление не было выявлено. В области выхода на квадратичный закон сопротивления опытные точки для жидких металлов и воды легли на общую кривую. Численные величины коэффициента сопротивления для жидких металлов были того же порядка, что и в работе [12].

Теплообмен при кипении. В настоящее время наибольший практический интерес представляет изучение теплообмена при кипении ртути, которая может быть использована в контуре охлаждения кипящих реакторов на быстрых нейтронах или во вторичном контуре других реакторов с охлаждением газом или натрием.

Как уже указывалось, несмачиваемость стальных труб ртутью оказывает влияние на теплообмен при отсутствии кипения. При кипении ртути влияние несмачиваемости на теплообмен более значительно. При краевом угле смачивания у ртути, превышающем 90° , пузырьки ртутного пара имеют не каплеобразную, а колоколообразную форму, что обуславливает значительную величину диаметра и отрывного объема. На вертикальной поверхности нагрева пузырьки ртутного пара не уходят в ядро потока и скользя вдоль стенки, так как при отсутствии смачивания на это затрачивается меньшая работа, чем при проникновении в слой жидкости. Как показали наблюдения на стеклянных обогреваемых трубках, вдоль стенки трубки образуются прослойки ртутного пара, а в остальной внутренней части сечения движется жидкая ртуть.

Паровой слой по периметру трубы является дополнительным термическим сопротивлением, ухудшающим теплообмен при кипении ртути по сравнению с жидкостями, смачивающими поверхность нагрева. У смачивающих жидкостей при умеренных тепловых нагрузках обычно происходит пузырьковый процесс кипения и только при очень высоких нагрузках совершается переход к пленочному кипению с ухудшенной теплоотдачей. У несмачивающих жидкостей, подобных ртути, как уже указывалось, наблюдается пленочный процесс кипения.

Первые исследования теплообмена при кипении несмачивающей жидкости (ртути) были выполнены в ЦКТИ в 1936—1937 гг. [20]. Было установлено, что эффективность теплообмена при кипении несмачивающих жидкостей значительно ниже, чем у жидкостей, смачивающих поверхность нагрева. Ухудшение теплообмена наступает еще задолго до момента, когда весь поток ртути достигает температуры кипения, соответствующей давлению в данной точке испарительного элемента. Опыты велись при испарении ртути в кольцевом канале. Далее в 1938—1939 гг. эти опыты были продолжены на петлевом циркуляционном контуре, где замерялись

как характеристики теплообмена при кипении, так и циркуляционные характеристики. В 1939 г. на циркуляционном контуре с большой высотой измерительного участка в ЦКТИ проведены исследования теплообмена ртути в вертикальной трубе в более широком диапазоне скоростей, давлений и тепловых нагрузок [27]. В результате исследований были получены экспериментальные данные, позволяющие рассчитывать теплообмен при кипении ртути и циркуляцию в контурах ртутных парогенераторов.

Обработать результаты экспериментов в виде обобщенных безразмерных формул не представлялось возможным, так как даже для теплообмена при кипении достаточно изученных смачивающих жидкостей (вода и др.) в то время не было теоретических или эмпирических зависимостей. Механизм кипения несмачивающих жидкостей еще труднее поддавался теоретическому анализу.

Были поставлены дополнительные исследования, направленные на изучение механизма кипения несмачивающих жидкостей. Проведена серия экспериментов на стеклянных и стальных испарительных элементах, наглядно показавших пленочный режим кипения ртути и пузырьковый режим кипения воды. Этими опытами была показана возможность значительного улучшения теплообмена при кипении ртути путем присадок амальгам магния, титана и некоторых других металлов. Было также показано, что теплообмен при кипении ртути может быть интенсифицирован механическим методом — завихриванием потока спиральными вставками в испарительных элементах.

В 1939 г. в ЦКТИ экспериментально установлено явление расслоения паро-жидкостной эмульсии на паровую и жидкую фазу в горизонтальных трубах ртутного парогенератора, что резко ухудшало условия теплообмена [18].

В послевоенных исследованиях ЦКТИ (М. И. Корнеев) по теплообмену при кипении ртути и магниевой амальгамы в условиях свободной конвекции, а также при естественной циркуляции в трубах были получены новые результаты [16].

При кипении ртути в большом объеме получена зависимость

$$\alpha = 2,76 q^{-1,58} \cdot 10^{10} \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час}.$$

При кипении амальгамы магния с весовой концентрацией 0,01—0,04% в большом объеме получено соотношение:

$$\alpha = 5,25 q^{0,67} \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}.$$

При кипении амальгамы магния в вертикальных трубах эта зависимость имеет вид:

$$\alpha = 7,3 q^{0,67} \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}.$$

Такая же зависимость получена при кипении амальгамы в горизонтальных трубах при измерениях по нижней образующей трубы. На верхней образующей трубы вследствие расслоения смеси ртуть — ртутный пар показатель степени при q изменяется

от 0 при приведенной скорости ртути равной 0,02 м/сек до 0,67 при приведенной скорости 0,1 м/сек.

Опыты М. И. Корнеева показали, что теоретические зависимости Г. Н. Кружилина [10] в условиях свободной конвекции и при естественной циркуляции правильно описывают процесс кипения магнелизованных амальгам.

В 1941 г. в ЦКТИ на ртутном парогенераторе с принудительной циркуляцией исследовался теплообмен в зоне кипения при малых кратностях циркуляции, до единицы включительно. Было установлено, что в сечениях трубы с высоким паросодержанием (до 100%) коэффициент теплоотдачи сохранял высокие значения, тогда как при естественной циркуляции уже при паросодержании 3—4% происходил недопустимый перегрев трубы. В 1946 г. опыты были повторены. При тепловой нагрузке 50 000—55 000 ккал/м²·час коэффициент теплоотдачи к кипящей ртути на выходных витках змеевика достигал величин 5000—6000 ккал/м²·час $^\circ\text{C}$. При замене змеевика прямой трубой и при нагрузке до 200 000 ккал/м²·час коэффициент теплоотдачи все еще был очень высок — 1500 ккал/м²·час $^\circ\text{C}$. По-видимому, при принудительной циркуляции происходит интенсивное дробление потока ртути на очень мелкие капли, которые далее транспортируются в виде взвеси потоком пара, интенсивно охлаждая поверхность нагрева. Это предположение подтверждается визуальными наблюдениями за потоком ртутно-воздушной смеси в стеклянной трубе. Можно так подобрать приведенные скорости газовой и жидкой фаз, что двухфазный поток станет однородным и вся ртуть в виде мельчайших капель будет находиться в потоке воздуха во взвешенном состоянии.

Если в полупромышленном масштабе результаты лабораторных экспериментов будут подтверждены, то можно достичь высоких тепловых нагрузок при использовании ртути в качестве охлаждающей среды в реакторах или вторичных теплообменниках [19].

50. Теплообмен при конденсации

Эффективность теплообмена при конденсации пара резко изменяется в зависимости от формы конденсации — пленочной или капельной. У несмачивающих жидкостей силы сцепления частиц жидкости превышают силы сцепления частиц жидкости с твердой поверхностью. Это предопределяет капельную форму конденсации паров несмачивающих жидкостей.

В 1937—1941 гг. в ЦКТИ А. А. Канаевым, А. Н. Ложкиным, П. И. Старостиным, Л. И. Гельманом были выполнены исследования по конденсации ртутного пара. Визуально и с помощью киносъемки была установлена капельная форма конденсации. При тепловой нагрузке 100 000—150 000 ккал/м²·час и разности температур между ртутным и водяным паром 20—250 $^\circ\text{C}$ коэффициент теплопередачи в конденсаторе-испытателе составлял 3500—4000 ккал/м²·час $^\circ\text{C}$. Зависимость величины общего коэффициента

теплопередачи при конденсации ртутного пара при охлаждении испаряющейся водой от величины разности температур показана на рис. 215.

В послевоенные годы были проведены дополнительные исследования по конденсации ртутного пара. Была проанализирована зависимость коэффициента теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке. Эта зависимость выражается формулой:

$$\alpha = \frac{1}{\Delta t^{1,025}} 10^5 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}.$$

Указанная формула справедлива при $\Delta t \leq 25^\circ \text{C}$. Для энергетических установок экономичная разность температур лежит в пределах $15-20^\circ \text{C}$.

Позднее Л. И. Гельманом были продолжены исследования теплообмена при конденсации ртутного пара [7].

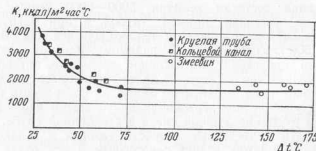


Рис. 215. Зависимость коэффициента теплоотдачи при конденсации ртутного пара от разности температур.

Опытные данные обрабатывались в координатах:

$$\frac{\alpha}{p^{\frac{1}{3}} [1 + (\gamma^* V^*)^{\frac{1}{3}}]} = f(\Delta t).$$

При отсутствии воздуха в ртутном паре получены зависимости

$$\alpha = 1,2 \cdot 10^5 \frac{p^{\frac{1}{3}}}{\Delta t} \left[1 + (\gamma^* V^*)^{\frac{1}{3}} \right] \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ\text{C}.$$

При наличии воздуха в конденсирующемся ртутном паре

$$\alpha = 1,2 \cdot 10^5 \frac{p^{\frac{1}{3}}}{\xi^{0,2}} \left[1 + (\gamma_{\text{см}} V_{\text{см}})^{\frac{1}{3}} \right].$$

Принятые обозначения:

α — коэффициент теплоотдачи при конденсации;

P — давление пара в конденсаторе;

Δt — разность температур ртутного пара и охлаждающей поверхности;

V^* — средняя скорость пара в конденсаторе;

γ^* — удельный вес пара;

$V_{\text{см}}$ — средняя скорость паровоздушной смеси;

$\gamma_{\text{см}}$ — удельный вес паровоздушной смеси;

ξ — весовая концентрация воздуха в паровоздушной смеси.

51. Потери на трение диска в жидких металлах

При расчете рабочих колес центробежных насосов для перекачивания жидких металлов необходимо определять потери мощности на трение о жидкость торцевых поверхностей рабочего колеса, а также его обода.

В связи с отсутствием экспериментальных данных по трению вращающегося диска о жидкости, свойства которых отличны от воды, в 1938—1939 гг. в ЦКТИ А. А. Канаевым были поставлены исследования по определению затрат мощности на трение диска о жидкости, сильно различающиеся по плотности и вязкости: вода, керосин, турбинное масло и ртуть. Исследовались стальные диски диаметром от 100 до 300 мм как гладкообработанные, так и с искусственной шероховатостью (песок с зерном $0,1-0,45 \text{ мм}$, наклеенный лаком). Опыты велись в диапазоне чисел Рейнольдса $10^2 \div 10^7$.

На основании результатов опытов с ртутью получена эмпирическая формула для величины потерь на трение:

$$N_{\text{тр}} = 0,5 D^{4,6} n^{2,5} \gamma^{0,2} 10^{-7} \text{ л. с.}, \quad (112)$$

где D — диаметр диска, м;

n — число оборотов, об/мин;

ν — кинематическая вязкость ртути, $\text{м}^2/\text{сек}$;

γ — удельный вес ртути, кг/м^3 .

Выявлено, что теоретическое решение Кармана для вращающегося диска не дало удовлетворительного совпадения с опытом. Дано общее решение задачи о трении диска в жидкости с учетом его толщины [11].

