

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Уральский государственный технический университет – УПИ»

С.Н. Гуцин, Л.А. Зайнуллин, М.Д. Казяев, Б.П. Юрьев, Ю.Г. Ярошенко

## **ТОПЛИВО И РАСЧЕТЫ ЕГО ГОРЕНИЯ**

Под редакцией проф., д.т.н. Ю.Г. Ярошенко

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии Федерального агентства по образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 150000 – Металлургия

Екатеринбург 2007

УДК 669.041:662.61

ББК

Т

Рецензенты:

кафедра промышленной теплоэнергетики Южно - Уральского государственного университета (зав. каф. Заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор, доктор технических наук Е.В.Торопов), директор по науке и технике ОАО «ВНИИ металлургической теплотехники», заслуженный металлург РФ, доктор технических наук Г.М. Дружинин

Авторы: С.Н.Гущин, Л.А. Зайнуллин, М.Д. Казяев, Б.П. Юрьев, Ю.Г. Ярошенко.  
Топливо и расчеты его горения учебное пособие / С.Н. Гущин, А.Зайнуллин, М.Д.Казяев, Б.П. Юрьев, Ю.Г. Ярошенко; под ред. Ю.Г. Ярошенко. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. 105 с.

ISBN

Содержит краткие сведения о топливе, его видах и основных характеристиках. На основе стехиометрических соотношений дан вывод расчетных уравнений для определения расхода воздуха на горение и количества продуктов горения различных топлив. Приведены основные понятия о температурах горения топлива и методах их определения, а также данные о физических величинах, необходимых для проведения расчетов. Рассмотрены примеры расчетов горения различных видов топлив и их смесей.

Приведены также тексты домашних работ и варианты исходных данных для их выполнения.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Металлургия» всех форм обучения. Рекомендуется для выполнения домашних и контрольных работ, а также для использования при курсовом и дипломном проектировании.

Библ.3 наим; табл.12; рис.5.

УДК 669.041:662.61

ББК

© ГОУ ВПО «Уральский государственный  
технический университет – УПИ», 2007

© С.Н.Гущин, Л.А. Зайнуллин, М.Д. Казяев, Б.П. Юрьев, Ю.Г. Ярошенко. 2007

## Содержание

Условные обозначения	5
Предисловие	7
Введение	8
1. Топливо, его виды и основные характеристики	10
1.1. Классификация и применение топлив	11
1.2. Характеристики органических видов топлива и окислителя	15
1.2.1. Химический состав газообразных видов топлива	15
1.2.2. Химический состав жидких и твердых видов топлива	18
1.2.3. Тепловые характеристики органических видов топлива	26
1.2.4. Характеристики окислителя. Коэффициент избытка воздуха	32
2. Расчеты процесса горения	37
2.1. Аналитический метод расчета процесса горения газообразного топлива	39
2.2. Аналитический метод расчета процесса горения жидкого и твердого топлива	43
2.3. Приближенный метод расчета процесса горения органических видов топлива	47
2.4. Расчет температур горения топлива	50
3. Примеры расчета процессов горения топлива	61
3.1. Расчет процесса горения природного газа	61
3.2. Расчет процесса горения мазута	65
3.3. Расчет процесса горения газовых смесей	70
3.4. Расчет процесса горения смеси природного газа и мазута	76
3.5. Расчет температуры подогрева воздуха	80
3.6. Оценка влияния подогрева воздуха на балансовую температуру горения	83

3.7. Оценка влияния химического недожога на балансовую температуру горения	88
Библиографический список	96
Приложения:	
П.1. Давление пара и влагосодержание газа при состоянии насыщения	97
П.2. Домашняя работа по разделу «Топливо и расчеты его горения»	98
П.3. Варианты домашнего задания по расчету горения топлива .....	102

## Условные обозначения

### Символы:

$\mathcal{E}_T$  – тепловой эквивалент топлива;  
 $T_n$  – теплоплотность топлива;  
 $A$  – содержание золы в топливе;  
 $P$  – давление;  
 $Q$  – теплота сгорания топлива;  
 $W$  – содержание влаги в твердых и жидких видах топлива;  
 $RO_2$  – сумма  $CO_2$  и  $SO_2$  ;  
 $g$  – содержание влаги в газе (воздухе);  
 $i$  – теплосодержание;  
 $k$  – степень обогащения воздуха кислородом;  
 $t$  – температура;  
 $x, y, z$  – доли горючих газов, а также мазута в топливной смеси;  
 $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  
 $\varphi$  – относительная влажность газа (воздуха);  
 $\eta$  – пирометрический коэффициент;  
 $\rho$  – плотность топлива.

### Индексы:

#### *Верхние*

$b$  – балансовая (температура горения топлива);  
 $в.в.$ ,  $в.г.$  – влажный воздух (газ);  
 $г$ ,  $о$ ,  $с$ ,  $р$ . – соответственно горючая, органическая, сухая и рабочая массы топлива;  
 $T$  – теоретическая (температура горения топлива);  
 $топ$  – топливо.

#### *Нижние*

$в$  – высшая;  
 $вн$  – внешняя;  
 $возд$  – воздух;  
 $в.п.$  – водяной пар;  
 $в.п.н.$  – водяной пар в насыщенном состоянии;  
 $г$  – гигроскопическая (влага);  
 $гр$  – графическая;  
 $к$  – колчеданная;

л – летучая;  
н – низшая;  
общ – общее (теплосодержание);  
орг – органическая;  
п.г. – природный газ;  
пр – практическая;  
с – сульфатная;  
см – относящийся к смеси;  
топ – топливо;  
у.т. – условное топливо;  
р – давление.

## Предисловие

При создании данного учебного пособия авторы стремились, прежде всего, помочь студентам овладеть не только методикой расчета процессов горения различных видов топлива, но также и умением анализировать получаемые результаты. В дальнейшем приобретенные знания послужат базой для выполнения теплотехнических расчетов в курсовых и дипломных проектах.

Данное учебное пособие подготовлено с учетом требований общеобразовательного стандарта по направлению «Металлургия». При его подготовке авторы опирались на опыт формирования знаний в области металлургической теплотехники на металлургическом факультете Уральского государственного технического университета – УПИ.

Авторы считают своим долгом выразить признательность коллегам по кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии», коллективу кафедры промышленной теплоэнергетики Южно-Уральского государственного университета (Зав. кафедрой заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор, доктор технических наук Е.В. Торопов) и директору по науке и технике ОАО «ВНИИМеталлургической теплотехники», заслуженному металлургу РФ, д.т.н. Г.М. Дружинину за внимательную, критическую оценку рукописи и замечания, которые были ими сделаны. Авторами все замечания внимательно были изучены и учтены на завершающем этапе работы над рукописью.

При работе с учебным пособием «Топливо и расчеты его горения» могут возникнуть предложения и советы по улучшению содержания и изложения в нем материала. Авторы будут благодарны всем, кто направит свои предложения и советы по адресу 620002, Екатеринбург, ул. Мира 19, ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ», каф. «Теплофизики и информатики в металлургии» проф. Ю.Г. Ярошенко.

## Введение

Каждая высокотемпературная технология формирует особые требования к характеристикам применяемых видов топлива, что диктуется соображениями получения качественной продукции и технико-экономическими показателями соответствующей технологии. Отсюда необходимость всестороннего изучения свойств и характеристик различных видов топлива в условиях их промышленного использования. Эти сведения служат исходными данными для любого теплотехнического анализа процесса горения топлива.

Важной составляющей освоения методов такого анализа в условиях высшего учебного заведения является выполнение курсовых и дипломных проектов (работ) по проектированию топливных промышленных печей и других тепловых агрегатов (зажигательных горнов конвейерных машин, доменных воздухонагревателей, плавильных агрегатов, нагревательных печей, устройств.). Подобные работы начинаются с определения характеристик процесса горения топлива - теплоты сгорания топлива, расхода воздуха на горение, количества и состава продуктов горения, а также температур горения топлива – теоретической и балансовой. Методы расчеты указанных характеристик построены на использовании материальных и тепловых балансов процесса горения и потому получили название *аналитических*. Выполнение расчетов горения топлива требует также знания величины коэффициента избытка воздуха, допустимого недожога топлива и температур подогрева как воздуха, так и топлива. Обычно эти данные при выполнении студентами домашней работы задает преподаватель. При выполнении курсового или дипломного проектов студент сам выбирает указанные выше сведения в зависимости, например, от вида топлива и конструкции используемых для отопления проектируемой печи топливосжигающих устройств -коэффициент избытка воздуха, величину недожога, а в зависимости от конструкции теплообменника - температуры подогрева воздуха и топлива.

Полученные характеристики горения топлива служат базовыми для составления тепловых балансов промышленных печей и различных тепловых агрегатов, для расчетов режимов плавления и нагрева металла, режимных и конструктивных параметров устройств для утилизации теплоты отходящих продуктов горения, устройств, обеспечивающих подачу воздуха, необходимого для горения топлива (вентиляторы, воздуходувки, инжекторы), и эвакуацию продуктов горения (дымовые трубы, эжекторы, дымососы). Кроме того, количество и состав продуктов горения топлива во многом определяют степень экологической опасности выбросов в атмосферу.

На практике довольно часто для получения тепловой энергии используют не один вид топлива (природный газ, мазут, каменный уголь и т.п.), а одновременно несколько, которые формируют, так называемое, комбинированное топливо, состоящее из двух-трех видов, что диктуется технологическими требованиями. Так, на металлургических заводах широко применяют двойные смеси коксового и доменного газов, природного и доменного, природного и коксового, а иногда и тройные - природного, доменного и коксового газов. Часто с целью повышения радиационных характеристик факела газообразное топливо сжигают совместно с мазутом (газо-мазутные смеси).

Конструктор топливных печей и тепловых агрегатов, чаще всего, располагает лишь данными по теплоте сгорания топлива (элементарный состав топлива бывает неизвестен. В этом случае он прибегает к *приближенным* методам расчета процесса горения топлива. Наиболее широкое распространение в проектных организациях нашей страны получил приближенный метод расчета проф. С.Г. Тройба. Этот метод обычно используют только для определения расхода воздуха и выхода продуктов горения.

В данном учебном пособии сосредоточены материалы, необходимые для выполнения расчетов процессов горения топлива, а также примеры решения наиболее часто встречающихся задач по сжиганию различных видов топлива, включая топливные смеси.

## 1. Топливо, его виды и основные характеристики

Топливо представляет собой горючее вещество, при окислении (горении) которого выделяется сравнительно большое количество тепловой энергии, используемой в металлургических технологиях для нагрева и плавления металлов и сплавов, нагрева жидких и газообразных сред и в других целях. Процесс, сопровождающийся окислением горючих компонентов различных видов топлива, назван *сжиганием*.