Элементарное кольцо радиусом r и шириной dr на торце диска имеет двустороннюю поверхность

$$dF = 4\pi r dr.$$

Этой элементарной поверхности соответствует сила трения

$$dT_1 = \frac{c\gamma}{2g} u^2 dF = c2\pi \frac{\gamma}{g} u^2 r dr,$$

здесь c — коэффициент сопротивления;

γ — удельный вес;

u — скорость движения жидкости относительно поверхности элементарного кольца.

Силе трения dT_1 соответствует момент

$$dM_1 = r dT_1$$

и мощность

$$dN_1 = \frac{\omega dM}{75}$$

Если c определен из опытов с вращающимся диском, то $u = \omega r$.

Интегрированием уравнения для элементарной работы в пределах от 0 до r_n (наружного радиуса диска) получаем

$$N_1 = \frac{c 2\pi \omega^3}{75 \cdot 5 \cdot g} r_n^5 \text{ л. с.} \quad (113)$$

Это уравнение дает затрату мощности на трение обеих торцевых поверхностей диска о жидкость.

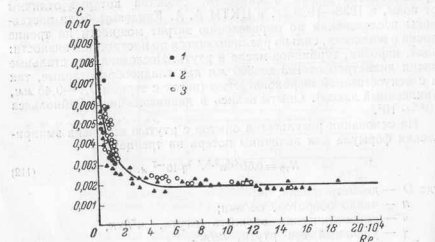


Рис. 216. Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса.

1 — керосин; 2 — вода; 3 — ртуть.

Потеря мощности на трение обода диска о жидкость

$$N_2 = c \frac{\pi}{75} \cdot \frac{1}{g} \omega^3 r_n^4 \delta \text{ л. с.}, \quad (114)$$

где δ — ширина обода диска.

Суммарная потеря мощности на трение обода и торцов диска о жидкость

$$N = N_1 + N_2 = 4,9 \cdot 10^{-6} c \gamma n^3 r_n^4 (0,4 r_n + \delta) \text{ л. с.} \quad (115)$$

Коэффициент сопротивления c зависит от числа Рейнольдса $Re = \frac{\omega r^2}{\nu}$ и от шероховатости поверхности диска K . Результаты опытов с вращением гладкообработанных дисков в воде, керосине и ртути легли на общую кривую (рис. 216).

Влияние шероховатости на величину коэффициента сопротивления видно из следующих цифр:

Технически гладкий диск	$Re = 4 \cdot 10^5$	$c = 0,006$
Песчаная шероховатость	$K = 0,25 \text{ мм}; Re = 4 \cdot 10^5$	$c = 0,014$
Песчаная шероховатость	$K = 0,45 \text{ мм}; Re = 4 \cdot 10^5$	$c = 0,02$

Шероховатость литых поверхностей близка к 0,2 мм, шероховатость обработанной поверхности около 0,1 мм.

На рис. 216 коэффициенты сопротивления даны для обработанных дисков.

52. Теплофизические константы некоторых жидких металлов

Ртуть. Сотрудником Всесоюзного Теплотехнического Института Х. Халиловым выполнены исследования по определению вязкости жидкой ртути в диапазоне температур 20—600°С и ртутного пара в диапазоне температур 350—600°С. Результаты исследований даны в табл. 57.

Таблица 57

Результаты измерений вязкости

Температура t , °С	Вязкость жидкой ртути		Вязкость ртутного пара	
	динамическая μ , кг·сек/м ² × 10 ⁶	кинематическая ν , м ² /сек × 10 ⁸	динамическая μ , кг·сек/м ² × 10 ⁶	кинематическая ν , м ² /сек × 10 ⁷
20	157	11,4	—	—
50	143	10,4	—	—
100	127	9,77	—	—
150	116	8,57	—	—
200	105	7,97	—	—
250	98,8	7,48	—	—
300	92,8	7,07	—	—
350	88,0	6,77	5,03	150
400	84,5	6,55	5,8	80,1
450	81,5	6,38	6,75	50,0
500	79,0	6,25	7,84	33,4
550	76,9	6,15	9,03	23,0
600	75,3	6,08	10,4	13,0

В. К. Семенченко, Б. П. Беринг и Н. Л. Покровский [25] экспериментально исследовали поверхностное натяжение амальгам бария, лития, натрия, калия, рубидия и других металлов. Установлено, что экспериментальные величины близко совпадают с расчетными по формуле Шишковского, уточненной авторами исследования.

В. К. Семенченко разработаны методы получения амальгам поверхностно-активных металлов.

Изучению поверхностного натяжения ртути и других металлов посвящена работа П. П. Пугачевича [24].

Натрий, калий, литий. И. И. Новиков, А. Н. Соловьев, Е. М. Хабахпашева и В. А. Груздев [22] произвели измерения вязкости, температуропроводности и плотности натрия, калия, лития и эвтектики натрия — калий. В указанной работе этих исследователей величины кинематической вязкости, температуропроводности и плотности натрия, калия, их эвтектики и лития даны в графической форме для диапазона температур 100—700° С.

В монографии Е. Г. Швидковского [32] рассматриваются вопросы теории крутильно-колебательного метода измерения вязкости жидкостей, в том числе ртути, олова, свинца, висмута и сплава свинец — висмут. Величины вязкости, вычисленные по этому методу, близко совпадают с величинами, определенными по капиллярному методу.

Для некоторых жидких металлов экспериментально определенные величины вязкости довольно близко соответствуют расчетным величинам по формуле А. И. Бачинского:

$$\eta = \frac{c}{v - b},$$

где c и b — константы;
 v — удельный объем.

Для ртути и галлия отклонения от формулы Бачинского наиболее значительны.

53. Очистка жидких металлов от примесей

Советским ученым принадлежит приоритет в разработке эффективных методов очистки от загрязняющих примесей таких металлов, как ртуть, натрий, олово, свинец, висмут. Еще в довоенные годы проф. М. П. Славинский и др. в Ленинградском Политехническом институте разработали метод очистки цветных металлов фильтрацией.

Требования к чистоте цветных металлов определены ГОСТ. В приложении приведены ГОСТ (классификация и технические условия) на ртуть, свинец, олово, натрий.

Фильтрацией технического натрия через пористые пластины или очень тонкие сетки удается получить натрий высокой чистоты. Бронзовая сетка или сетка из нержавеющей стали в комбинации с никелевой сеткой оказывается надежным фильтром для получения устойчивой чистоты натрия. Прессованные и спеченные пластины из железного порошка также являются хорошим фильтрующим материалом.

54. Поведение сталей в жидкометаллической среде

Воздействие ртути на стали. Первые исследования по воздействию ртути в жидкой и паровой фазах на стали выполнялись в ЦКТИ в 1938—1940 гг. При температуре до 500—550° С образцы

из углеродистой стали оказались стойкими в ртутной среде при отсутствии нагрузки. При нагружении образцов замечалось воздействие ртути и ртутного пара, выражавшееся в изменении структуры поверхностных слоев углеродистой стали.

Специальные исследования воздействия ртути на легированные и углеродистые стали выполнены в институте Металлургии АН СССР Н. Т. Гудковым и М. Н. Гавзе [8]. Авторы этой работы характеризуют взаимодействие между сталью и ртутью следующими показателями:

1. Растворимость в ртути железа и легирующих элементов при различных температурах.

2. Растворимость ртути в стали при повышенных температурах и давлениях.

3. Проникновение ртути по границам зерен стали, находящейся под напряжением при повышенной температуре.

4. Смачиваемость ртутью стальной поверхности при повышенной температуре.

5. Взаимодействие ртути со сталью при повышенной температуре в присутствии кислорода.

Установлено, что «амальгама» железа является не истинной амальгамой, а суспензией железа или окислов железа в ртути.

При отсутствии в ртути кислорода содержание растворенного железа в обычных условиях не превышало 0,0002%. При наличии небольших количеств кислорода содержание растворенного в ртути железа доходило до 0,03%, т. е. повышалось приблизительно в 100 раз. Не выявлено влияния температуры ртути на растворимость в ней железа.

Опыты показали отсутствие растворимости ртути в железе при повышенных температурах и давлениях. Не выявлено также проникновения ртути по границе зерна стали при высокой температуре и напряженном состоянии стального образца.

Таким образом установлено, что при отсутствии кислорода ртуть не действует на сталь. Исследование стальных образцов в среде насыщенного и перегретого ртутного пара при температуре 400—700° С не выявило результатов агрессивного воздействия ртутного пара.

В случае присутствия в ртути кислорода воздействие ее на сталь может быть значительным. При эксплуатации ртутного парогенератора в ЦКТИ наблюдалось образование окисной пленки на стенках кипятильных труб и отложение окиси в коллекторах. Значительное содержание кислорода в ртути может вызывать закупоривание труб парогенератора шламом в результате растворения ртутью больших количеств железа. При окислении на поверхности стальных труб образуется окалина, через которую может диффундировать ртуть, что приводит далее к отделению окалины. Чистая поверхность труб вновь подвергается окислению.

Воздействие ртути на сталь может быть предотвращено легированием стали или присадкой к ртути элементов, имеющих большее сродство с кислородом, чем железо.

Наибольшую стойкость в ртутной среде показали следующие стали:

№ пп.	Химический состав, %				
	C	Mn	Si	Ni	Cr
1	0,12	0,40	0,37	2,15	18,74
2	0,13	1,07	0,84	8	19,45
3	0,11	0,56	1,31	—	5,62

Хромоникелевая сталь (2) хорошо зарекомендовала себя при эксплуатации ртутного парогенератора.

Хромистая с кремнием и марганцем сталь (3) характеризуется мелкодисперсной структурой частиц окалины, действующих подобно поверхностно-активным веществам, вызывая смачивание стали ртутью.

Хромистая с никелем, марганцем и кремнием сталь (1) образует окалину в форме чешуек и порошка, всплывающую на поверхности ртути, что позволяет удалять шламы в отделителе. Эта сталь устойчива против сернистой коррозии.

Присадка к ртути ингибиторов (титан, магний) предотвращает или уменьшает воздействие ртути на сталь даже при очень высоких температурах. Опыты показали, что титан является лучшим ингибитором, образующим надежную защитную пленку на поверхности стали. Магний поглощает кислород и азот, поддерживая титан в активном состоянии. Добавка 10 частей титана на миллион частей ртути достаточна для устранения взаимодействия со сталью при температуре 650° С. При этой температуре добавка 20 частей магния достаточна для того, чтобы эффективно связать свободный кислород.

Натрий и цирконий менее эффективны по сравнению с магнием. Добавки магния и титана к ртути не только уменьшают ее воздействие на сталь, но и вызывают эффект смачивания, что приводит к улучшению теплообмена при кипении ртути.

Воздействие свинца, висмута и их эвтектического сплава на стали. В 1955 г. на Международную конференцию по мирному использованию атомной энергии Л. И. Цупрун и М. И. Тарьтина представили доклад об исследовании воздействия жидкого свинца, висмута и их эвтектического сплава на нержавеющую хромоникелевую сталь [30].

Исследовалось взаимодействие указанных жидких металлов со сталью 1X18H9T при температуре 500 и 600° С. Химический состав этой стали в весовых процентах:

Cu	Ti	Cr	Ni	Si	Mn	S
0,09	0,51	17,67	10,45	0,54	1,27	0,023

Длительный нагрев стали в атмосфере аргона до температуры 500° С не вызывал значительных изменений механических свойств и структуры металла. В результате длительной выдержки при 600° С относительное удлинение стали уменьшалось на 15%, предел прочности несколько увеличивался, размер зерна и твердость стали не изменялись.