Топливо должно удовлетворять ряду дополнительных признаков: наличию горючего вещества в топливе в количестве, которое способно обеспечить его использование как источника тепловой энергии; возможностью управления процессом сжигания; газообразным состоянием продуктов горения, образующихся при сжигании топлива, что существенно облегчает организацию их транспорта от теплового агрегата в окружающую среду; наличием в топливе и в продуктах его горения относительно малого количества вредных веществ, представляющих угрозу загрязнения окружающей среды, а также способностью сохранять свои энергетические свойства при длительном хранении и транспортировке.

Перечисленным признакам удовлетворяют горючие вещества органического происхождения, содержащиеся в угле, нефти, природном и попутном газах. Этим же признакам удовлетворяют и некоторые виды побочных продуктов различных технологий, в частности металлургического производства – доменный и коксовый газы. Последние, по существу, относятся также к органическим видам топлива, так как являются производными технологических процессов, использующих каменный уголь или продукты его термического разложения.

## 1.1. Классификация и применение топлив

Классификация различных видов топлива в зависимости от их агрегатного состояния и происхождения приведена в табл. 1.1. Эту классификацию используют при разработке способов подготовки различных видов топлива к сжиганию, способов организации процессов горения, а также при создании методик расчета процессов горения и пр.

Таблица 1.1

Общая классификация видов топлива

Агрегатное Состояние	Происхождение видов топлива	
	Естественное	Искусственное
Газообразное	Природный газ, попутный газ	Коксовый, доменный, конвертерный, генера- торный газы, газы фер- росплавного производ- ства
Жидкое	Нефть	Бензин, керосин, реак- тивное топливо, дизель- ное топливо, мазут, смола
Твердое	Древесина, торф, бурые угли, каменные угли, антрацит, горючие сланцы	Кокс, полукокс, древес- ный уголь, термоантра- цит, пылеугольное топ- ливо, брикеты

Основные принципы топливной политики страны, раскрывающие отношение к добыче и потреблению различных видов топлива, можно охарактеризовать следующими положениями:

1. Непрерывный рост добычи всех видов топлива. По отношению к 2000 году наиболее высокие темпы добычи и потребления планируются до 2020 года по углю, затем следует по темпам развития добыча нефти. Газовая промышленность за этот период будет развиваться более медленными темпами.

2. Преимущественное развитие добычи наиболее экономичных видов топлива, определяемых условиями рынка и государственной экономической политики.

3. Механизация и автоматизация процессов добычи, переработки и транспорта топлива к потребителю.

4. Комплексное использование топлива. Это предполагает, во-первых, более полное удовлетворение требований технологических процессов и, во-вторых, наилучшее использование природных свойств самого топлива.

5. Экономия топлива всеми потребителями, особенно в металлургии. В стоимости чугуна затраты на топливо превышают 50%, в стоимости проката они составляют 20%, в производстве агломерата достигают 10%. Отсюда следует, что экономия топлива приводит не только к значительному снижению стоимости продукции предприятий черной и цветной металлургии, но и позволяет сохранить его для использования в будущем.

Промышленное применение получили два вида газообразного топлива естественного происхождения – природный и попутный газы. Первый добывается из чисто газовых месторождений и состоит главным образом из метана. Второй добывается одновременно с нефтью и кроме метана содержит этан, пропан, бутан и другие углеводороды метанового ряда. При извлечении 1 т нефти можно добыть 200...400 м<sup>3</sup> попутного газа. Природный и попутный газы используют в качестве топлива в промышленных печах, в котельных агрегатах, в аппаратах для резки металла, в быту. Они также применяются в химической промышленности для получения мелкодисперсной сажи, используемой при производстве резинотехнических изделий и в лакокрасочном производстве.

Из всех искусственных видов газообразного топлива наибольшее применение на металлургических заводах с замкнутым циклом получили *коксовый и доменный газы*.

*Коксовый газ* является побочным продуктом производства кокса. Он относится к видам топлива, богатым по тепловой энергии, и обычно используется в смеси с доменным газом как топливо для высокотемпературных металлургических печей. Выход коксового газа при производстве одной тонны кокса составляет 400–450 м<sup>3</sup>.

*Доменный газ* – побочный продукт производства чугуна в доменных печах. Тепловая ценность и выход этого газа на 1 т чугуна зависит от условий работы доменной печи: сорта выплавляемого чугуна, степени обогащения воздушного дутья кислородом, вида и количества углеводородных добавок, уровня нагрева дутья и других факторов. Выход доменного газа на 1 т чугуна находится в пределах 2000...2500 м<sup>3</sup>.

*Генераторный газ* получается при газификации твердого топлива. В процессе газификации вся горючая часть твердого топлива под воздействием кислорода превращается без остатка в горючий газ и жидкие горючие продукты (смолы). Негорючую часть топлива – золу, удаляют из газогенератора либо в твердом, либо в жидком виде.

*Нефть* (сырая) – это единственный, естественный вид жидкого топлива, который в качестве промышленного не применяют. Нефть используют для получения искусственных видов жидкого топлива - бензина, керосина, дизельного топлива, а также моторных масел. Мазут и смолу, как продукты глубокого разложения нефти, обычно сжигают в промышленных печах и котельных установках.

Естественные виды твердого топлива без специальной подготовки используют в быту и в энергетических установках. Искусственное твердое топливо получают в результате физико-химической или механической обработки естественного топлива. Наиболее широко из искусственных видов

твердого топлива в промышленности применяют *кокс, угольную пыль и брикеты*.

Среди искусственных видов твердого топлива наиболее важным для металлургии является *кокс*, который на 90% используют в качестве топлива в доменных печах, в литейных и минераловатных вагранках (8,0%) и остальной – в ферросплавных печах. Он обладает высокой тепловой ценностью, относительной чистотой по содержанию вредных примесей, высокой пористостью, механической прочностью и способен обеспечивать хорошую газопроницаемость шихты. Кокс получают в процессе нагрева угольной шихты из спекающихся (кокующихся) и других углей до температур 1000...1100°C без доступа воздуха, при этом угольная шихта претерпевает глубокое разложение, в результате чего образуется твердый остаток (кокс), а также смесь газов и паров. После очистки в химических цехах эта смесь превращается в коксовый газ, обладающий высокой теплотой сгорания и ценным видом топлива на металлургическом предприятии.

*Пылеугольное топливо (ПУТ)* получают измельчением крупных кусков угля, при этом в сотни раз увеличивается активная поверхность частиц топлива на единицу массы, и оно по особенностям процесса сжигания приближается к жидкому. Пылеугольное топливо широко используется в энергетике, в цветной металлургии. В последние годы оно все в большей степени применяется в черной металлургии на доменных печах как заменитель природного газа.

К брикетированию твердого топлива прибегают, когда требуется транспортировать на большие расстояния отходы топливпереработки. *Брикеты* получают прессованием при высоком давлении (до 30МПа) и температуре (до 300°C) с добавлением связующих веществ в виде смолы или каменноугольного пека, при этом за счет добавок несколько повышается тепловая ценность брикетированного топлива.

## **1.2. Характеристики органических видов топлива и окислителя**

Качество топлива определяется рядом показателей, основными из которых являются химический состав, тепловая ценность, отношение его к нагреванию. Обычно в металлургической теплотехнике химический состав различных видов топлива, их свойства и характеристики оценивают в зависимости от агрегатного состояния. Это позволяет наилучшим образом определять область применения того или иного вида топлива с точки зрения наиболее эффективного использования его свойств.

### **1.2.1. Химический состав газообразных видов топлива**

Газообразные виды топлива получили в настоящее время наибольшее распространение по сравнению с другими видами топлив. Это связано с особенностями их химического состава, а также с условиями сжигания и транспортировки. Оценку качества газообразного топлива производят по составу газа, характеристиками которого являются горючие и негорючие компоненты. Горючие компоненты газообразных видов топлива - водород  $H_2$ , метан  $CH_4$ , этилен  $C_2H_4$ , этан  $C_2H_6$ , пропан  $C_3H_8$ , бутан  $C_4H_{10}$ , пентан  $C_5H_{12}$ , тяжелые углеводороды  $C_mH_n$ , а также оксид углерода  $CO$  и сероводород  $H_2S$ . В топочном объеме в результате нагрева горючих компонентов газа – углеводородов, сероводорода, происходит их термическое разложение на водород, углерод и серу, благодаря чему осуществляется подготовка топлива к сжиганию. К негорючим составляющим газообразного топлива относят водяной пар  $H_2O$  и азот  $N_2$ , а для некоторых газообразных видов топлива и кислород  $O_2$ . Подобное допущение не является строгим. В действительности незначительное количество азота может окисляться в процессе горения газа с образованием оксидов азота. В расчетах процессов горения эти объемы оксидов азота обычно не учитывают. Количество образу-

ющихся оксидов азота подлежит расчету только в случаях, связанных с оценкой воздействия продуктов горения на состояние окружающей среды.

Обычно химический состав газообразного топлива определяют экспериментально в объемных процентах на сухую массу (сухой газ), а влажность газа оценивается по абсолютной влажности ( $g_{H_2O}^{c.2}$ ) в граммах на кубический метр сухого газа ( $г/м^3$ ), при этом какими-либо индексами при символах тех или иных газовых компонентов это не отмечают. Аналогичные единицы измерения используют для оценки содержания пыли и смолы в газообразном топливе. Состав влажного газа обычно рассчитывают при известном содержании влаги, отнесенном к сухому газу. Правильность анализа или расчета проверяется равенствами:

для сухого газа

$$CO_2 + CO + H_2 + CH_4 + C_2H_4 + \dots + N_2 = 100\%,$$

для влажного газа

$$CO^B_2 + CO^B + H^B_2 + CH^B_4 + C_2H^B_4 + \dots + N^B_2 + H_2O^B = 100\%.$$

Для пересчета состава сухого газа на состав влажного газа при известной абсолютной влажности газа можно воспользоваться следующими рассуждениями. Пусть объемное содержание влаги в газе равно  $H_2O^B$  %, а массовое содержание влаги, отнесенное к сухому газу, -  $g_{H_2O}^{c.2}$   $г/м^3$ . Если иметь в виду, что содержание сухого газа в  $1 м^3$  влажного газа равно

$$1,0 - 0,01 H_2O^B,$$

то масса влаги в этом объеме составит

$$g_{H_2O}^{c.2} (1,0 - 0,01 H_2O^B).$$

С другой стороны, масса водяного пара в  $1 м^3$  влажного газа составит

$$0,01 H_2O^B (18\,000 / 22,4) = 8,036 H_2O^B.$$

Здесь 18 000 молярная масса воды в г, 22,4 – объем моля, а частное - 803,6 характеризует массу  $1 м^3$  водяного пара.