В среде жидкого свинца, висмута и их эвтектического сплава при температуре 500—600° С установлено ухудшение механических свойств стали 1X18H9T — понижение относительного удлинения и предела прочности. Воздействие эвтектики свинец — висмут на эту сталь приводит к «выщелачиванию» никеля путем избирательного растворения поверхностного слоя. Изменяется структура стали, из аустенитной она становится магнитной.

Растворимость никеля в свинце при 327° С составляет около 0,2%, а растворимость его в висмуте при 600° С достигает 6%. Железо почти нерастворимо в свинце и в висмуте. Растворимость хрома в свинце составляет 1%, растворимость в висмуте незначительна. Присадка к эвтектике свинец — висмут 0,1—0,3% кальция или бария, создающих на поверхности сплава окисную пленку, уменьшает агрессивное воздействие сплава на сталь примерно в два раза.

Добавка к сплаву свинец — висмут 0,7% никеля уменьшает коррозию стали при 500—600° С в два-три раза, причем предел прочности не изменяется, а относительное удлинение понижается незначительно (на 5—6%). Таким образом никель является хорошим ингибитором, уменьшающим агрессивное воздействие сплава свинец — висмут на нержавеющую сталь типа 18—8 при температуре 500—600° С. При температуре до 500° С эта сталь может подвергаться длительному воздействию сплава свинец — висмут и без присадки ингибитора.

55. Насосы, арматура, измерительные приборы для жидких металлов

Первые в СССР работы по созданию указанного оборудования для жидких металлов выполнены в 1937—1940 гг. в ЦКТИ [19].

Спроектирован и изготовлен одноступенчатый центробежный ртутный насос с вертикальным расположением вала, рассчитанный

на расход ртути $70 \text{ м}^3/\text{час}$ при напоре 7 кг/см^2 и температуре $250—300^\circ \text{С}$. В насосе применено оригинальное и надежное уплотнение вала, предотвращающее возможность утечки ртути во внешнюю среду. В кольцевую щель между втулкой вала и валом подается ртуть из напорного патрубка, предварительно охлажденная в поверхностном холодильнике. Пройдя по кольцевой запорной щели, ртуть возвращается через дроссельный клапан к всасывающему патрубку.

Панель вала охлаждается водяной рубашкой. Охлаждающая вода из рубашки сливается в полость вокруг вала насоса, конденсируя пары ртути в случае их проникновения из запорной щели. Насос проработал много тысяч часов и до настоящего времени находится в работоспособном состоянии.

Этот принцип конструкции используется и в насосах для перекачки других жидких металлов.

Созданы конструкции бессальниковых запорных клапанов для ртути и ртутного пара, в которых уплотнение штока достигается приваркой гармониковой мембраны к штоку и корпусу клапана. Данный принцип конструкции бессальниковых клапанов широко используется в настоящее время для различных сред.

Разработаны электромагнитные указатели уровня ртути в сосудах под давлением, электромагнитные датчики для измерения расхода ртути и ртутного пара. Принцип таких электромагнитных приборов используется в настоящее время и для других жидких металлов.

Создан оптический детектор для замера концентрации ртутного пара в воздухе помещений и в газоходах котлоагрегатов. В настоящее время готовится серийный производство детекторов ртутного пара конструкции ЦКТИ.

Большой комплекс работ по созданию теории индукционных электромагнитных насосов для жидких металлов выполнен в Академии наук Латвийской ССР.

М. И. Кирко выполнил исследование по моделированию магнитогидродинамических явлений в жидких металлах. И. А. Тюрин, Э. К. Янкоп и Я. Я. Лиелпетер сформулировали основные положения теории и расчетов индукционных насосов. Эти работы изложены в трудах Института физики Академии наук Латвийской ССР [28].

1 Перечень основных обозначений

x, y, z	[м]	— координаты
r	[м]	— радиус
d	[м]	— диаметр
δ	[м или мм]	— толщина
l	[м или мм]	— линейный размер
L	[м или мм]	— полная длина поверхности нагрева (охлаждения)
H	[м или мм]	— полная высота поверхности нагрева (охлаждения)
F	[м ²]	— площадь
τ	[час. или сек.]	— время
g	[м/сек ²]	— ускорение силы тяжести, $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$
V	[м/сек или м/час]	— скорость, $1 \text{ м/сек} = 3600 \text{ м/час}$
G	[кг/час]	— весовой расход жидкости
D	[м ³ /час]	— объемный расход жидкости
W	[кг/м ² час]	— весовой расход жидкости, отнесенный к единице сечения канала
ξ, C_f		— коэффициент трения
t	[°C]	— температура по стоградусной шкале
$T = t + 273,2$	[°K]	— абсолютная температура
p	[кг/см ² или мм рт. ст.]	— давление, $1 \text{ кг/см}^2 = 1 \text{ атм} = 735,6 \text{ мм рт. ст.} = 0,98 \text{ бар}$; $1 \text{ атм (физ.)} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1,034 \text{ кг/см}^2$
Q	[ккал; ккал/час]	— количество тепла (ккал), теплопроводимость (ккал/час), тепловой поток (ккал/час), $1 \text{ ккал} = 426,99 \text{ кГм} = 1,163 \cdot 10^{-3} \text{ кат}$, $1 \text{ кат} = 860 \text{ ккал/час} = 0,239 \text{ ккал/сек}$
N	[кат или л. с.]	— мощность, $1 \text{ л. с.} = 0,736 \text{ кат} = 75 \text{ кг/м/сек}$, $1 \text{ кат} = 102 \text{ кг/м/сек} = 1,36 \text{ л. с.}$
q	[ккал/м ² час]	— удельный тепловой поток
α	[ккал/м ² ·час·°C]	— коэффициент теплопередачи
k	[ккал/м ² ·час·°C]	— коэффициент теплоотдачи, $1 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{час} \cdot ^\circ \text{C} = 2,78 \cdot 10^{-8} \text{ ккал/см}^2 \cdot \text{сек} \cdot ^\circ \text{C} = 1,163 \cdot 10^{-4} \text{ вт/см}^2 \cdot ^\circ \text{C}$
H	[эрг]	— напряженность магнитного поля
H_a	[эс]	— магнитная индукция
I	[а]	— сила тока
j	[а/см ²]	— плотность тока
γ	[кг/м ³ или г/см ³]	— удельный вес, $1 \text{ г/см}^3 = 1000 \text{ кг/м}^3$
v	[м ³ /кг]	— удельный объем, $v = \frac{1}{\gamma}$

ρ [кг/м³ или г/см³ или кг/сек²/м⁴] — плотность, $\rho = \frac{\gamma}{g}$, 1 кг·сек²/м⁴ = 9,8 кг/м³ = 0,0098 г/см³
 ρ [ом·см или мком·см] — удельное электрическое сопротивление, 1 ом·см = 10⁹ мком·см
 c_p [ккал/кг °С] — удельная весовая теплоемкость вещества при постоянном давлении
 c_v [ккал/кг °С] — удельная весовая теплоемкость вещества при постоянном объеме
 λ [ккал/м·час °С или кал/смек °С или вт/см °С] — коэффициент теплопроводности, 1 кал/см·сек °С = 360 ккал/м·час °С, 1 вт/см °С = 86 ккал/м·час °С = 0,239 кал/см·сек °С
 a [м²/час или м²/сек] — коэффициент температуропроводности, 1 м²/сек = 3600 м²/час
 μ [кг/м·час или кг·сек/м² или пуаз] — коэффициент динамической вязкости, 1 кг·сек/м² = 9,8 кг/м·сек = 98 пуаз = 3,53·10⁴ кг/м·час
 ν [м²/час или м²/сек] — коэффициент кинематической вязкости, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, 1 м²/сек = 3600 м²/час = 1000 стоксов
 σ [дн/см или эрг/см² или кг/м] — коэффициент поверхностного натяжения, 1 кг/м = 9800 дн/см = 9800 эрг/см²
 β [1/град] — коэффициент объемного расширения жидкости
 α [1/град] — коэффициент термического расширения
 r [ккал/кг] — теплота парообразования
 $Re = \frac{VI}{\nu}$ — число Рейнольдса
 $Ga = \frac{g l^3}{\nu^2}$ — число Галилея
 $Gr = Ga \beta \Delta t = \frac{\rho g l^3 \Delta t}{\nu^2}$ — число Грасгофа
 $Pe = \frac{VI}{a}$ — число Пекле
 $Pr = \frac{Re}{Re} = \frac{\nu}{a}$ — число Прандтля
 $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ — число Нуссельта

II. Перевод величин английской системы единиц в метрическую

Длина l	1 фут = 12 дюймов = 0,3048 м = 304,8 мм; 1 дюйм = 25,4 мм
Площадь F	1 фут² = 0,0929 м²; 1 дюйм² = 6,452 см²
Объем V	1 фут³ = 0,02832 м³ = 28,32 л; 1 дюйм³ = 16,39 см³; 1 галлон = 3,785 л
Вес P	1 фунт = 0,4536 кг

Удельный вес γ	1 фунт/фут³ = 16,0185 кг/м³
Давление p	1 фунт/дюйм² = 0,07027 кг/см² = 702,7 кг/м² = 51,71 мм рт. ст.
Коэффициент динамической вязкости μ	1 фунт·сек/м² = 4,882 кг·сек/м² = 47,88 кг/мек = 172 500 кг/м·час = 478,8 пуаз
Коэффициент кинематической вязкости η	1 фут²/сек = 334,45 м²/час = 0,929 м²/сек = 929 стоксов
Температура t	$t^{\circ}C = \frac{5}{9} (t^{\circ}F + 40) - 40$; $t^{\circ}F = \frac{9}{5} (t^{\circ}C + 40) - 40$; $\Delta t^{\circ}C = \frac{5}{9} \Delta t^{\circ}F$
Количество тепла Q	1 Б. Т. Е. = 0,252 ккал = 107,53 кДж; 1 Б. Т. Е. / фунт = 0,555 ккал/кг
Удельный тепловой поток q	1 Б. Т. Е. / фут²·час = 2,71 ккал/м²·час
Удельная теплоемкость c	1 Б. Т. Е. / фунт °F = 1,0 ккал/кг °С
Коэффициент теплопроводности λ	1 Б. Т. Е. / фут·час °F = 1,488 ккал/м·час °С; 1 Б. Т. Е. / дюйм·час °F = 17,88 ккал/м·час °С; 1 Б. Т. Е. / фут²·час °F = 0,124 ккал/м·час °С
Коэффициент теплопередачи (теплоотдачи) k, α	1 Б. Т. Е. / фут²·час °F = 4,883 ккал/м²·час °С
Мощность и работа N, A	1 Б. Т. Е. / сек. = 1,054 кат; 1 англ. л. с. (HP) = 1,01385 л. с.; (1 л. с. = 75 кг/м·сек); 1 англ. л. с. = 0,746 кат; 1 кат = 3416 Б. Т. Е. / час.