В итоге балансовое уравнение примет вид:

$$g_{H_2O}^{c.2} (1,0-0,01 H_2O^B) = 8,036 H_2O^B,$$

откуда следует

$$H_2O^B = g_{H_2O}^{c.2} / (8,036 + 0,01 g_{H_2O}^{c.2}) \quad (1.1)$$

или

$$H_2O^B = 0,1244 g_{H_2O}^{c.2} / (1 + 0,001244 g_{H_2O}^{c.2}). \quad (1.1')$$

Величина 0,001244 в этом выражении характеризует объем 1,0 г влаги при нормальном давлении и имеет размерность – м<sup>3</sup>/г.

После определения величины  $H_2O^B$  содержание других компонентов влажного газа рассчитывают по формуле:

$$x_i^B = x_i (1,0 - 0,01 H_2O^B). \quad (1.2)$$

Расчет выполнен правильно, если сумма всех компонентов равна 100%, в противном случае расчет проверяют и в случае необходимости корректируют по содержанию наибольшего компонента.

Химический состав естественных газообразных топлив зависит от их месторождения, которые подразделяют на чисто газовые и газоконденсатные.

Химический состав искусственных газообразных видов топлива определяется способами их получения и технологическими процессами, в результате которых эти газы образуются.

Химический состав доменного газа зависит от основных параметров доменного процесса, таких как температура дутья, степень обогащения дутья кислородом, количество вдуваемого в фурмы дополнительного топлива (природного газа, угольной пыли), состав шихты, давление газа на колошнике.

Химический состав коксового газа зависит от состава угольной шихты, загружаемой в коксовые батареи, температуры коксования, степени очистки его от примесей и других факторов.

Специально получаемые путем газификации твердого топлива генераторные газы могут иметь самый разнообразный химический состав в зависимости от вида твердого топлива и состава дутья: чистый кислород, воздух, водяной пар и их смеси.

Представление о составе газообразных видов топлива можно получить на основе сведений, приведенных в табл. 1.2. Анализ данных таблицы показывает, что основным горючим компонентом природного газа является метан. Его содержание и определяет высокую тепловую ценность этого вида топлива. Из искусственных газообразных топлив самым ценным является коксовый газ благодаря высокому содержанию водорода. Это обстоятельство делает его и наиболее взрывоопасным. Затем по тепловой ценности следуют газогенераторные и доменные газы. Исключение в этом перечне составляет парокислородный генераторный газ, тепловая ценность которого достаточно высока.

Различные виды газообразного топлива обеспечивают тепловой энергией работу плавильных агрегатов и печей для нагрева металла под прокатку, ковку и термообработку на заводах черной и цветной металлургии, машиностроения.

### **1.2.2. Химический состав жидких и твердых видов топлива**

Жидкие и твердые виды топлива уступают по своим эксплуатационным свойствам газообразному топливу. Это связано, прежде всего, с необходимостью подготовки этих видов топлива к сжиганию: жидкое топливо должно перед сжиганием подвергаться распылению, а твердое топливо для эффективного его сжигания – размолу. Далее следует отметить, что сжигание этих видов топлива требует повышенных расходов воздуха (окислителя) из-за трудностей смешения топлива с воздухом при организации процесса горения. Отсюда и сложности в управлении процессом горения. Кроме того, транспорт такого вида жидкого топлива, как мазут, и твердых видов топлива без исключения экономически менее эффективен по сравнению с транспортом газообразного топлива.

Таблица 1.2

Химический состав естественных и искусственных газообразных видов топлива, об. %

Топливо	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Доменный газ	27-30	1,5-2,5	-	0,1-0,4	-	-	-	10-12	-	56-58
Коксовый газ	4,2-8,5	46-61	21-28	1,4-3,0	-	-	-	2,2-3,1	0,3-1,7	3,7-14
Генераторный газ паровоз- душный:										
из антрацита	27,5	13,5	0,5	0,2	-	-	-	5,5	0,2	52,6
из каменного угля	26,5	13,5	2,5	0,4	-	-	-	5,0	0,2	51,9
из бурого угля	30,0	13,8	2,0	0,3	-	-	-	5,6	0,2	48,1
из торфа	27,5	14,1	2,5	0,4	-	-	-	8,5	0,2	46,8
Природный газ некоторых месторождений:										
Заполярье	-	-	99,3	0,1	-	-	-	0,2	-	0,4
Уренгойское	-	-	98,4	0,1	-	-	-	0,3	-	1,2
Ямбургское	-	-	98,6	0,1	-	-	-	0,1	-	1,2
Медвежье	-	-	97,3	1,0	0,1	0,1	0,1	0,5	-	0,9
Соленинское	-	-	95,4	3,1	0,08	0,32	0,1	0,5	-	0,5

Оренбургское	-	1,45	83,8	4,6	1,64	0,81	1,88	0,9	-	4,92
--------------	---	------	------	-----	------	------	------	-----	---	------

Для жидких и твердых видов топлива оценка их качества производится по элементарному составу, т.е. по содержанию в них элементов – углерода С, водорода Н, кислорода О, азота N и серы S. Эти элементы образуют, независимо от вида топлива, сложные органические соединения, которые разлагаются при их нагреве до начала процесса горения. Кроме этих элементов, жидкие и твердые виды топлива содержат золу, составляющие которой представлены минеральными примесями в виде оксидов кремния ( $\text{SiO}_2$ ), алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), кальция ( $\text{CaO}$ ), магния ( $\text{MgO}$ ), железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), щелочных металлов ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ) и др., а также влагу. В анализах топлива содержание элемента обозначается соответствующим символом (С, Н, О, N, S), содержание золы – символом А (от нем. *Ashe*) и влаги – W (от нем. *Wasser*). Обычно принято состав жидких и твердых видов топлива выражать

в массовых процентах. При правильном анализе сумма всех компонентов рассматриваемых видов топлива составляет 100%, т.е.

$$\text{C} + \text{H} + \text{O} + \text{N} + \text{S} + \text{A} + \text{W} = 100\%.$$

Ценность отдельных составляющих жидких и твердых видов топлива неодинакова, она определяется, прежде всего, количеством того или иного горючего элемента, а также количеством выделяющейся теплоты при горении данного элемента.

*Углерод* – основной носитель тепловой энергии этих видов топлива потому, что, во-первых, его содержание в топливе является наибольшим и, во-вторых, при его горении выделяется значительное количество теплоты. Углерод в топливе представлен органическими соединениями. Затраты теплоты на разрушение таких соединений обычно незначительны, что позволяет пренебрегать тепловыми эффектами термического разложения этих соединений.

*Водород* является вторым по важности горючим элементом, содержание которого в твердом топливе относительно невелико. Следует также иметь в виду, что часть водорода в твердых видах топлива связана с кислородом в виде гидратной влаги, образующей с минеральными примесями особые соединения – гидра-

ты, которые разлагаются при температурах более 300°C. Связанный, таким образом, водород не может быть использован при горении. Несмотря на то, что при горении 1 кг водорода по сравнению с тем же количеством углерода выделяется в 3,5 раза больше теплоты, роль водорода как источника тепловой энергии твердого топлива относительно невелика.

Для жидкого топлива значение водорода, как горючего компонента, существенно выше, так как он связан с углеродом и серой в форме органических соединений, которые при термическом разложении выделяют его в виде, способном участвовать в процессах горения.

*Азот* относится к негорючей части топлива и потому является для топлива балластом. Содержание азота для жидких и твердых видов топлива не превышает обычно 1...3%. При определенных условиях горения азот топлива образует в относительно небольшом количестве оксиды азота, являющиеся загрязнителями атмосферы. Не участвующий в процессах горения азот поступает в продукты горения.

*Кислород*, как элемент топлива, относится к балластным составляющим. Он не только разбавляет (разубоживает) концентрацию горючих элементов, но и частично понижает их тепловую ценность, связывая их в такие соединения, как  $H_2O$ ,  $CO_2$  и др.

*Сера* в жидких и твердых видах топлива представлена различными соединениями. Это, прежде всего, органическая сера ( $S_o$ ), связанная в органических соединениях. Далее следует назвать колчеданную серу ( $S_k$ ), образующую соединения с железом –  $FeS$ , и сульфатную серу ( $S_c$ ), входящую в сульфаты, -  $CaSO_4$ ,  $FeSO_4$  и др. Соединения сульфатной серы являются негорючими компонентами топлива, т.е. для процесса горения – инертными, балластными составляющими. Общее содержание серы, таким образом, равно

$$S_{об} = S_o + S_k + S_c.$$

Органическая сера вместе с колчеданной способна участвовать в процессах горения, поэтому их сумма  $S_{л} = S_o + S_k$  получила название летучей серы –  $S_{л}$ . При

горении серы до  $\text{SO}_2$  выделяется значительное количество тепловой энергии. Однако считать этот элемент топлива ценной составляющей нельзя из-за загрязнения оксидами серы атмосферного воздуха, а при выпадении кислотных дождей – и почвы. Кроме того, оксиды серы снижают стойкость печного оборудования, а также ухудшают качество нагреваемого металла. В настоящее время существуют способы обработки жидких и твердых видов топлива, с помощью которых удается снизить содержание серы в топливе.

В металлургии при переработке сульфидных руд цветных металлов не предъявляют требований к топливу по содержанию серы, так как оксиды серы, получаемые при окислении рудных составляющих и топлива, используют для получения серной кислоты.

*Зола* как составляющая жидких и твердых видов топлива ухудшает их качество за счет уменьшения горючих компонентов топлива. Это обстоятельство, а также затраты теплоты на нагрев золы и ее химическое разложение при сжигании топлива отрицательно влияют на тепловую ценность топлива. Характеристиками золы являются ее химический состав и зависящие от него температуры плавления. При температурах плавления до  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  золу топлива считают легкоплавкой, при температурах от  $1200$  до  $1350\text{ }^\circ\text{C}$  – среднеплавкой, при температурах от  $1350$  до  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  – тугоплавкой и при более высоких температурах плавления практически неплавкой.

*Влага* относится к весьма нежелательной составляющей топлива. Она, как и зола топлива, понижает в нем содержание горючих компонентов. На нагрев и испарение влаги до температур горения затрачивается значительное количество тепловой энергии, из-за чего снижается доля той тепловой энергии, которая используется для полезных целей – нагрева, плавления металла и пр. При оценке влажности твердого топлива различают внешнюю, гигроскопическую и гидратную влагу.

Внешняя влага ( $W_{\text{вн}}$ ) – это та влага, которая механически удерживается топливом и теряется при его подсушке (без подогрева) до воздушно-сухого состоя-

ния. Под воздушно-сухим состоянием понимается такое состояние, при котором прекращается потеря влаги топливом за счет испарения и наступает термодинамическое равновесие между упругостью водяного пара, содержавшегося в топливе, и парциальным давлением водяного пара, насыщающего окружающую атмосферу.

Гигроскопической влагой ( $W_G$ ) называют влагу, оставшуюся в топливе после его естественной подсушки (без подогрева) до воздушно-сухого состояния.

Гидратная влага содержится в минеральной части топлива. Ее количество незначительно. Удаление гидратной влаги из топлива происходит только при высоких температурах при относительно малых затратах тепла. Поэтому в теплотехнических расчетах при учете влияния влажности топлива на развитие процессов горения этим видом влаги пренебрегают.

Следовательно, общее содержание влаги в твердом топливе -  $W^P$ , оценивают по сумме

$$W^P = W_{вн} + W_G.$$

Содержание внешней и гигроскопической влаги в твердом топливе зависит от свойств самого топлива, условий его добычи, транспортировки и хранения, температуры и влажности окружающего воздуха и т.п.

Влажность жидкого топлива (мазута) связана с содержанием в нем золы и оказывает заметное влияние на его тепловую ценность. Чем выше зольность мазута, тем больше влаги могут удерживать частицы золы. На величину влажности жидкого топлива оказывают существенное влияние особенности технологий подготовки (способы разогрева) этого вида топлива к сжиганию.

Элементарный состав жидкого и твердого видов топлива может быть отнесен к различной его массе. В зависимости от полноты химического (элементарного) и технического анализов топлива различают *органическую, горючую, сухую и рабочую* массы топлива.

В зависимости от того, к какой массе топлива относится его анализ, необходимо символам составляющих топлива присваивать справа вверху соответствующие индексы о, г, с, р.

Принято считать, что углерод, водород, кислород и азот образуют главную часть топлива, которая называется *органической* массой. Органическая масса топлива позволяет оценивать его качество, определять время его геологического образования и выражается уравнением:

$$C^o + H^o + O^o + N^o = 100\%. \quad (1.3)$$

Тепловая ценность топлива определяется его *горючей* массой, которая получается при добавлении к органической массе серы, т.е.

$$C^g + H^g + O^g + N^g + S^g = 100\%. \quad (1.4)$$

Массу топлива, освобожденную от влаги топлива, называют *сухой* массой топлива. Ее состав описывается выражением

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c + A^c = 100\%. \quad (1.5)$$

Если проба жидкого или твердого топлива соответствует условиям его хранения, транспорта, сжигания и т.п., то состав такого топлива принято называть *рабочим* составом или *рабочей* массой топлива. Рабочую массу представляют в виде:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100\%. \quad (1.6)$$

Теплотехнические расчеты обычно выполняют на рабочую массу топлива. В справочной же литературе приводятся составы топлива, выраженные на сухую, горючую или даже на органическую массу. Поэтому возникает необходимость в пересчете состава одной массы топлива на другую, для чего выведены коэффициенты пересчета для жидких и твердых видов топлива, которые представлены в табл.1.3.

Таблица 1.3

Коэффициенты для пересчета состава топлива из одной массы в другую

Заданная	Масса топлива, на которую ведется пересчет
----------	--

масса топлива	Органическая	Горючая	сухая	Рабочая
Органическая	1	$\frac{100 - S^G}{100}$	$\frac{100 - (S^C + A^C)}{100}$	$\frac{100 - (S^P + A^P + W^P)}{100}$
Горючая	$\frac{100}{100 - S^G}$	1	$\frac{100 - A^C}{100}$	$\frac{100 - (A^P + W^P)}{100}$
Сухая	$\frac{100}{100 - (S^C + A^C)}$	$\frac{100}{100 - A^C}$	1	$\frac{100 - W^P}{100}$
Рабочая	$\frac{100}{100 - (S^P + A^P + W^P)}$	$\frac{100}{100 - (A^P + W^P)}$	$\frac{100}{100 - W^P}$	1

Примерами пересчета топлива на рабочую массу на основе данных о горючей и органической массе того же топлива могут служить следующие:

$$x^P = x^G [100 - (A^P + W^P)] / 100;$$

$$x^P = x^O [100 - (S^P + A^P + W^P)] / 100.$$

Здесь  $x^G$ ,  $x^P$ ,  $x^O$  – соответствующие составляющие топлива на горючую, органическую и рабочую массы топлива.

Сведения о химическом составе жидких и твердых видов топлива приведены в табл. 1.4.

Эти данные используют для оценки тепловых характеристик различных видов топлива, а также для расчетов процесса горения в целях определения необходимых расходов окислителя, выхода продуктов горения и их температур. В конечном итоге теплотехнические характеристики того или иного вида топлива определяют экономическую и технологическую целесообразность его использования.

Таблица 1.4

Химический состав жидких и твердых видов топлива, %

Топливо	C <sup>Г</sup>	H <sup>Г</sup>	O <sup>Г</sup>	N <sup>Г</sup>	S <sup>Г</sup>	A <sup>C</sup>	W <sup>P</sup>
---------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------	----------------

Нефть	83-88	11-14	0,1-1,3	0-1,7	0-5	0,1-0,3	1-1,5
Бензин	85	14,9	Следы	Следы	0,15	-	-
Керосин	86	13,7	Следы	Следы	0,1	-	-
Соляровое масло	86,5	12,8	Следы	Следы	0,4	-	-
Мазут малосернистый	87,8	10,7	0,5	0,3	0,7	0,2	0-2,0
Мазут высокосернистый	84,0	11,5	0,2	0,3	4,0	0,3	0-2,0
Смола	82-90	6,5-11,0	1,0-5,0	1,0-5,0	0,2-2,7	-	0-1,0
Древесина	50	6	43	1	-	1-3	40-60
Торф	55-58	5-6	35-40	3	0.3	5-12	40-45
Горючие сланцы	83-85	6	10	0-1	4-15	45-65	15-20
Бурые угли	65-70	5-6	25	1	До 5	10-45	20-55
Каменные Угли	78-83	5-6	10-20	1	До 8	10-40	4-15
Антрацит	89-96	3-5	0-5	1	1-2	15-20	6

Руководствуясь составом твердых и жидких топлив определяют их пригодность к тому или иному технологическому процессу в металлургии. Химии, транспорте и пр.

### 1.2.3. Тепловые характеристики видов топлива

Химический состав топлива позволяет получить представление о качестве топлива по соотношению горючих и негорючих составляющих, но при этом он не отражает количественно его тепловую ценность.

*Теплота сгорания.* При горении любого топлива, содержащиеся в нем горючие вещества, окисляясь кислородом, выделяют значительное количество теплоты. В качестве основной характеристики, однозначно определяющей тепловую ценность топлива и используемой в инженерных и экономических расчетах, принята *теплота сгорания* топлива, под которой понимают количество теплоты –  $Q$ , кДж, которое выделяется при *полном* сгорании 1 кг жидкого или твердого топлива или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива. Размерность этой характеристики – кДж/кг или

кДж/м<sup>3</sup>. Условия полного горения топлива реализуются тогда, когда все горючие компоненты окисляются при атмосферном давлении до оксидов типа CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O.

В процессе горения топлива выделяющаяся теплота сосредотачивается в продукты горения, от которых передается различным теплоприемникам (нагреваемым материалам, элементам конструкций тепловых агрегатов и пр.).

В зависимости от степени охлаждения продуктов горения и агрегатного состояния в них влаги различают высшую и низшую теплоту сгорания топлива. Если при сжигании топлива продукты горения охлаждаются до температуры ниже 100 °С, то находящиеся в них водяные пары сконденсируются и выделяют дополнительное количество теплоты. В этом случае вся выделившаяся теплота от экзотермических реакций горения топлива и от конденсации водяных паров будет характеризовать полную или высшую теплоту сгорания топлива  $Q_B$ . Если же в продуктах горения влага остается в виде водяного пара, что характерно для подавляющего большинства промышленных тепловых агрегатов, то в этом случае тепловой характеристикой ценности топлива выступает низшая теплота сгорания топлива  $Q_H$ . Следовательно, разницу между высшей и низшей теплотой сгорания будет определять величина скрытой теплоты парообразования.

Как известно, при конденсации водяного пара выделяется теплота в количестве 2500 кДж/кг. При сжигании жидкого или твердого топлива в результате окисления одного моля H<sub>2</sub> массой 2 кг образуется один моль H<sub>2</sub>O массой 18 кг, следовательно, из 1 кг водорода образуется 9 кг H<sub>2</sub>O, если в топливе водорода - H<sup>P</sup>, то образуется 9 H<sup>P</sup> кг водяных паров. Тогда общая масса водяных паров, образовавшихся из 1 кг топлива и содержащихся в продуктах горения будет равна 0,01(9 H<sup>P</sup> + W<sup>P</sup>) кг. Здесь W<sup>P</sup> – содержание влаги в рабочем топливе; эта влага также при конденсации выделяет теплоту. Указанную разницу между высшей и низшей теплотой сгорания можно выразить для рабочей массы жидких и твердых видов топлива следующей формулой:

$$Q_B^P - Q_H^P = 2500 \cdot 0,01(9H^P + W^P),$$

или

$$Q_H^P = Q_B^P - 25(9H^P + W^P). \quad (1.7)$$

Существуют два метода определения теплоты сгорания топлива: экспериментальный и расчетный. При экспериментальном методе определения теплоты сгорания навеску топлива заданной массы сжигают в установке, называемой *калориметром*. Выделяющуюся при горении топлива теплоту улавливают водой, нагревающейся в замкнутом объеме. Зная массу воды и изменение ее температуры, можно вычислить количество усвоенной теплоты и, следовательно, теплоту сгорания топлива. Для определения теплоты сгорания по этому методу достаточно иметь данные технического анализа. Достоинствами метода является высокая точность и простота конструктивного оформления прибора для определения этой характеристики топлива. Существуют также и калориметры для определения теплоты сгорания газообразных видов топлива.