III. Таблица перевода английских дюймов в миллиметры

Дюйм	0	1/16	1/8	3/16	1/4	5/16	3/8	7/16	1/2	9/16	5/8	11/16	3/4	13/16	7/8	15/16
0	0.0	1.6	3.2	4.8	6.4	7.9	9.5	11.1	12.7	14.3	15.9	17.5	19.1	20.6	22.2	23.8
1	25.4	27.0	28.6	30.2	31.7	33.3	34.9	36.5	38.1	39.7	41.3	42.9	44.4	46.0	47.6	49.2
2	50.8	54.0	57.1	60.3	63.5	66.7	69.9	73.0	76.2	79.4	82.5	85.7	88.9	92.1	95.3	98.4
3	76.2	77.8	79.4	81.0	82.5	84.1	85.7	87.3	88.9	90.5	92.1	93.7	95.3	96.8	98.4	100.0
4	101.6	103.2	104.8	106.4	108.0	109.5	111.1	112.7	114.3	115.9	117.5	119.1	120.7	122.3	123.8	125.4
5	127.0	128.6	130.2	131.8	133.4	135.0	136.5	138.1	139.7	141.3	142.9	144.5	146.1	147.6	149.2	150.8
6	152.4	154.0	155.6	157.2	158.8	160.4	161.9	163.5	165.1	166.7	168.3	169.9	171.5	173.0	174.6	176.2
7	177.8	179.4	181.0	182.6	184.2	185.7	187.3	188.9	190.5	192.1	193.7	195.3	196.9	198.4	200.0	201.6
8	203.2	204.8	206.4	208.0	209.6	211.1	212.7	214.3	215.9	217.5	219.1	220.7	222.3	223.8	225.4	227.0
9	228.6	230.2	231.8	233.4	235.0	236.5	238.1	239.7	241.3	242.9	244.5	246.1	247.7	249.2	250.8	252.4
10	254.0	255.6	257.2	258.8	260.4	261.9	263.5	265.1	266.7	268.3	269.9	271.5	273.1	274.6	276.2	277.8
11	279.4	281.0	282.6	284.2	285.7	287.3	288.9	290.5	292.1	293.7	295.3	296.9	298.4	300.0	301.6	303.2
12	304.8	306.4	308.0	309.6	311.1	312.7	314.3	315.9	317.5	319.1	320.7	322.3	323.8	325.4	327.0	328.6
13	330.2	331.8	333.4	335.0	336.5	338.1	339.7	341.3	342.9	344.5	346.1	347.7	349.2	350.8	352.4	354.0
14	355.6	357.2	358.8	360.4	361.9	363.5	365.1	366.7	368.3	369.9	371.5	373.1	374.6	376.2	377.8	379.4
15	381.0	382.6	384.2	385.8	387.3	388.9	390.5	392.1	393.7	395.3	396.9	398.4	400.0	401.6	403.2	404.8
16	406.4	408.0	409.6	411.2	412.7	414.3	415.9	417.5	419.1	420.7	422.3	423.8	425.4	427.0	428.6	430.2
17	431.8	433.4	435.0	436.6	438.1	439.7	441.3	442.9	444.5	446.1	447.7	449.3	450.9	452.5	454.1	455.7
18	457.2	458.8	460.4	462.0	463.5	465.1	466.7	468.3	469.9	471.5	473.1	474.7	476.3	477.9	479.4	481.0
19	482.6	484.2	485.8	487.4	488.9	490.5	492.1	493.7	495.3	496.9	498.5	500.1	501.7	503.2	504.8	506.4
20	508.0	509.6	511.2	512.8	514.3	515.9	517.5	519.1	520.7	522.3	523.9	525.5	527.0	528.6	530.2	531.8
21	533.4	535.0	536.6	538.2	539.7	541.3	542.9	544.5	546.1	547.7	549.3	550.9	552.5	554.0	555.6	557.2
22	558.8	560.4	562.0	563.6	565.1	566.7	568.3	569.9	571.5	573.1	574.7	576.3	577.8	579.4	581.0	582.6
23	584.2	585.8	587.4	589.0	590.5	592.1	593.7	595.3	596.9	598.5	600.1	601.7	603.2	604.8	606.4	608.0
24	609.6	611.2	612.8	614.4	615.9	617.5	619.1	620.7	622.3	623.9	625.5	627.1	628.6	630.2	631.8	633.4
25	635.0	636.6	638.2	639.8	641.3	642.9	644.5	646.1	647.7	649.3	650.9	652.5	654.0	655.6	657.2	658.8
26	660.4	662.0	663.6	665.2	666.7	668.3	669.8	671.5	673.1	674.7	676.3	677.9	679.4	681.0	682.6	684.2
27	685.8	687.4	689.0	690.6	692.1	693.7	695.3	696.9	698.5	700.1	701.7	703.3	704.8	706.4	708.0	709.6
28	711.2	712.8	714.4	716.0	717.5	719.1	720.7	722.3	723.9	725.5	727.1	728.7	730.2	731.8	733.4	735.0
29	736.6	738.2	739.8	741.4	742.9	744.5	746.1	747.7	749.3	750.9	752.5	754.1	755.6	757.2	758.8	760.4
30	765.8	767.4	769.0	770.6	772.1	773.7	775.3	776.9	778.5	780.1	781.7	783.3	784.9	786.5	788.1	789.7

IV. Таблица перевода градусов шкалы Фаренгейта в градусы Цельсия

°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	
0	-17.8	95	-3.3	52	11.1	78	25.56	104	40	40.56	130	54.4	130	54.4	130	54.4	130	54.4
1	-17.22	96	-2.78	53	11.67	79	26.11	105	40.56	41.11	131	55	131	55	131	55	131	55
2	-16.67	97	-2.22	54	12.22	80	26.67	106	41.11	41.67	132	55.56	132	55.56	132	55.56	132	55.56
3	-16.11	98	-1.67	55	12.78	81	27.22	107	41.67	42.22	133	56.11	133	56.11	133	56.11	133	56.11
4	-15.56	99	-1.11	56	13.33	82	27.78	108	42.22	42.78	134	56.67	134	56.67	134	56.67	134	56.67
5	-15	100	-0.56	57	13.89	83	28.33	109	42.78	43.33	135	57.22	135	57.22	135	57.22	135	57.22
6	-14.44	101	0	58	14.44	84	28.89	110	43.33	43.89	136	57.78	136	57.78	136	57.78	136	57.78
7	-13.89	102	0.56	59	15	85	29.44	111	44.44	44.44	137	58.33	137	58.33	137	58.33	137	58.33
8	-13.33	103	1.11	60	15.56	86	30	112	44.44	45	138	58.89	138	58.89	138	58.89	138	58.89
9	-12.78	104	1.67	61	16.11	87	30.56	113	45	45.56	139	59.44	139	59.44	139	59.44	139	59.44
10	-12.22	105	2.22	62	16.67	88	31.11	114	45.56	46.11	140	60	140	60	140	60	140	60
11	-11.67	106	2.78	63	17.22	89	31.67	115	46.11	46.67	141	60.56	141	60.56	141	60.56	141	60.56
12	-11.11	107	3.33	64	17.78	90	32.22	116	46.67	47.22	142	61.11	142	61.11	142	61.11	142	61.11
13	-10.56	108	3.89	65	18.33	91	32.78	117	47.22	47.78	143	61.67	143	61.67	143	61.67	143	61.67
14	-10	109	4.44	66	18.89	92	33.33	118	47.78	48.33	144	62.22	144	62.22	144	62.22	144	62.22
15	-9.44	110	5	67	19.44	93	33.89	119	48.33	48.89	145	62.78	145	62.78	145	62.78	145	62.78
16	-8.89	111	5.56	68	20	94	34.44	120	48.89	49.44	146	63.33	146	63.33	146	63.33	146	63.33
17	-8.33	112	6.11	69	20.56	95	35	121	49.44	50	147	63.89	147	63.89	147	63.89	147	63.89
18	-7.78	113	6.67	70	21.11	96	35.56	122	50	50.56	148	64.44	148	64.44	148	64.44	148	64.44
19	-7.22	114	7.22	71	21.67	97	36.11	123	50.56	51.11	149	65	149	65	149	65	149	65
20	-6.67	115	7.78	72	22.22	98	36.67	124	51.11	51.67	150	65.56	150	65.56	150	65.56	150	65.56
21	-6.11	116	8.33	73	22.78	99	37.22	125	51.67	52.22	151	66.11	151	66.11	151	66.11	151	66.11
22	-5.56	117	8.89	74	23.33	100	37.78	126	52.22	52.78	152	66.67	152	66.67	152	66.67	152	66.67
23	-5	118	9.44	75	23.89	101	38.33	127	52.78	53.33	153	67.22	153	67.22	153	67.22	153	67.22
24	-4.44	119	10	76	24.44	102	38.89	128	53.33	53.89	154	67.78	154	67.78	154	67.78	154	67.78
25	-3.89	120	10.56	77	25.0	103	39.44	129	53.89	54.44	155	68.33	155	68.33	155	68.33	155	68.33

°F	°C	°F	°C	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C
156	68.89	182	83.33	97.78	234	112.22	260	126.67	286	141.11		
157	69.44	183	83.89	98.33	235	112.78	261	127.22	287	141.67		
158	70	184	84.44	98.89	236	113.33	262	127.78	288	142.22		
159	70.56	185	85	99.44	237	113.89	263	128.33	289	142.78		
160	71.11	186	85.56	100	238	114.44	264	128.89	290	143.33		
161	71.67	187	86.11	100.56	239	115	265	129.44	291	143.89		
162	72.22	188	86.67	101.11	240	115.56	266	130	292	144.44		
163	72.78	189	87.22	101.67	241	116.11	267	130.56	293	145		
164	73.33	190	87.78	102.22	242	116.67	268	131.11	294	145.56		
165	73.89	191	88.33	102.78	243	117.22	269	131.67	295	146.11		
166	74.44	192	88.89	103.33	244	117.78	270	132.22	296	146.67		
167	75	193	89.44	103.89	245	118.33	271	132.78	297	147.22		
168	75.56	194	90	104.44	246	118.89	272	133.33	298	147.78		
169	76.11	195	90.56	105	247	119.44	273	133.89	299	148.33		
170	76.67	196	91.11	105.56	248	120	274	134.44	300	148.89		
171	77.22	197	91.67	106.11	249	120.56	275	135	301	149.44		
172	77.78	198	92.22	106.67	250	121.11	276	135.56	302	150		
173	78.33	199	92.78	107.22	251	121.67	277	136.11	303	150.56		
174	78.89	200	93.33	107.78	252	122.22	278	136.67	304	151.11		
175	79.44	201	93.89	108.33	253	122.78	279	137.22	305	151.67		
176	80	202	94.44	108.89	254	123.33	280	137.78	306	152.22		
177	80.56	203	95	109.44	255	123.89	281	138.33	307	152.78		
178	81.11	204	95.56	109.56	256	124.44	282	138.89	308	153.33		
179	81.67	205	96.11	110	257	125	283	139.44	309	153.89		
180	82.22	206	96.67	111.11	258	125.56	284	140	310	154.44		
181	82.78	207	97.22	111.67	259	126.11	285	140.56	311	155		