Второй метод – расчетный, характеризуется меньшими затратами времени, но требует для своей реализации данных элементарного состава топлива, которые и определяют точность этого метода. Формулы для определения теплоты сгорания газообразных видов топлива построены по простому принципу, а именно: расчетная теплота сгорания газообразных видов топлива равна сумме слагаемых, каждое из которых учитывает тепловой эффект горения какого-либо горючего компонента топлива и его содержание в топливе. Поэтому правая часть формулы содержит слагаемые, представляющие собой произведение теплового эффекта реакции горения какого-либо горючего компонента топлива на его содержание в газообразном топливе. Например, для CO таким слагаемым будет  $12770 \times 0,01 \times CO^B$ , где содержание оксида углерода задано в объемных процентах. Так как множитель 0,01 является общим для всех горючих компонентов газообразного топлива, то формула для расчета низшей теплоты сгорания газообразного топлива рабочего состава (влажный газ) примет вид, кДж/м<sup>3</sup>:

$$Q_H^P = 127,7CO^B + 108H_2^B + 358CH_4^B + 590C_2H_4^B + 555C_2H_2^B + \\ + 636C_2H_6^B + 913C_3H_8^B + 1185C_4H_{10}^B + 1465C_5H_{12}^B + 234H_2S^B. \quad (1.8)$$

Теплота сгорания, вычисленная по формуле (1.8), будет несколько ниже теплоты сгорания, определенной с помощью калориметра для некоторых видов газообразных топлив, так как в ней не учтено наличие в таких газах незначительного количества смол и паров жидких углеводородов.

Для определения теплоты сгорания жидких и твердых видов топлива существует много формул, но наибольшее распространение в инженерных расчетах получила формула Д.И. Менделеева. Она построена по тому же принципу: слагаемые формулы, связанные с горючими компонентами топлива, представляют собой произведение теплового эффекта горения какой-либо составляющей топлива, умноженного на количество той же составляющей, выраженной в процентах рабочей массы топлива. Для высшей теплоты сгорания с учетом приведенных выше соображений формула Д.И. Менделеева приобретает вид:

$$Q_B^P = 339C^P + 1256H^P - 109(O^P - S^P). \quad (1.9)$$

Так как кислород рабочего топлива связывает горючие компоненты в негорючие составляющие, то слагаемое, относящееся к  $O^P$ , вошло в формулу Менделеева Д.И. со знаком минус.

Для низшей теплоты сгорания с учетом (1.7) и (1.9) формула преобразуется к виду:

$$Q_H^P = 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P) - 25W^P. \quad (1.9')$$

Чем выше теплота сгорания топлива, тем больше его тепловая ценность, так как для получения одного и того же количества теплоты потребуется сжечь меньшее количество топлива.

Числовые значения теплоты сгорания любого топлива зависят, прежде всего, от его вида, от характеристик месторождения, условий добычи и других факторов, которые определяют содержание в топливе горючих компонентов. Данные о

теплоте сгорания используемых в промышленности видов топлива приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5

Сведения о теплоте сгорания и тепловых эквивалентах некоторых видов топлива

Виды топлива	Теплота сгорания		Тепловой эквивалент	
	Размерность	$Q_H^P$	Размерность	$\mathcal{E}_T$
Природный газ	МДж/м <sup>3</sup>	32,0...41,0	кг у. т/м <sup>3</sup>	1,09...1,40
Доменный газ	МДж/м <sup>3</sup>	2,8...4,1	кг у. т/м <sup>3</sup>	0,10...0,14
Коксовый газ	МДж/м <sup>3</sup>	16,0...18,0	кг у. т/ м <sup>3</sup>	0,55...0,61
Генераторный газ	МДж/м <sup>3</sup>	5,2...6,2	кг у. т/ м <sup>3</sup>	0,17...0,21
Мазут	МДж/кг	39,0...41,0	кг у. т/кг	1,33...1,40
Древесина	МДж/кг	10,2	кг у. т/кг	0,35
Торф	МДж/кг	10,5...11,0	кг у. т/кг	0,36...0,38
Бурые угли	МДж/кг	16,5	кг у. т/кг	0,56
Каменные Угли	МДж/кг	16,8...28,0	кг у. т/кг	0,57...0,96
Антрацит	МДж/кг	25,1...27,2	кг у. т/кг	0,86...0,93
Кокс	МДж/кг	27,5	кг у. т/кг	0,94

*Условное топливо.* Для сравнения показателей тепловой работы тепловых агрегатов, применяющих различные виды топлива, введено понятие *условного топлива*. В качестве условного топлива рассматривают абстрактное твердое топливо, теплота сгорания которого равна  $Q_{y.t} = 29300$  кДж/кг или 29,3 МДж/кг (7000 ккал/кг).

*Тепловой эквивалент топлива.* Теплота сгорания условного топлива применяется также для оценки тепловых эквивалентов топлива  $\mathcal{E}_T$ . *Тепловой эквивалент топлива* отражает способность единицы реального топлива выделять тепловую энергию при полном его сгорании по отношению к условному топливу. Теп-

ловой эквивалент численно равен отношению низшей теплоты сгорания данного топлива ( $Q_H^P$ ) к теплоте сгорания условного топлива ( $Q_{y.t.}$ ), т.е.

$$\mathcal{E}_T = Q_H^P / Q_{y.t.} \quad (1.10)$$

Размерность теплового эквивалента для газообразного топлива – кг у.т./м<sup>3</sup>, а для жидкого и твердого топлив – кг у.т./кг.

*Теплоплотность топлива.* Для оценки целесообразности перевозки топлива от мест добычи к местам его потребления используют характеристику топлива, получившую название *теплоплотность топлива* –  $T_{\Pi}$ . Численное значение этой величины отражает количество теплоты, содержащейся в 1 м<sup>3</sup> топлива, и имеет размерность кДж/м<sup>3</sup> (МДж/м<sup>3</sup>). Для газообразных видов топлива эта величина совпадает с величиной их теплоты сгорания, а для жидкого и твердого топлива значение  $T_{\Pi}$  получают путем перемножения теплоты сгорания топлива на его плотность (для жидкого топлива) или на плотность его насыпной массы –  $\rho_{нас}$  (для твердого топлива), т.е.

$$T_{\Pi} = Q_H^P \rho_{ж}, \quad (1.11)$$

или

$$T_{\Pi} = Q_H^P \rho_{нас}. \quad (1.12)$$

Теплоту сгорания складочных дров обычно относят к 1 м<sup>3</sup>, поэтому их теплоплотность, как и для газообразных видов топлива, совпадает с величиной теплоты сгорания дров в размерности кДж/м<sup>3</sup>.

Чем меньше насыпная масса 1 м<sup>3</sup>, тем больше различаются величины  $\mathcal{E}_T$  и  $T_{\Pi}$ . Для хорошего каменного угля  $\mathcal{E}_T = 1,0$ , а торфа –  $\mathcal{E}_T = 0,435$ , т.е. топливный эквивалент каменного угля в 2,3 раза больше той же величины торфа. Из-за низкой объемной массы торфа различие в значениях теплоплотности каменного угля и торфа достигает 7. Таким образом, для получения одного и того же количества теплоты объем транспортируемого торфа должен быть в 7 раз больше объема угля. При малых значениях  $T_{\Pi}$  топливо относят к местным видам и потребляют его вблизи мест добычи. Высокие значения этой величины указывают на возмож-

ность транспорта такого топлива на большие расстояния. Теплоплотность каменного угля значительно выше теплоплотности, например, природного газа при атмосферном давлении. Однако за счет компрессии этого газа его плотность существенно повышается, что обеспечивает экономическую целесообразность и эффективность транспорта природного газа на значительные расстояния. Доменный и коксовый газы транспортируются под давлением, близким к атмосферному. Поэтому они относятся к местным видам топлива и используются внутри металлургических предприятий.

#### 1.2.4. Характеристики окислителя. Коэффициент избытка воздуха

Для обеспечения процессов горения топлива в качестве окислителя используется кислород. Обычно он поступает с атмосферным воздухом, состав которого по объему на сухой воздух в технических расчетах принимают: кислорода – 21 % и азота – 79 %. Количество атмосферного воздуха, подаваемого для горения, зависит не только от состава, свойств топлива и условий его сжигания, но и от состава дутья. При сжигании топлива может быть использован и воздух, обогащенный кислородом ( $O_2 > 21\%$ ). Так расход обычного атмосферного воздуха на горение всегда больше расхода воздуха, обогащенного кислородом. Степень обогащения воздуха кислородом –  $k$ , оценивается по отношению объема азота к объему кислорода, т.е.  $k = \% N_2 / \% O_2$ . Для атмосферного воздуха на одну объемную единицу кислорода, поступающего для горения вводится  $k = \% N_2 / \% O_2 = 79/21 = 3,762$  объемных единиц азота. Значения  $k$  по отношению к атмосферному воздуху в зависимости от концентрации кислорода (объемные проценты) изменяются следующим образом:

% O <sub>2</sub>	21	30	40	50	75	100
% N <sub>2</sub>	79	70	60	50	25	0,0
k	3,762	2,333	1,500	1,000	0,333	0,000

Величину  $k$  используют при расчетах количества обогащенного кислородом дутья.

Данные о составе воздуха, приведенные выше относятся к сухому воздуху. В действительности, в реальных процессах сжигания топлива воздух, поступающий на горение, является влажным, что необходимо учитывать при расчетах и анализе.

Содержание влаги в воздухе, как и в любом другом газе, принято оценивать по одному из двух показателей: *абсолютной или относительной влажности*.

*Абсолютная влажность* (влагосодержание) соответствует количеству водяных паров, в  $\text{г/м}^3$ , отнесенных либо к сухому, либо к влажному воздуху (газу). Эта величина обозначается соответственно  $g_{\text{H}_2\text{O}}^{c.в}$ ,  $\text{г/м}^3$  сухого воздуха (газа). Для пересчета абсолютной влажности, отнесенной к сухому воздуху (газу), на влажный воздух (газ) и наоборот рекомендуются формулы:

$$g_{\text{H}_2\text{O}}^{6.в} = g_{\text{H}_2\text{O}}^{c.в} / [1+(1/804)], \text{ г/м}^3 \text{ вл.г.}, \quad (1.13)$$

$$g_{\text{H}_2\text{O}}^{c.в} = g_{\text{H}_2\text{O}}^{6.в} / [1-(1/804)], \text{ г/м}^3 \text{ сух.г.} \quad (1.14)$$

Здесь величина 804 характеризует плотность  $1 \text{ м}^3$  водяных паров,  $\text{г/м}^3$ .

*Относительная влажность* (степень насыщения) представляет собой отношение массы водяного пара, заключенного в  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха (газа), к максимально возможной массе водяного пара в таком же объеме при той же температуре. Эту величину обозначают  $\varphi$  и измеряют в процентах. Для подсчета  $\varphi$  используют выражение:

$$\varphi = (g_{\text{H}_2\text{O}}^{6.в} / g_{\text{H}_2\text{O}_н}^{6.в}) 100, \quad (1.15)$$

где  $g_{\text{H}_2\text{O}_н}^{6.в}$  – масса водяного пара в насыщенном состоянии в  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха,  $\text{г/м}^3$ .

Сведения о влагосодержании газа при состоянии насыщения и давлении водяного пара в интервале температур  $-25 \dots +100 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении смеси 760 мм рт.ст. приведены в Приложении 1.

При анализе процессов горения любого вида топлива, объем воздуха, необходимый для его сжигания, рассчитывают по химическому составу топлива, точнее, по количеству содержащихся в нем горючих компонентов. При этом различают *теоретический и практический расходы воздуха*.

*Теоретический расход воздуха*, необходимый для сжигания единицы объема газообразных видов топлива или единицы массы жидких и твердых видов топлива, строго соответствует стехиометрическим соотношениям реакций горения между горючими компонентами и продуктами реакции. Эту величину обозначают -  $L_0$ , м<sup>3</sup>/ед.топл.

*Практический расход воздуха*, необходимый для обеспечения полного горения (окисления) топлива в реальных условиях работы металлургических печей и тепловых агрегатов, всегда превышает теоретический. Эту характеристику процесса сжигания топлива обозначают -  $L_\alpha$ , м<sup>3</sup>/ед.топл. Известно, что процесс окисления горючих составляющих топлива относится к химическим, полностью зависящим от физического процесса доставки окислителя к горючим элементам топлива, т.е. от условий перемешивания топлива с воздухом. Перемешивание окислителя с горючими составляющими топлива не является достаточно совершенным, поэтому оно лимитирует процесс горения в целом. Разница между практическим расходом воздуха и теоретически необходимым будет тем меньше, чем лучше организовано смешение топлива с воздухом в топливосжигающем устройстве или в рабочем пространстве печи. Очевидно, что газообразное топливо легче смешивать с воздухом, чем мазут. Поэтому при сжигании мазута требуется большее количество воздуха, чем при сжигании газа. Для учета особенностей полноты смешения топлива с воздухом, поступающим для сжигания топлива, введена характеристика, получившая название *коэффициента избытка воздуха*. Этот коэффициент определяют как отношение практически введенного для горения воздуха к теоретически необходимому расходу и обозначают  $\alpha$ , т.е.

$$\alpha = \frac{L_\alpha}{L_0}. \quad (1.16)$$

Приведенное соотношение справедливо как для сухих  $L_0$ ,  $L_\alpha$ , так и для влажных расходов -  $L_0^B$ ,  $L_\alpha^B$  воздуха.

Величину коэффициента избытка воздуха задают в зависимости от вида топлива, конструкции топливосжигающего устройства (горелки или форсунки) и температуры подогрева воздуха и газа и т.д. Так, например, при использовании короткопламенных горелок, коэффициент избытка воздуха может быть принят равным 1,05...1,10, а для длиннопламенных горелок  $\alpha = 1,10...1,20$ . При использовании мазутных форсунок коэффициент избытка воздуха следует увеличить до 1,20...1,30.

Чем выше коэффициент избытка воздуха, тем полнее протекает процесс горения. Однако увеличение этого коэффициента приводит к увеличению расхода воздуха и количества продуктов горения. Для их перемещения по системам газопроводов металлургических печей и тепловых агрегатов потребуются дополнительные затраты энергии. При увеличении коэффициента избытка воздуха увеличиваются потери теплоты с газами, уходящими из печи, и снижается температура печи, что связано с ухудшением теплопередачи в ее рабочем пространстве и усилением окисления металла. Поэтому в практике топливосжигания стремятся к выбору оптимальных значений коэффициентов избытка воздуха, что достигается при эксплуатации печей контролем состава продуктов горения с помощью особых приборов – газоанализаторов.

Для полного сжигания любого топлива коэффициент избытка воздуха всегда должен быть больше единицы. Однако в ряде технологических процессов требуется обеспечить малоокислительную или даже восстановительную атмосферу. В этом случае коэффициент избытка воздуха может быть меньше единицы. Химическая неполнота горения характеризуется наличием оксида углерода, водорода, метана и других горючих газов в продуктах горения. Она может быть следствием не только недостатка воздуха, но и неудовлетворительного перемешивания топ-

лива с воздухом в топливосжигающих устройствах или наблюдаемого при высоких температурах явления диссоциации.

Явление диссоциации, вызывающее распад (расщепление) продуктов полного горения, в конечном счете приводит к образованию продуктов неполного горения, причем в этом случае наряду с CO и H<sub>2</sub> обязательно присутствует и свободный кислород:



На диссоциацию углекислого газа и водяного пара затрачивается большое количество теплоты. Количество диссоциирующих газов определяется их температурой и парциальным давлением. Диссоциация начинается при температурах 1600 – 1650 °С, достигая значительной величины (5–6%) при 2000°С и выше. Для оценки этого процесса рассчитаны и построены специальные графики.

Наличие в продуктах горения горючих составляющих (оксида углерода, водорода, метана или сажистого углерода) подтверждает химическую неполноту горения или химический недожог топлива. Последний характеризуется потерями теплоты в процентах от низшей теплоты сгорания топлива. Так, при сжигании мазута и природного газа величина недожога может достигать 2-3% от низшей теплоты сгорания топлива.

Данные по составу продуктов горения топлива необходимы для составления материального баланса технологических процессов. Кроме того, знание химического состава отходящих газов позволяет вести расчеты лучистого теплообмена, выбирать соответствующую систему очистки газов и решать другие теплотехнические и технологические задачи. При этом необходимо учитывать, что отходящие газы в ряде случаев (обжиг рудных и нерудных материалов, сталеплавильный процесс и др.) представляют собой смесь продуктов горения топлива и технологических газов, которые образуются при тепловой обработке различных материалов.

## 2. Расчеты процесса горения

Характеристики процесса горения определяют для достижения следующих целей:

- получения данных для расчета и оценки аэродинамического сопротивления трубопроводов подачи воздуха к топливосжигающим устройствам. Эти данные необходимы для подбора дутьевых средств – вентиляторов, воздуходувок, инжекторов и т.п.;

- получения данных для расчета дымовых каналов, предназначенных для удаления из рабочего пространства печи или теплового агрегата продуктов горения топлива, и определения газодинамического сопротивления на пути движения продуктов горения. Эти данные обычно используются для выбора и расчета дымовых труб, дымососов, эжекторов, обеспечивающих эвакуацию продуктов горения в атмосферу или в установки улавливания пыли, обезвреживания и утилизации газовых компонентов;

- получения данных о составе продуктов горения, необходимых для расчета тепло- и массообменных процессов в рабочем пространстве металлургических печей и других высокотемпературных тепловых агрегатах;

- получения данных о теплоте сгорания топлива. Эти данные используются в расчетах тепловых балансов процесса горения;

- получения данных о температурах горения топлива для анализа условий, обеспечивающих реализацию металлургических технологий;

- получения данных для определения путей коррекции температур горения за счет применения смесей различных видов топлива, нагретых газовых сред (воздуха и газа) или организации рециркуляции продуктов горения.

Основу расчета процессов горения топлива составляют законы сохранения веществ и энергии, а выражения, которые используются для расчетов, получены в результате решения уравнений материальных и тепловых балансов процессов горения топлива. Все расчеты, служащие достижению перечисленных выше целей,

могут быть выполнены по данным элементарного анализа участвующих в процессах горения веществ на основании стехиометрических соотношений соответствующих химических реакций горения этих веществ.

Методики расчета процесса горения любого вида топлива предназначены для определения основных характеристик этого процесса. Такими характеристиками являются:

1. Объем кислорода, необходимый для полного окисления горючих компонентов топлива в соответствии с реакциями горения –  $V_{O_2}^{топ}$ ;
2. Теоретические расходы ( $\alpha = 1,0$ ) сухого  $L_0$  и влажного  $L_0^B$  воздуха, учитывающие степень обогащения кислородом;
3. Практические расходы ( $\alpha > 1,0$ ) сухого  $L_\alpha$  и влажного  $L_\alpha^B$  воздуха, учитывающие условия сжигания топлива при конкретном коэффициенте избытка воздуха;
4. Выход и состав продуктов горения при теоретических ( $\alpha = 1,0$ ) и практических ( $\alpha > 1,0$ ) условиях сжигания топлива;
5. Теплота сгорания топлива, состав которого соответствует рабочему состоянию;
6. Теоретические  $t_0^T$ ,  $t_\alpha^T$  и балансовые  $t_0^{\bar{o}}$ ,  $t_\alpha^{\bar{o}}$  температуры горения.

Перечисленные характеристики позволяют решать многие задачи использования топлива в металлургии. Для некоторых, наиболее часто встречающихся, задач в следующем разделе приведены примеры расчетов горения различных видов топлива и их смесей.

Расчеты характеристик процесса горения по определению расходов воздуха, выхода и состава продуктов горения используют в качестве основы закон сохранения массы веществ, участвующих в процессе горения. Если это не оговаривается условиями расчета, то они (расчеты) выполняются в предположении полного горения топлива.

Закон сохранения энергии использован при расчете температур горения того или иного вида топлива.

Исходными данными для расчетов процесса горения являются вид топлива, конструкция топливосжигающего устройства, влияющая на выбор величины коэффициента избытка воздуха и допустимого недожога топлива, а также температуры подогрева воздуха и топлива.

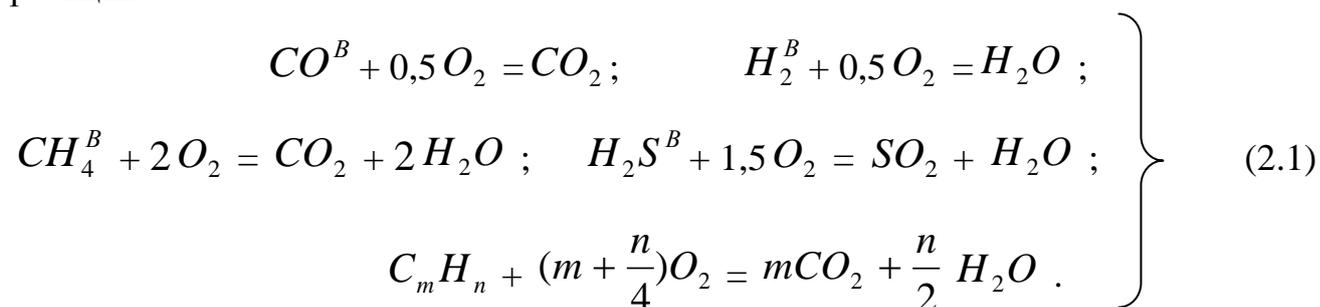
## 2.1. Аналитический метод расчета процесса горения газообразного топлива

Обычно газ, который используют для осуществления промышленных технологий, является влажным. Состав влажного газа может быть в общем случае представлен следующим образом:

$$CO_2^B + SO_2^B + CO^B + H_2^B + CH_4^B + H_2S^B + C_m H_n^B + N_2^B + O_2^B + H_2O^B = 100\%.$$

Поскольку химический состав газообразного топлива приводится на сухую массу, то, воспользовавшись формулами (1.1.) и (1.2.), необходимо пересчитать его состав на рабочую (влажную) массу.