°F	°C	°F	°C	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C
312	155.56	337	169.44	183.33	387	197.22	412	211.11	437	225		
313	156.11	338	170	183.89	388	197.78	413	211.67	438	225.56		
314	156.67	339	170.56	184.44	389	198.33	414	212.22	439	226.11		
315	157.22	340	171.11	185	390	198.89	415	212.78	440	226.67		
316	157.78	341	171.67	185.56	391	199.44	416	213.33	441	227.22		
317	158.33	342	172.22	186.11	392	200	417	213.89	442	227.78		
318	158.89	343	172.78	186.67	393	200.56	418	214.44	443	228.33		
319	159.44	344	173.33	187.22	394	201.11	419	215	444	228.89		
320	160	345	173.89	187.78	395	201.67	420	215.56	445	229.44		
321	160.56	346	174.44	188.33	396	202.22	421	216.11	446	230		
322	161.11	347	175	188.89	397	202.78	422	216.67	447	230.56		
323	161.67	348	175.56	189.44	398	203.33	423	217.22	448	231.11		
324	162.22	349	176.11	189.56	399	203.89	424	217.78	449	231.67		
325	162.78	350	176.67	190	400	204.44	425	218.33	450	232.22		
326	163.33	351	177.22	191.11	401	205	426	218.89	451	232.78		
327	163.89	352	177.78	191.67	402	205.56	427	219.44	452	233.33		
328	164.44	353	178.33	192.22	403	206.11	428	220	453	233.89		
329	165	354	178.89	192.78	404	206.67	429	220.56	454	234.44		
330	165.56	355	179.44	193.33	405	207.22	430	221.11	455	235		
331	166.11	356	180	193.89	406	207.78	431	221.67	456	235.56		
332	166.67	357	180.56	194.44	407	208.33	432	222.22	457	236.11		
333	167.22	358	181.11	195	408	208.89	433	222.78	458	236.67		
334	167.78	359	181.67	195.56	409	209.44	434	223.33	459	237.22		
335	168.33	360	182.22	196.11	410	210	435	223.89	460	237.78		
336	168.89	361	182.78	196.67	411	210.56	436	224.44	461	238.33		

°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C
510	265,56	635	335	760	404,44	885	473,89	1100	593,33	1537,78	842,66
515	268,33	640	337,78	765	407,22	890	476,67	1105	596,11	1542,78	845,44
520	271,11	645	340,56	770	410	895	479,44	1110	598,89	1547,78	848,22
525	273,89	650	343,33	775	412,78	900	485,00	1120	601,11	1557,78	853,33
530	276,67	655	346,11	780	415,56	905	487,78	1130	603,89	1562,78	856,11
535	279,44	660	348,89	785	418,33	910	490,56	1135	606,67	1567,78	858,89
540	282,22	665	351,67	790	421,11	915	493,33	1140	609,44	1572,78	861,67
545	285,00	670	354,44	795	423,89	920	496,11	1145	612,22	1577,78	864,44
550	287,78	675	357,22	800	426,67	925	498,89	1150	615,00	1582,78	867,22
555	290,56	680	360	805	429,44	930	501,67	1155	617,78	1587,78	869,99
560	293,33	685	362,78	810	432,22	935	504,44	1160	620,56	1592,78	872,78
565	296,11	690	365,56	815	435	940	507,22	1165	623,33	1597,78	875,56
570	298,89	695	368,33	820	437,78	945	510	1170	626,11	1602,78	878,33
575	301,67	700	371,11	825	440,56	950	512,78	1175	628,89	1607,78	881,11
580	304,44	705	373,89	830	443,33	955	515,56	1180	631,67	1612,78	883,89
585	307,22	710	376,67	835	446,11	960	518,33	1185	634,44	1617,78	886,67
590	310	715	379,44	840	448,89	965	521,11	1190	637,22	1622,78	889,44
595	312,78	720	382,22	845	451,67	970	523,89	1195	640,00	1627,78	892,22
600	315,56	725	385	850	454,44	975	526,67	1200	642,78	1632,78	895,00
605	318,33	730	387,78	855	457,22	980	529,44	1205	645,56	1637,78	897,78
610	321,11	735	390,56	860	460	985	532,22	1210	648,33	1642,78	900,56
615	323,89	740	393,33	865	462,78	990	535	1215	651,11	1647,78	903,33
620	326,67	745	396,11	870	465,56	995	537,78	1220	653,89	1652,78	906,11
625	329,44	750	398,89	875	468,33	1000	540,56	1225	656,67	1657,78	908,89
630	332,22	755	401,67	880	471,11	1005	543,33	1230	659,44	1662,78	911,67

V. Обозначения некоторых марок сталей и сплавов, принятые в США, и близкие к ним по свойствам отечественные марки сталей и сплавов

Марка или название		Примерный химический состав
США	СССР	
1. Нержавеющие стали		
Серия 300	Хромоникелевые	—
304	0X18H9	19% Cr; 9% Ni; $\leq 0,08\%$ C
310	X23H18 (ЭИ—417)	25% Cr; 20% Ni; $\leq 0,25\%$ C
316	X16H13M3 (ЭИ—400)	17% Cr; 13% Ni; 2,5% Mo; $\leq 0,10\%$ C
321	0X18H9T	18% Cr; 9% Ni; Ti (5% C); $\leq 0,08\%$ C
347	X18H11B (ЭИ—398 и ЭИ—402)	18% Cr; 11% Ni; Nb (10% C); $\leq 0,08\%$ C
18—8	Хромоникелевые нержавеющие стали	16—19% Cr; 6—10% Ni; 0,07—0,20% C; остальное Mn ($< 2\%$); Si ($< 1\%$); иногда Mo ($\sim 0,5\%$), близкие по свойствам к стали типа 321
Серия 400	Высокохромистые	—
410	1X13 (ЭЖ1)	12% Cr; $\leq 0,15\%$ C
440	X17 (ЭЖ17)	17% Cr; $\leq 0,12\%$ C
446	X25 (ЭИ—181)	25% Cr; $\leq 0,35\%$ C
2. Прочие стали и сплавы		
SA 280 (0,5 Cr—Mo)	15XM	0,6% Cr; 0,5% Mo; 0,15% C
SA213T19	Хромомолибденовая	0,15% C; 0,4% Mn; $\leq 0,5\%$ Si; 3% Cr; 0,9% Mo
SA213T11 (1,25 Cr—Mo)	Хромокремнистомолибденовая	0,15% C; 1,25% Cr; 0,5% Mo; 0,7% Si

Марка или название		Примерный химический состав
США	СССР	
4130	Хромолибденовая 30ХМ	0,3% С; 0,6% Мн; 0,65% Cr; 0,2% Мо
S—590	Сплав 20—20—20 (ЭИ—673)	0,5% С; 20% Cr; 20% Ni; 20% Co; 4% Мо; 4% Nb
S—816	—	0,4% С; 20% Cr; 20% Ni; 45% Co; 3% Мо; 4% W; 4% Nb
Ийконель	X20H80 (ЭХН80)	0,1% С; 15% Cr; 76% Ni; < 7% Fe
Ийконель X	ЭИ—607	0,04% С; 15% Cr; 2,5% Ti; 1% Nb; 0,8% Al; < 7% Fe; остальное Ni
17—14 Cu—Mo	—	17% Cr; 14% Ni; 0,5% Nb; 3% Cu; 3% Мо; 0,5% Ti
18 Cr—35 Ni	X15H35 (ЭИ—612)	18% Cr; 35% Ni
Хастеллой X	—	22% Cr; 45% Ni; 9% Мо; < 0,15% C
Хастеллой B	—	0,05% С; 0,6% Мн; 0,2% Si; 65,1% Ni; 28,6% Мо; 0,3% V; 4,7% Fe
Хастеллой C	—	0,12% С; 0,78% Мн; 0,64% Si; 14,8% Cr; 16,45% Мо; 4,08% W; 1,14% Co; 0,3% V; ост. Ni
K138A (Кеннаметалл)	—	80% TiC; 15% Co; 5% (WC + TaC)
Сильхромо 5S	X6CM (ЭСХ6М)	5% Cr; 0,5% Мо; 1,5% Si; 0,12% C
Нитраллой	38ХМЮА (азотируемая)	0,4% С; 1,5% Cr; 0,2% Мо; 0,9% Al
Стедлит 21 (виталий)	—	0,2% С; 1,0% Мн; 0,6% Si; 28% Cr; 2% Ni; 6,0% Мо; 64% Co; ост. Fe
Стедлит 23	—	0,4% С; 0,3% Мн; 0,6% Si; 24,0% Cr; 2% Ni; 6,0% W; 68% Co; ост. Fe

Марка или название		Примерный химический состав
США	СССР	
A—286	—	15,5% Cr; 26,0% Ni; 1,2% Mo; 1,9% Ti; 0,2% Al; 0,3% V
Никель L	—	99,4% Ni; 0,1% Cu; 0,15% Fe; 0,2% Mn; 0,05% Si; < 0,02% C

VI. Классификация и технические условия для некоторых металлов, выпускаемых промышленностью СССР

1. Натрий металлический (ГОСТ 3273—65)

Наименование показателей	Марка	
	A	B
Внешний вид и цвет	Слитки серебристого цвета	
Содержание общей щелочности в пересчете на металлический натрий не менее, %	99,5	99,5
Содержание активного натрия не менее, %	98,5	98,5
Содержание калия не более, %	0,5	1,0
Содержание железа не более, %	0,02	0,02

2. Ртуть (ГОСТ 4658—49)

Марка	Ртуть не менее, %	Нелетучий остаток, не более, %
P1	99,999	0,001
P2	99,990	0,010
P3	99,900	0,100

Марка	Химический состав, %											
	Примеси. не более, %											
	Свинец не менее	Железо	Медь	Цинк	Мышьяк	Серебро	Олово	Сурьма	Висмут	Кальций и натрий в сумме	Магний, олово и натрий в сумме	Всего примесей
C0	99,992	0,001	0,0005	0,001	0,0005	0,0003	0,0005	0,0005	0,004	0,002	—	—
C1	99,985	—	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,006	—	—	0,003
C2	99,95	0,005	0,003	0,001	0,002	0,002	0,0015	0,002	0,005	0,03	0,01	—
C3	99,9	0,01	0,005	0,002	0,005	0,005	0,0015	0,005	0,005	0,06	0,03	—
C3 (ост.)	0,01	0,005	0,002	0,005	0,005	0,0015	0,008	0,4—0,8	0,06	0,03	—	—
C4	99,6	0,01	0,01	0,01	—	0,002	—	—	0,1	0,05	0,25	—

4. Олово (ГОСТ 860—41)

Марка	Химический состав, %									
	Примеси не более, %									
	Олово не менее	Мышьяк	Железо	Медь	Свинец	Висмут	Сурьма	Сера	Всего	
O1	99,90	0,015	0,009	0,01	0,04	0,01	0,015	0,010	0,10	
O2	99,56	0,02	0,02	0,03	0,25	0,05	0,05	0,02	0,44	
O3	98,35	0,10	0,05	0,10	1,00	0,06	0,30	0,04	1,65	
O4	96,25	0,10	0,05	0,15	3,00	0,10	0,30	0,05	3,75	

VII. Теплофизические свойства ртути по данным ЭНИН АН СССР *

Температура, °C	Удельный вес, кг/м³	Темпероплотность, ккал/м³·°C	Темплотность, ккал/кг·°C	Темплотность, ккал/кг·°C	Температура плавления, °C	Кинематическая вязкость, мм²/сек	Число Прандтля
0	13590	6,70	0,0334	—	1,48	12,4	0,030
10	13570	6,81	0,0333	—	1,51	11,8	0,028
20	13550	6,92	0,0332	—	1,54	11,4	0,027
50	13470	7,25	0,0329	—	1,64	10,4	0,023
100	13350	7,80	0,0328	—	1,78	9,4	0,019
150	13230	8,35	0,0328	—	1,92	8,6	0,016
200	13110	8,90	0,0328	—	2,07	8,0	0,014
250	13000	9,45	0,0328	—	2,22	7,5	0,012
300	12880	10,00	0,0328	—	2,37	7,1	0,011
350	12800	10,50	0,0328	—	2,50	6,8	0,010
400	12700	10,85	0,0329	—	2,60	6,6	0,0091
450	12600	11,15	0,0329	—	2,69	6,4	0,0086
500	12480	11,45	0,0330	—	2,78	6,2	0,0080