При полном горении газа этого состава в атмосферном воздухе протекают реакции:



Приведенные стехиометрические соотношения позволяют определять объемы кислорода по каждой реакции горения, необходимые для обеспечения полного горения. Так, например, для окисления объема оксида углерода требуется кислорода по объему в 2 раза меньше, т.е. 0,5 по отношению к содержанию  $CO^B$ . Такое же соотношение справедливо и при окислении водорода. При сжигании метана,

сероводорода и тяжелых углеводородов подобные соотношения составляют соответственно 2,0; 1,5 и  $(m + \frac{n}{4})$ . Таким образом, выражение, с помощью которого можно рассчитать объем кислорода, необходимого для полного окисления горючих компонентов газообразного топлива, принимает вид:

$$V_{O_2}^{ТОП} = 0,01 [0,5 CO^B + 0,5 H_2^B + 1,5 H_2S^B + 2,0 CH_4^B + (m + \frac{n}{4}) C_m H_n^B - O_2^B], \text{ м}^3 O_2 / \text{ м}^3 \text{ газа.} \quad (2.2)$$

Здесь коэффициент 0,01 учитывает переход от оценки компонентов газообразного топлива в процентах к объемным долям их содержания в 1 м<sup>3</sup> топлива.

Далее могут быть рассчитаны расходы сухого и влажного воздуха, обеспечивающие полное сжигание газообразного топлива в теоретических условиях, т.е. при  $\alpha = 1,0$ . Для сухого воздуха:

$$L_0 = V_{O_2}^{ТОП} + k V_{O_2}^{ТОП} = (1 + k) V_{O_2}^{ТОП}, \text{ м}^3 \text{ сух. возд.} / \text{ м}^3 \text{ газа.} \quad (2.3')$$

Здесь первое слагаемое учитывает количество кислорода, а второе – количество азота через степень обогащения воздуха кислородом. Для обычного воздуха

$$L_0 = (1 + 3,762) V_{O_2}^{ТОП}, \text{ м}^3 \text{ сух. возд.} / \text{ м}^3 \text{ газа;} \quad (2.3')$$

Для влажного воздуха:

$$L_0^B = L_0 + 0,001244 g_{H_2O}^{c.6} L_0 = (1 + 0,001244 g_{H_2O}^{c.6}) L_0, \text{ м}^3 \text{ влажн. возд.} / \text{ м}^3 \text{ газа,} \quad (2.4).$$

В этом выражении первое слагаемое отражает объем сухого воздуха, второе – объем влаги, вносимой в соответствии с влагосодержанием воздуха, отнесенным к сухому воздуху.

В практических условиях, т.е. при  $\alpha > 1,0$ :  
расход сухого воздуха:

$$L_\alpha = \alpha L_0, \text{ м}^3 \text{ сух. возд.} / \text{ м}^3 \text{ газа,} \quad (2.5)$$

расход влажного воздуха:

$$L_\alpha^B = \alpha L_0^B, \text{ м}^3 \text{ влажн. возд.} / \text{ м}^3 \text{ газа.} \quad (2.6)$$

Для определения выхода продуктов горения используются те же стехиометрические соотношения приведенных выше реакций горения (2.1).

Выход продуктов горения –  $V_0$ , в общем случае горения газа в теоретических условиях (когда  $\alpha = 1,0$ ) представляет собой сумму объемов оксидов  $CO_2$ ,  $SO_2$ , водяного пара -  $H_2O$ , источниками которого являются продукты горения водорода, собственно водяной пар, содержащийся в самом газообразном топливе, и водяной пар, находящийся в воздухе. Азот в продукты горения поступает вместе с кислородом воздуха, а также и как возможный компонент газообразного топлива. Следовательно, можно записать:

$$V_0 = V_0^{CO_2} + V_0^{SO_2} + V_0^{H_2O} + V_0^{N_2}. \quad (2.7)$$

Слагаемые этого выражения раскрываются в результате анализа тех же стехиометрических соотношений реакций горения, которые были приведены выше. В итоге получим:

$$V_0^{CO_2} = 0,01(CO_2^B + CO^B + CH_4^B + mC_mH_n^B); \quad (2.8)$$

$$V_0^{SO_2} = 0,01(SO_2^B + H_2S^B); \quad (2.9)$$

$$V_0^{H_2O} = 0,01(H_2O^B + H_2^B + H_2S^B + 2CH_4^B + \frac{n}{2} C_mH_n^B) + 0,001244 g_{H_2O}^{c.6} L_0); \quad (2.10)$$

$$V_0^{N_2} = 0,01 N_2^B + k V_{O_2}^{ТОП}. \quad (2.11)$$

Состав продуктов горения для этих условий будет следующим:

$$\% CO_2 = \frac{V_0^{CO_2}}{V_0} 100; \quad \% SO_2 = \frac{V_0^{SO_2}}{V_0} 100; \quad \% H_2O = \frac{V_0^{H_2O}}{V_0} 100; \quad \% N_2 = \frac{V_0^{N_2}}{V_0} 100. \quad (2.12)$$

При проверке правильности расчета сумма этих слагаемых должна составлять 100%.

В практических условиях горения, когда коэффициент избытка воздуха  $\alpha > 1,0$ , для определения выхода продуктов горения –  $V_\alpha$ , целесообразно использовать данные, полученные в результате расчетов для  $\alpha = 1,0$ . Для условий  $\alpha > 1,0$   $V_\alpha$ , возрастет лишь на величину объема избыточного влажного воздуха,

при этом сохраняются неизменными объемы образующихся оксидов  $CO_2$  и  $SO_2$ , т.е.  $V_{\alpha}^{CO_2} = V_0^{CO_2}$  и  $V_{\alpha}^{SO_2} = V_0^{SO_2}$ , так как эти объемы не зависят от величины коэффициента избытка воздуха.

В условиях, когда  $\alpha > 1,0$ , за счет избыточного воздуха в продуктах горения:

- увеличится количество влаги за счет того объема, который вносится избыточным воздухом;

- увеличится по той же причине количество азота;

- появится избыточный кислород и его объем будет тем больше, чем выше будет значение коэффициента избытка воздуха.

Отмеченное позволяет записать выражение для определения  $V_{\alpha}$  в виде

$$V_{\alpha} = V_{\alpha}^{CO_2} + V_{\alpha}^{SO_2} + V_{\alpha}^{H_2O} + V_{\alpha}^{N_2} + V_{\alpha}^{O_2} \quad (2.13)$$

и затем определить значение каждого слагаемого. Итак, имеем:

$$V_{\alpha}^{CO_2} = V_0^{CO_2} ; V_{\alpha}^{SO_2} = V_0^{SO_2} ; V_{\alpha}^{H_2O} = V_0^{H_2O} + (\alpha - 1,0) 0,001244 g_{H_2O}^{c.6} L_0 ;$$

$$V_{\alpha}^{N_2} = V_0^{N_2} + (\alpha - 1,0) k V_{O_2}^{ТОП} ; V_{\alpha}^{O_2} = (\alpha - 1,0) V_{O_2}^{ТОП} . \quad (2.14)$$

Состав продуктов горения для этого случая ( $\alpha > 1,0$ ) может быть определен с использованием формулы

$$\% x_i = \frac{V_{\alpha}^i}{V_{\alpha}} 100, \quad (2.15)$$

где  $i$  – относится к тому или иному компоненту продуктов горения.

Рассмотренные характеристики процесса горения, как итоговые обычно используют также для определения температурных параметров процесса горения.

## **2.2. Аналитический метод расчета процесса горения жидкого и твердого топлива**

Для расчета процесса горения жидких и твердых видов топлива в первую очередь необходимо определить состав рабочего топлива, используя для этого

сведения об анализе топлива и формулы пересчета (см. табл. 1.3). В результате определения рабочий состав будет представлен в виде

$$C^P + H^P + O^P + N^P + S^P + A^P + W^P = 100\%.$$

Полное горение жидких и твердых видов топлива предполагает окисление горючих компонентов по следующим реакциям:



При составлении материального баланса процесса окисления отдельных горючих компонентов следует иметь в виду различие физического состояния веществ, участвующих в горении: содержания углерода, водорода, серы, азота, кислорода и влаги для жидкого и твердого состояния топлива обычно характеризуются процентами по массе, а окислитель (кислород), находящийся в газообразном состоянии, - процентами по объему. Анализ реакций горения позволяет это различие учесть.

В соответствии с реакцией полного горения углерода для окисления одного моля углерода массой 12 кг следует затратить один моль кислорода, имеющего объем 22,4 м<sup>3</sup>. Таким образом, на окисление 1 кг углерода расход кислорода составит  $22,4:12 = 1,867$  м<sup>3</sup> O<sub>2</sub>/кг С. Для окисления углерода в количестве  $C^P$ , которое соответствует содержанию этого компонента в жидком и твердом топливе, потребуется кислорода

$$V_{O_2}^C = 0,01 \cdot 1,867 C^P, \text{ м}^3\text{O}_2/\text{кг топл.} \quad (2.17)$$

Поступая аналогичным образом, можно определить, что для окисления двух молей водорода массой 4 кг необходимо подвести для полного горения один моль кислорода, а для сжигания 1 кг водорода  $22,4 : 4 = 5,6$  м<sup>3</sup>O<sub>2</sub>/кг Н, при этом для окисления водорода в соответствии с его содержанием в топливе  $H^P$  потребуется кислорода

$$V_{O_2}^H = 0,01 \cdot 5,6 H^P, \text{ м}^3\text{O}_2/\text{кг топл.} \quad (2.18)$$

Для окисления серы аналогично  $22,4 : 32 = 0,7 \text{ м}^3 \text{O}_2 / \text{кг S}$ . Здесь 32 масса одного моля серы в кг. В итоге

$$V_{\text{O}_2}^S = 0,01 \cdot 0,7 S^P, \text{ м}^3 \text{O}_2 / \text{кг топл.} \quad (2.19)$$

Необходимо учесть, что кислород топлива  $O^P$  может либо участвовать в реакциях окисления, либо уже связан с горючими компонентами. При массе одного моля  $\text{O}_2$  равной 32 кг, объем 1 кг  $\text{O}_2$  составит  $22,4 : 32 = 0,7 \text{ м}^3 \text{O}_2 / \text{кг O}$  или при содержании кислорода в топливе в количестве  $O^P$

$$V_{\text{O}_2}^O = 0,01 \cdot 0,7 O^P, \text{ м}^3 \text{O}_2 / \text{кг топл.} \quad (2.20)$$

Это количество кислорода должно быть вычтено из общего количества кислорода, необходимого для окисления углерода, водорода и серы.