* Тепломерегия, 1958, № 10.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агейкин Д. И., Дессосова А. А., Электромагнитный раско-
ломер, «Автоматика и телемеханика», XVII, № 12, 123—126 (1956).
2. Аморзи А., Доппен А., Вагнер Г., Опытный реактор-
размножитель на быстрых нейтронах. Сб. «Материалы Международной конфе-
ренции в Женеве по мирному использованию атомной энергии», т. 3, Р/491,
Госэнергоиздат, 1958.
3. Барнс А., Кох Л., Монсон Г., Смит Ф., Технический
проект Е. В. Р. II, прототип энергетической установки с реактором на быстрых
нейтронах. Сб. «Материалы Международной конференции в Женеве по мирному
использованию атомной энергии», т. 3, Р/501, Госэнергоиздат, 1958.
4. Беляев, Фирсанова, Взаимодействие углеродистых мате-
риалов с натрием при высоких температурах. Сб. «Труды Московского инсти-
тута цветметаллов им. М. И. Калинина», № 25, стр. 162—171.
5. Боришанский В. М., Кутателадзе С. С., «Энергома-
шиностроение», 1957, № 6.
6. Бос, Богард, Гранд и др., Растворимость конструкционных
сталей в натрии. Сб. «Материалы Международной конференции в Женеве по мир-
ному использованию атомной энергии», т. 8, Р/124, Металлургияиздат, 1958.
7. Гельман Л. И., Теплообмен при конденсации ртутного пара, «Тепло-
энергетика» № 3, 1958.
8. Гудцов Н. Т., Гавзе М. Н., Воздействие ртути как теплоноси-
теля на сталь в энергетических установках, Изд. АН СССР, 1956.
9. Зинн В., Энергетические реакторы на быстрых нейтронах. Сб. «Мате-
риалы Международной конференции в Женеве по мирному использованию ато-
мной энергии», т. 3, Р/814, Госэнергоиздат, 1958.
10. «Известия АН СССР», ОТН, № 5, 1949, Г. Н. Кружилин.
11. Канаев А. А., «Журнал технической физики», 1953, т. XXIII,
вып. 2.
12. Канаев А. А., «Советское котлотурбостроение», 1953, № 2.
13. Кендалл Дж., Фрай Т., Проект реактора на быстрых ней-
тронах в Даурии. Сб. «Материалы Международной конференции в Женеве по
мирному использованию атомной энергии», т. 3, Р/405, Госэнергоиздат, 1958.
14. Кларк Ф. М., Механические насосы для жидкого металла. «При-
кладная механика и машиностроение», № 3, 1954.
15. Конторович Л. М., Рапорт Ф. М., Тонкая очистка газов
от кислорода, «Заводская лаборатория», XVII, № 5, стр. 632—633, 1951.
16. Корнеев М. И., «Теплоэнергетика», № 4, № 7, 1955.
17. Крисер Ф. Е., Бриджмен У. Х., Троки Т., Использо-
вание натрия и натриево-калиевого сплава в качестве теплоносителя. Сб. «Мате-

- риалы Международной конференции в Женеве по мирному использованию
атомной энергии», т. 8, Р/123, Металлургияиздат, 1958.
18. Ложкин А. Н., Канаев А. А., «Советское котлотурбостроение»,
1939, № 4.
19. Ложкин А. Н., Канаев А. А., Бинарные установки, Машгиз,
1946.
20. Ложкин А. Н., Канаев А. А., Сирый П. О., «Советское
котлотурбостроение», № 8—9, 1938.
21. Михеев М. А., Баум В. А., Воскресенский К. Д.,
Федюнский О. С., Теплоотдача расплавленных металлов. Доклад на Между-
народной конференции по мирному использованию атомной энергии, Женева,
1955.
22. Новиков И. И., Соловьев А. Н., Хабахашева Е. М.,
Груздев В. А., Приданцев А. И., Васенина М. А., «Атомная
энергия», № 4, 1956.
23. Паркинс В., Экспериментальный натриевый реактор. Сб. «Мате-
риалы Международной конференции в Женеве по мирному использованию ато-
мной энергии», т. 3, Р/499, Госэнергоиздат, 1958.
24. Пугачевич П. П., Экспериментальное изучение поверхностного
натяжения металлов и растворов. «Журнал физической химии», XXV, стр. 1365,
1951.
25. Семенченко В. К., Поверхностные явления в металлах и спла-
вах, Металлургияиздат, 1957.
26. Сиджел С., Картер Р., Бауман Н., Хейворд Ж. Б.,
Основы технологии натриевого реактора. Сб. «Материалы Международной конфе-
ренции в Женеве по мирному использованию атомной энергии», т. 8, Р/829,
Металлургияиздат, 1958.
27. Стирикович М. А., Сорин А. Р., Семеновкер И. Е.,
«Советское котлотурбостроение», № 9—10, 1940.
28. Труды института физики, VIII, Издательство АН Латв. ССР, Рига,
1956, Прикладная магнитогидродинамика.
29. Фастовский В. Г., Ровинский А. Е., Лабораторная уста-
новка для получения и анализа чистого аргона, «Заводская лаборатория»,
XVII, № 5, стр. 531—541, 1951.
30. Цупрун Л. И., Тарытина М. Н., Исследование поведения
нержавеющей стали 1X18H9T в контакте с жидким сплвом, висмутом и их
эвктическим сплавом при температуре 500—600° С, Москва, 1956.
31. Шваб В. А., Теоретическая формула теплообмена в трубе при тур-
булентном течении жидкостей, ЦКТИ, 1938.
32. Швидковский Е. Г., Некоторые вопросы вязкости расплавлен-
ных металлов. Гос. изд. технико-теоретической литературы, Москва, 1955.
33. Шихтенбергер Т., Таллотт, Каню В., Новик М.,
Опыт работы и экспериментальные результаты, полученные при эксплуатации
реактора на быстрых нейтронах с натриево-калиевым охлаждением. Сб. «Мате-
риалы Международной конференции в Женеве по мирному использованию ато-
мной энергии», т. 3, Р/813, Госэнергоиздат, 1958.
34. Ядерные реакторы, т. II (Техника ядерных реакторов). Материалы
Комиссии по атомной энергии (США), 1957, т. III (Материалы для ядерных
реакторов), 1956.
35. Addison C., Addison W., Kerridge R., «J. Chem. Soc.,
стр. 3047—3050 (September, 1955).
- Жидкие металлы. Часть III. Влияние пленки окиси на поверхностное натя-
жение жидкого металла.
36. «Atomic», 7, V, № 5, стр. 175—177 (1956).
- Насосы для жидких металлов.
37. Barnes A., «Nucleonics», January, 1953, стр. 16.
- Электромагнитные насосы постоянного тока.
38. Barnes, Сб. «Progr. Nucl. Energy», Ser. 4, 1, 1956, стр. 165—176.
- Перекачивание жидких металлов.
39. Bauer S. G., «AERE», № X/R 1381, 1954.

Жидкие металлы в качестве эффективных теплоносителей при высоких тем-
пературах.
40. Bauer S. G., «Chem. Engng. Progr.», 52, № 2, стр. 75—76, 1956.
Техника работы с жидкими металлами.
41. Bauer S. G., Сб. «Progr. Nucl. Energy», Ser. 4, Techn. a. Engng.,
1956, стр. 135—145.
Обращение с жидкими металлами.
42. Blake L., «Engineer», 202 (5256), стр. 541—544, 1956, «Engineer»,
202 (5257), стр. 572—575, 1956.
Кондукционные насосы постоянного и переменного тока для жидких металлов.
43. Blake L., «Proceedings of Institution of Electrical Engineers»,
vol. 104, part A, № 13, 1957, стр. 49—67.
Электромагнитные насосы для жидких металлов.
44. Boardie C., «Atoms and Nuclear Energy», vol. 8, № 2, 1957, стр. 41—45.
Жидкие металлы и ядерная энергия.
45. Bowman F., Cubicciotti D., Сб. «Problems in Nuclear Engi-
neering», под ред. Hughes D., Mc. Lain S., Williams C., vol. 1, 1957.
Применение циркония в натриевых контурах.
46. Brill E., «Mechanical Engineering», vol. 75, № 5, 1953, стр. 369—373.
Насосы для перекачивания жидких металлов.
47. Brooks K., Rosenblatt A., «Mechanical Engineering», vol. 75,
№ 5, May, 1953, стр. 363—368.
Проектирование и испытание теплообменников и парогенераторов на жидких
металлах.
48. Brown H., Amstead B., Short B., «Trans. of the ASME»,
vol. 79, № 2, 1957, стр. 279—285.
Распределение температур и скоростей и теплоотдача в жидких ме-
таллах.
49. Bruggeman W. H., «Am. Inst. Chem. Engrs», 2, VI, № 2, стр. 153—
156, 1956.
Контроль чистоты натриевого теплоносителя в реакторных системах.
50. Brush E., «Corrosion», vol. 11, № 7, 1955, стр. 299—303.
Конструкционные материалы для работы в среде жидкого натрия.
51. Brush, Koenig. Сб. «Nucl. Metallurgy», 1956, стр. 21—32.
Поведение материалов в жидких металлах.
52. «B. W. K.» 7, № 4, 1955, «V. D. I.», 95, № 5, стр. 663—640, 1953, 96,
№ 19, 1954.
Электромагнитные расходомеры.
53. Sage J., «Mechanical Engineering», May, 1955, стр. 369.
Электромагнитные насосы для работы при высоких температурах.
54. Cathcart J., Manly W., «Corrosion», vol. 10, 1954, стр. 432—434.
Методика коррозионных испытаний в среде жидкого свинца.
55. «Chem. and Engng News», 32, № 30, стр. 2966, 1954.
Проект натриево-графитового энергетического реактора.
56. «Chem. Engng News», 32, № 47, стр. 4706, 1954.
Электромагнитный насос для жидких металлов.
57. «Chem. Engng. News», 33, VIII, № 33, стр. 3199—3201, 1955.
Герметичные насосы.
58. «Chem. Engng» (Tokyo), 19, № 5, стр. 283—289, 1955.
Теория аналогии теплоотдачи и сопротивления при движении жидкостей
в трубе и теплоотдача в случае использования расплавленного металла.
59. «Chem. Engng», 63, VIII, № 7, стр. 215, 1956.
Вентили для жидких металлов.
60. Clark P., «Mechanical Engineering», vol. 75, № 8, 1953, стр. 615—618.
Механические насосы для жидких металлов.
61. Codegone C., «Termofecnica», 10, № 10, стр. 449—457, 1956.
Теплоносители в энергетических ядерных реакторах.
62. Core W., General Discussion on Heat Transfer, Inst. Mech. Eng. and
A. S. M. E., 1951, стр. 453—458.
Теплоотдача к ртуть.

63. Cottrell W., Mann L., «Nucleonics», vol. 12, № 12, Dec. 1954—
стр. 22—25.
Материалы для работы в среде натрия и натрий-калия.
64. Cygan R., Stelle A., «Chemical Engineering Progress», vol. 52,
№ 4, 1956, стр. 157—159.
Конструкции и работа насосов и вентилях с замораживающимися уплот-
нениями.
65. Donohue D., «Industrial and Engineering Chemistry», vol. 41, 1949,
стр. 2499—2511.
Теплопередача и сопротивление в теплообменниках.
66. Doody T., Younger A., Preprints of papers presented at meeting
of Am. Inst. Chem. Eng., Atlantic City (New Jersey), Dec. 5, 1951, p. 77—88.
Теплоотдача к чистой ртути и к ртуть, содержащей добавки натрия.
67. Douglas T., Specific heats of liquid metals and liquid salts. Сб.
«Problems in Nuclear Engineering», vol. I, ed. by D. Hughes, S. McInch,
C. Williams, 1957, стр. 191—199.
68. Dubsek F., Strojrenstvi, 5, № 1, стр. 819—824, 1955.
Использование натрия в качестве промежуточного теплоносителя на атом-
ных электростанциях.
69. Dunn W. E., Bonilla C. F., Ferstenberg C., Gross B. J.,
«Am. Inst. Chem. Engrs», 2, № 2, стр. 184—189, 1956.
Массообмен в жидких металлах.
70. Dwyer G., «Nucleonics», vol. 12, № 6, 1951.
Теплообмен в реакторах на жидкотопливном топливе.
71. «Electr. J. E.», 36, № 3, стр. 53, 1956; «Electr. Rev.», 158, № 11, стр. 404,
1956; «Process Control. a. Automat.», 3, № 3, стр. 112, 1956.
Жидкотеплообменные насосы для атомных электрических станций.
72. «Electr. J.», 161, № 8, стр. 536, 1956.
Экспериментальный реактор, охлаждаемый натриевым теплоносителем.
73. «Electr. Times», 129, № 3553, стр. 190, 1956.
Насос для жидкого металла.
74. «Electr. Times», 130, № 3390, стр. 666—667, 1956.
Насосы для жидких металлов.
75. Elrod H., Fouse R., «Transactions of the ASME», vol. 74, № 4,
1952.
Расчет электромагнитных расходомеров.
76. «Engineer», 201, № 5231, стр. 409, 1956; «Metallurgia», 53, VI, № 320,
стр. 277, 1956.
Электромагнитные насосы для жидких металлов.
77. English D., Barret T., General Discussion on Heat Transfer,
Inst. Mech. Eng. and ASME, 1951, стр. 458—460.
Теплопередающие свойства ртути.
78. Ewing C., Grand J., Miller R., «The Journal of Physical
Chemistry», vol. 58, № 12, Dec., 1954, стр. 1086—1088.
Взаимодействие сплавов натрий — калий.
79. Ewing C., Seebold R., Grand J., Miller R., «The Jour-
nal of Physical Chemistry», vol. 59, June, 1955, № 6, стр. 524—526.
Теплопроводность ртути и двух сплавов натрий — калий.
80. «Fluid Handling», № 68, 240—246, 1955.
Жидкие металлы и проектирование атомных электростанций. Обзорная статья.
81. «Fluid Handling», № 70, стр. 319—322, 324, 1956.
Жидкие металлы и конструкция атомной энергетической установки. Обзор-
ная статья.
82. Ford G. W., «Engineering», 182, № 4735, стр. 727—730, 1956.
Сравнение энергетических реакторов, охлаждаемых водой под давлением,
и реакторов с графитовым замедлителем, охлаждаемых натриевым теплоноси-
телем.
83. Ford G. W., Сб. «Progr. Nucl. Energy», Ser. 4, 1, 1956, стр. 177—193.
Механические насосы для теплоносителей в энергетических реакторах.
84. Fortescue P., J. «Nuclear Energy», 1954, vol. 1, стр. 1—23.

Проектирование абсолютно герметичных механических насосов для жидкого натрия.

85. Frost B., «Atoms and Nuclear Energy», vol. 8, № 10, Oct., 1957, стр. 387—390.

Смачивание твердых тел жидкими металлами.

86. Frost B., «Nuclear Engineering», № 8, Nov., 1956, стр. 334—339 (Part I); № 9, Dec., 1956, стр. 373—377 (Part II).

Проблемы реакторов с жидкотеплоносительным топливом.

87. Gangler J., «Journal American Ceramic Society», vol. 37, № 7, 1954, стр. 312—316.

Сопротивление жаропрочных материалов воздействию сплава висмута — свинца.

88. Gas, Wasser, Wärme, 7, № 1, стр. 21, 1953.

Галлий как теплоноситель при производстве ядерной энергии.

89. Gilliland E., Musser R., Page W., General Discussion on Heat Transfer, Inst. Mech. Eng. and ASME, 1951, стр. 402—404.

Теплоотдача к ртути.

90. Gray J., Neal R., Voorhees B., «Nucleonics», vol. 14, № 10, Oct., 1956, стр. 34—37.

Простой метод контроля содержания кислорода в жидком натрии.

91. Greenwood G. W., Chape B., «J. Nucl. Energy», 3, № 1/2, стр. 1—6, 1956.

Влияние тепловых колебаний в реакторах с металлическим теплоносителем.

92. Gurinsky, «Nucleonics Metallurgy», 1956, стр. 5—20.

Поведение материалов в жидких металлах.

93. Haag F., «Nucleonics», vol. 15, № 2, 1957, стр. 58—63.

Перенос радиоактивности в натриевых контурах.

94. Hackett H., «Transactions of the ASME», vol. 64, стр. 647, 1942.

Применение ртути в энергетике.

95. Hall W. B., Crofts T. J., «Engineers», 201, № 5218, стр. 128—130, 1956; «Chart. Mec. Engng.», 3, № 1, стр. 40—41, 1956; «J. Brit. Nucl. Energy Conf.», 1, № 2, стр. 76—92, 1956.

Применение натрия и натриево-калиевых сплавов в качестве теплоносителей.

96. Hall W. B., Crofts T. J., «Fluid Handling», № 73, стр. 45—48, 1956.

Применение натрия и натриево-калиевых сплавов в качестве теплоносителей.

97. Hall W., Jenkins A., «Journal of Nuclear Energy», vol. 1, 1955, стр. 244—263.

Опыты по теплоотдаче к натрию и сплаву натрия — калий.

98. Harrison W., Menke J., «Trans. ASME», vol. 71, № 7, Oct., 1949, стр. 797—803.

Теплоотдача к жидким металлам. Течение в асимметрично обогриваемых каналах.

99. «Heating, Pip. a. Air Condit.», 25, № 7, стр. 112—113, 1953.

Трубопровод для жидкого металла.

100. Hines E., Gemont A., Kelley J., «Nucleonics», 14, № 10, стр. 38—41, 1956.

Экспериментальное определение максимальных значений давления и температуры, которым может быть подвергнут корпус реактора в случае реакции между натрием и воздухом.

101. Hoe R., Dropkin D., Dwyer O., «Transactions of the ASME», vol. 79, May, № 4, 1957, стр. 899—907.

Теплоотдача к ртути, омывающей в поперечном направлении шахматный пучок труб.

102. Hoffman E., Manly W., C6. «Problems in Nuclear Engineering», v. 1, под ред. Hughes D., Mc Lain S., Williams C., 1957, стр. 128—137.

Сравнение натрия, лития и свинца по их коррозионному воздействию на конструкционные материалы.

103. Hughes D., Mc Lain S., Williams C., C6. «Problems in Nuclear Engineering», vol. 1, 1957.

Проблемы ядерной техники.

104. Hurst R., Mc Lain S. (ред.). C6. «Progress in Nuclear Energy», Series IV, Technology and Engineering, vol. 1, London, 1956.

Вопросы ядерной техники.

105. Isakoff S., Drew T., General Discussion on Heat Transfer, Inst. Mech. Eng. and ASME, 1951, стр. 405—409.

Перенос тепла и количества движения в турбулентном потоке ртути.

106. Jackson B. (ред.), Liquid—Metals Handbook, Sodium (NaK) supplement, June, 1955.

Справочник по жидким металлам.

107. «J. Amer. Ceram. Soc.», 37, № 3, стр. 146—153, 1954.

Устойчивость жаропрочных материалов в расплавленных металлах.

108. Jay T. C., «Radio Electronics», 26, № 11, стр. 60, 1955.

Магнитный расхождер.

109. Johnson H., Clabaugh W., Hartnett J., «Trans. of the ASME», vol. 76, 1954, стр. 505—511.

Теплоотдача к ртути при турбулентном течении в трубе.

110. Johnson H., Hartnett J., Clabaugh W., «Trans. of the ASME», vol. 75, № 6, Aug. 1953, стр. 1191—1198.

Теплоотдача к расплавленной этикетке висмута — свинец при турбулентном течении в трубе.

111. Johnson H., Hartnett, Clabaugh W., «Trans. ASME», v. 76, № 4, стр. 513—517, 1954.

Теплоотдача к жидкому сплаву висмута со свинцом и ртути при ламинарном и переходном потоках в трубах.

112. Johnson H., Hartnett J., Clabaugh W., Fried L., «Trans. of the ASME», vol. 79, № 5, July, 1957, стр. 1079—1084.

Коэффициент расхода дроссельных шайб и коэффициент сопротивления при турбулентном течении этикетки свинец — висмут в трубе.

113. Klein H. Z., «Metallkunde», X, 44, № 10, стр. 450—456, 1953.

Теплоотдача при свободной конвекции в расплавленном металле.

114. Koenig R., Brush E., «Materials and Methods», vol. 42, № 6, 1955, стр. 110—114.

Конструкционные материалы для систем с жидким натрием.

115. Lee J. F., «Nucleonics», 12, № 4, стр. 74, 76—77, 1954.

Термодинамические свойства жидкого натрия.

116. Lenert B., «Phys. Reviews», 94, № 4, 1954.

Магнитогидродинамические волны в жидком натрии.

117. Lenert B., «Proc. Roy. Soc. A», 233, XII, стр. 1194—1195, 1955.

Нестабильность ламинарного потока ртути, вызванная внешним магнитным полем.

118. Lewis J. B., «Discovery», 17, № 11, стр. 469—471, 1956.

Применение жидких металлов в ядерных реакторах.

119. Lubarsky B., Kaufman S., «NACA», Report 1270, 1956.

Обзор экспериментальных исследований по теплоотдаче в жидких металлах.

120. Lyon R. (ред.), Liquid—Metals Handbook, Atomic Energy Comm., Dept. Navy, First ed., June, 1950, Second ed., June, 1952.

Справочник по жидким металлам.

121. Lyon R. N., C6. «Prog. Nucl. Energy», Ser. 4, 1, 1956, стр. 245—252.

Расчет теплоотдачи к жидкому металлу.

122. Lyon R., «Transactions of Am. Inst. Chem. Engrs.», vol. 47, 1951, стр. 75—79.

Теплоотдача в жидких металлах.

123. McIntosh A. B., Bagley K. Q., «J. Inst. Metals», 84, № 7, стр. 251—270, 1955—1956.

Выбор материала для оболочек атомных реакторов, охлаждаемых натрием (каллем) и углекислотой.

124. Mack G., Davis J., Bartell F., «Journal of Physical Chemistry», vol. 45, 846, 1941.

Поверхностное натяжение галлия.

125. Makansi M., Muendel C., Selke W., «The Journal of Physical Chemistry», vol. 59, № 1, January, 1955, стр. 40—42.
 Определение упругости паров натрия.
 126. Manly W. D., «Corrosion», 12, № 7, стр. 46—52, 1956.
 Коррозионное действие жидких металлов.
 127. Martinelli R., «Trans. of ASME», vol. 69, № 8, Nov. 1947, стр. 947—959.
 Теплоотдача к расплавленному металлу.
 128. Martin J. W., Smith G. C., «Metallurgy», 54, № 325, стр. 227—232, 1956.
 Предварительное исследование усталости материалов, работающих в среде жидкого металла.
 129. «Mech. Engng», 77, VI, № 6, стр. 488, 1955.
 Герметичные насосы с электроприводом.
 130. Moyer W., Riemen W., «Journal of Applied Physics», vol. 25, № 3, March, 1954.
 Измерение термического сопротивления на поверхности раздела натрия — нержавеющей стали.
 131. Munch R., «Industrial and Engineering Chemistry», vol. 44, № 1, 1952.
 Электромагнитный расколдер.
 132. Murgatroyd W., «Phil. Mag.», Series 7, vol. 44, стр. 1348, Dec., 1953.
 Опыты по магнитогидродинамике течения в каналах.
 133. Neiman K. Z., «Phys. Chem.», 2, № 3—4, стр. 215—228, 1954.
 Коэффициент испарения жидкого калия.
 134. Northfield H. J., «Engineering», 182, № 4722, стр. 292—293, 1956.
 Об эффективности электромагнитных насосов для жидких металлов.
 135. «Nuclear Power», vol. 1, № 3, July, 1956, стр. 131.
 Пористые фильтры из нержавеющей стали с размером пор до 1—2 микрон.
 136. «Nuclear Power», vol. 2, № 16, Aug., 1957, стр. 338.
 Термозащита натриевого контура реактора в Дауни.
 137. «Nucl. Engng», 1, № 6, стр. 238—240, 1956.
 Применение жидких металлов в качестве теплоносителей в процессах химической технологии.
 138. «Nucleonics», 13, № 2, стр. 70, 1955.
 Испытание теплообменных и коррозионных свойств материала «глобайрон» для оболочек теплоделяющих элементов в реакторе-размножителе на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем.
 139. Olson R. L., «Nucleonics», 13, № 6, стр. 70—72, 1955.
 Конструкция экспериментального реактора с натриевым охлаждением.
 140. Perkins J. E., Rep. Proc. Liquid Met. Utilis. Confer., AERE, № X/R, 1381, 1954.
 Исследование работы парогенератора на жидком натрии.
 141. Perkins W., сб. «Problems in Nuclear Engineering», vol. I, под ред. Hughes D., Mc Lain S., Williams C., 1957, стр. 191—199.
 Оборудование для экспериментального натриевого реактора.
 142. Pulsford D. W., «J. Sci. Instr. Phys.», 32, № 9, стр. 362—363, 1955.
 Измерение уровня жидкого натрия в трубах из нержавеющей стали индукционным методом.
 143. Reed E., «J. of American Ceramic Society», vol. 37, № 3, 1954, стр. 146—153.
 Стойкость жаропрочных материалов в жидких металлах.
 144. Risk A. E., «Mod. Pow. Engng», 49, № 9, стр. 102—103: № 12, стр. 116—117, 1955.
 Насосное оборудование и теплосъем в ядерных реакторах, I, II.
 145. Savage H., Cobb W., «Chemical Engineering Progress», vol. 50, № 9, Sept., 1954.
 Центробежные насосы для жидких металлов, работающие при высокой температуре.

146. Seban R., Casey D. F., «Trans. of ASME», vol. 79, № 7, Oct., 1957, стр. 1514—1517.
 Теплоотдача при турбулентном течении сплава свинец — висмут в кольцевом канале.
 147. Seban R., «Trans. ASME», vol. 72, № 6, Aug., 1950, стр. 783—785.
 Теплоотдача к турбулентному потоку жидкости, текущей между параллельными стенками с асимметричным распределением температуры.
 148. Seban R., Shimazaki T., «Trans. of the ASME», vol. 73, 1951, стр. 803—807.
 Теплоотдача к турбулентному потоку жидкости, текущей в трубке при постоянной температуре стенки.
 149. Serra F., «Termotecnica», 9, № 9, стр. 442—451, 1955.
 Жидкие теплоносители.
 150. Shercliff T. A., «Proc. Roy. Soc.», Ser. H., 233, XII, стр. 1194, 1955.
 Некоторые инженерные приложения магнитной гидродинамики.
 151. Sittig M., Sodium; its manufacture, properties and uses, Reinhold, 1956.
 Натрий, его производство, свойства и использование.
 152. Sleicher C., Tribus M., «Trans. of the ASME», vol. 79, 1957, стр. 789—797.
 Теплоотдача при турбулентном течении жидкости в трубе с произвольным распределением температуры стенки.
 153. Speed F., «Nuclear Power», vol. 2, № 15, July, 1957, стр. 277—284.
 154. Starr C., «Electr. Worlds», 14, 5, № 13, стр. 44, 1956.
 Использование натрия-графитового реактора для производства электроэнергии.
 155. Starr C., «Power», 99, № 7, стр. 152, 154, 1955.
 Электростанция с натриево-графитовым реактором.
 156. Starr C., сб. «Progr. Nucl. Energy», Ser. 2, Reactors, 1956, I, стр. 389—434.
 Реактор с графитовым замедлителем, охлаждаемый натриевым теплоносителем, его описание, характеристики и перспективы применения.
 157. Strachan J. F., Harris N. J., «J. Inst. Metals», 3, № 1, стр. 17—24, 1956.
 Разделение жидкой ртутью металлов, не подвергавшихся механическим напряжениям.
 158. «Strojirentsvi», 5, № 9, стр. 664—670, 1955.
 Жидкие металлы — теплоносители будущего.
 159. Taylor J. M., «Research», 8, № 3, стр. 102—105, 1955.
 Значение жидких металлов для разработки конструкций ядерных реакторов.
 160. Taylor J., «Phil. Mag.», vol. 46, стр. 867, 1955.
 Поверхностная энергия щелочных металлов.
 161. Taylor J. W., «J. Nucl. Energy», 2, № 1, стр. 15—30, 1955.
 О значении явлений смачивания жидкими металлами для процессов в ядерных реакторах.
 162. Tidball R., Preprints of papers for heat transfer symposium at forty-fourth annual meeting, the American Institute of Chemical Engineers, Dec. 5, 1951, стр. 99—122.
 Работа небольших жидкометаллических теплообменников лабораторного типа.
 163. Trefethen L., General Discussion on Heat Transfer, Inst. Mech. Eng. and ASME, 1951, стр. 436—438.
 Теплоотдача к жидким металлам при течи в круглых трубах и кольцевых каналах.
 164. Trocki T., Bruggeman W., Grever F., сб. «Progr. Nucl. Energy», Ser. 4, «Techn. a. Engng», 1956, I, стр. 146—162.
 Проблема оборудования реакторов с натрием или сплавом натрия — калий в качестве теплоносителя.
 165. Trocki T., Nelson D., «Mechanical Engineering», vol. 75, № 6, 1953, стр. 472—476.

- Оборудование полупромышленного жидкометаллического контура.
166. Watt D., «Engineering», vol. 181, № 1703, April 27, 1956.
Электромагнитные насосы для жидких металлов (перекачивание теп-
лителей и топлива ядерных реакторов).
167. Webber H., Goldstein D., Fellingner R., «J
ASME», II, 77, № 2, стр. 97—102, 1955.
Определение теплопроводности расплавленного лития.
168. Weeks J. R., сб. «Progr. Nucl. Energy», Ser. 4, № 1, стр. 378—
1956.
Металлургическое исследование жидкого висмута и его сплавов в кач-
те теплоносителя и составной части жидкометаллического топлива ядерных
реакторов.
169. «Westinghouse Eng.», 16, VIII, № 4, 127, 1956.
Новый механический насос для жидких металлов.
170. Woodrow J., «JERE», № F/R, 452, 1954.
Электромагнитные и индукционные насосы для ядерных реакторов.
171. Woolen W., «Nuclear Power», vol. 2, № 15, July, 1957, стр. 267—
Электромагнитные насосы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От авторов	3
Введение	5

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ. СВОЙСТВА ЖИДКИХ МЕТАЛЛОВ

Глава I. Физические свойства	38
1. Натрий	38
2. Калий	50
3. Сплавы натрия — калия	56
4. Литий	63
5. Галлий	71
6. Ртуть	79
7. Олово	79
8. Висмут	82
9. Свинец	85
10. Эвтектический сплав свинца и висмута	89
Глава II. Химические свойства	89
11. Натрий	89
12. Калий	100
13. Сплавы натрия — калия	102
14. Литий	102
15. Галлий	104
16. Ртуть	104
17. Олово	105
18. Висмут	106
19. Свинец	107
20. Эвтектический сплав свинца и висмута	108
Глава III. Гидравлика и теплообмен в жидких металлах	110
21. Гидравлика потока жидкого металла	110
22. Теплообмен при свободной конвекции	117
23. Теплообмен при вынужденной конвекции	130
24. Теплообмен при кипении и конденсации	151
Глава IV. Коррозионные свойства конструкционных материалов в жидко- металлических средах	158
25. Натрий, калий и их сплавы	160
26. Литий	175
27. Галлий	178
28. Ртуть	180
29. Свинец, висмут, олово и их сплавы	187
30. Перенос активности в жидкометаллических системах	194

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ
ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Глава V. Проектирование систем	208
31. Общие принципы компоновки оборудования	208
32. Поведение конструкционных материалов в жидкометаллических контурах	212
33. Проектирование трубопроводов	217
34. Тепловая изоляция	222
Глава VI. Оборудование жидкометаллических систем	229
35. Механические насосы	229
36. Электромагнитные насосы	245
37. Теплообменники и парогенераторы на натрии и сплаве натрий — калий	265
38. Арматура	280
39. Измерительные приборы	284
Глава VII. Эксплуатация жидкометаллических систем	302
40. Подготовка системы к работе	303
41. Обнаружение течи металла	305
42. Ремонт и промывка натриевых контуров	306
43. Взаимодействие расплавленных щелочных металлов с водой	311
44. Система инертного газа	313
45. Определение примесей в натрии и сплаве Na—K	318
46. Очистка натрия и сплава Na—K	329
47. Техника безопасности и противопожарная техника при работе со щелочными металлами	334
48. Техника безопасности при работе со ртутью, свинцом, ололом и висмутом	340
РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ. НЕКОТОРЫЕ СОВЕТСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕПЛОСИТЕЛЕЙ	
49. Теплообмен и гидравлическое сопротивление при течении жидких металлов в трубах	342
50. Теплообмен при конденсации	351
51. Потери на трение диска в жидких металлах	353
52. Теплофизические константы некоторых жидких металлов	355
53. Очистка жидких металлов от примесей	356
54. Поведение сталей в жидкометаллической среде	356
55. Насосы, арматура, измерительные приборы для жидких металлов	359
Приложения	361
Литература	374

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Должно быть
32 347	12-я снизу 18-я "	17 500 а. с. 1800	175 000 а. с. 11 000

П. А. Андреев и др., Зак. 356