Используя полученные сведения, можно составить уравнение материального баланса процесса горения и определить количество кислорода, необходимого для полного окисления горючих компонентов жидкого и твердого топлива  $-V_{\text{O}_2}^{\text{ТОП}}$ .

Таким уравнением является

$$V_{\text{O}_2}^{\text{ТОП}} = V_{\text{O}_2}^C + V_{\text{O}_2}^H + V_{\text{O}_2}^S - V_{\text{O}_2}^O, \text{ м}^3 \text{O}_2 / \text{кг топл.} \quad (2.21)$$

С учетом выражений (2.17)÷(2.20) получим:

$$V_{\text{O}_2}^{\text{ТОП}} = 0,01(1,867 C^P + 5,6 H^P + 0,7 S^P - 0,7 O^P). \quad (2.22)$$

Далее могут быть рассчитаны расходы сухого и влажного воздуха, обеспечивающие полное сжигание жидкого и твердого топлива в теоретических условиях горения, т.е. при  $\alpha = 1,0$  по выражениям (2.3) и (2.4), а также и в практических условиях, т.е. при  $\alpha > 1,0$ , по выражениям (2.5) и (2.6).

В общем случае горения жидкого и твердого топлива в теоретических условиях, когда  $\alpha = 1,0$ , выход продуктов горения –  $V_0$  представляет собой сумму объемов оксидов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ , водяного пара  $\text{H}_2\text{O}$ , источниками которого являются продукты горения водорода, влага топлива  $W^P$  и влага воздуха (дутья). Кроме того, в случае сжигания жидкого топлива его предварительно распыляют с помо-

щью форсунок, используя для этой цели либо сжатый воздух, либо водяной пар. Если применяется сжатый воздух, то после распыления его кислород участвует в процессах окисления горючих составляющих топлива. Если же для распыления мазута применяется водяной пар, то, совершив работу по распылению, он смешивается с продуктами горения, увеличивая в них содержание водяного пара. При распылении жидкого топлива паром его расход характеризуется величиной  $W_{расп}$ , равной массе водяного пара -  $M_{нар}$ , отнесенной к 100 кг жидкого топлива и выраженной в процентах. Таким образом,  $W_{расп} = (M_{нар} / 100) \times 100, \%$ .

Азот в продукты полного горения жидкого или твердого топлива поступает и с топливом, и с кислородом воздуха.

Следовательно, суммарный объем продуктов полного горения будет равен:

$$V_0 = V_0^{CO_2} + V_0^{SO_2} + V_0^{H_2O} + V_0^{N_2} . \quad (2.23)$$

Отдельные слагаемые уравнения (2.23) будут:

Из реакции окисления углерода следует, что из одного моля углерода массой 12 кг образуется один моль  $CO_2$  объемом  $22,4 \text{ м}^3$ , т.е. в результате окисления 1 кг углерода образуется  $22,4 : 12 = 1,867 \text{ м}^3$  диоксида углерода, а объем  $CO_2$  будет равен:

$$V_0^{CO_2} = 0,01 \cdot 1,867 C^P , \text{ м}^3 \text{ CO}_2/\text{кг топл.} \quad (2.24)$$

Объем диоксида серы -  $V_0^{SO_2}$ , может быть рассчитан аналогичным образом .

Тогда:

$$V_0^{SO_2} = 0,01 \cdot 0,7 S^P , \text{ м}^3 \text{ SO}_2/\text{кг топл.} \quad (2.25)$$

Объем водяных паров -  $V_0^{H_2O}$  может быть найден из анализа реакции окисления водорода и поступления паров воды с воздушным дутьем, а также из топлива и с распылителем.

Так, при окислении одного моля водорода массой 2 кг образуется один моль водяных паров объемом 22,4 м<sup>3</sup>. Тогда в результате окисления 1 кг водорода образуется 22,4 : 2 = 11,2 м<sup>3</sup> водяного пара:

$$V_0^{H_2O} = 0,01 \cdot 11,2 H^P, \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O/кг топл.} \quad (2.26)$$

При испарении влаги топлива и распылителя из одного моля воды массой 18 кг образуется один моль пара объемом 22,4 м<sup>3</sup>. Тогда объем 1 кг влаги составит 22,4 / 18 = 1,244 м<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O / кг влаги, а объем влаги от указанных источников будет равен:

$$V_0^{H_2O} = 0,01 \cdot 1,244 (W^P + W_{расп}), \text{ м}^3 \cdot \text{H}_2\text{O/кг топл.} \quad (2.27)$$

Объем водяных паров, вносимых воздушным дутьем, составит:

$$V_0^{H_2O} = 0,001244 g_{H_2O}^{c.6} L_0, \text{ м}^3 \cdot \text{H}_2\text{O/кг топл.} \quad (2.28)$$

Общий объем водяных паров в продуктах полного горения равен:

$$V_0^{H_2O} = 0,01 \cdot 11,2 H^P + 0,01 \cdot 1,244 (W^P + W_{расп}) + \\ + 0,001244 g_{H_2O}^{c.6} L_0, \text{ м}^3 \cdot \text{H}_2\text{O/кг топл.} \quad (2.29)$$

Объем азота –  $V_0^{N_2}$ , в продуктах полного горения твердых и жидких видов топлива складывается из двух источников: азота, содержащегося в топливе ( $N^P$ ) и азота, поступающего с атмосферным воздухом или обогащенным кислородом дутьем. Объем 1 кг азота может быть найден по массе его моля (28 кг) и объему моля (22,4 м<sup>3</sup>), т.е. 22,4 : 28 = 0,8 м<sup>3</sup> N<sub>2</sub> / кг N. Тогда для азота топлива:

$$V_0^{N_2 \text{ топл}} = 0,01 \cdot 0,8 N^P, \text{ м}^3 \cdot \text{N}_2 / \text{кг топл.} \quad (2.30)$$

Общий объем азота в продуктах горения с учетом азота, содержащегося в атмосферном воздухе (второе слагаемое), составит:

$$V_0^{N_2} = 0,01 \cdot 0,8 N^P + 0,79 L_0, \text{ м}^3 \text{ N}_2 / \text{кг топл.} \quad (2.31)$$

Для расчета выхода продуктов горения при  $\alpha > 1,0$  следует воспользоваться формулой (2.13), слагаемые которой определяются по выражениям (2.24), (2.25), либо с помощью (2.14) для  $V_{\alpha}^{H_2O}$ ,  $V_{\alpha}^{N_2}$ ,  $V_{изб}^{O_2}$ .

Составы продуктов полного горения при теоретических условиях ( $\alpha = 1,0$ ) и практических условиях ( $\alpha > 1,0$ ) горения могут быть найдены с использованием формулы (2.15).

### 2.3. Приближенный метод расчета процесса горения топлива

Для решения ряда инженерных задач, таких, как например, получение данных для расчета и выбора тягодутьевых средств, отсутствует необходимость в определении состава топлива, а также состава продуктов горения. В подобных случаях достаточно располагать сведениями о теплоте сгорания топлива и ограничиться определением расхода воздуха, необходимого для горения –  $L_{\alpha}$  и выходом продуктов горения –  $V_{\alpha}$ . Для этого можно воспользоваться приближенным методом, разработанным проф. С.Г.Тройбом, которому удалось установить относительно простые связи между теплотой сгорания топлива и указанными величинами, а также учесть специфику видов топлива. При анализе расчетов процесса горения было также установлено постоянство разности между выходом продуктов горения и расходом воздуха, необходимого для горения -  $\Delta V$ , причем величина этой разности не зависит от коэффициента избытка воздуха.

Для определения расхода воздуха, необходимого для полного горения 1 м<sup>3</sup> или 1 кг топлива в теоретических условиях (при  $\alpha = 1,0$ ) рекомендуется выражение

$$L_0 = 0,001l_1Q_H^P + l_2W^P - \Delta L, \quad (2.32)$$

а для расчета величины разности между выходом продуктов горения и расходом воздуха при тех же (теоретических) условиях –

$$\Delta V = V_0 - L_0 = V_\alpha - L_\alpha = S_1 - 0,001S_2 Q_H^P - 0,0124(W^P - W_{zp}) \quad (2.33)$$

Здесь, кроме уже известных величин  $L_0$ ,  $L_\alpha$ ,  $V_0$ ,  $V_\alpha$ , эмпирическими коэффициентами являются  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ , а  $\Delta L$ ,  $W_{гр}$  - поправочные коэффициенты, величина которых определяется в зависимости от вида топлива и теплоты его сгорания. Сведения об этих коэффициентах представлены в табл. 2.1.

Величины  $V_0$  и  $V_\alpha$ , как это следует из (2.33), равны

$$V_0 = L_0 + \Delta V \quad \text{и} \quad V_\alpha = L_\alpha + \Delta V.$$

Формула (2.33) не пригодна для расчета процесса горения мазута при его распылении водяным паром.

При сжигании смеси нескольких газов расчет процесса горения следует производить по правилу смешения. Если сжигается смесь двух газов, то задачу можно решить графически. Для этого определяют по теплоте сгорания каждого газа характеристики процесса горения -  $L_\alpha$  и  $L_0$ ,  $V_\alpha$  и  $V_0$ .

Далее методика расчета по определению других характеристик процесса горения смеси газов соответствует той, которая описана в п. «3.3. Расчет процесса горения газовых смесей».

Сопоставление результатов расчета характеристик процесса горения, вычисленных по приближенным формулам и по стехиометрическим соотношениям, показывает, что расхождение результатов составляет не более 3,0 %, что является вполне допустимым в практике инженерных расчетов.

Таблица 2.1

Значения коэффициентов и поправок для расчета  $L_0$  и  $\Delta V$

Топливо	$l_1$	$l_2$	$\Delta L$	$S_1$	$S_2$	$W_{zp}$
<b>Горючие газы</b>						
Природный газ: $Q_H^P > 35800$ кДж/м <sup>3</sup>	0,264	0	0,05	1,0	0	$W^P$

$Q^P_H < 35800$ кДж/м <sup>3</sup>	0,264	0	0	0,38	- 0,018	W <sup>P</sup>
Доменный газ	0,191	0	0	0,97	0,031	W <sup>P</sup>
Коксовый газ:						
$Q^P_H < 16750$ кДж/м <sup>3</sup>	0,2567	0	0,25	0,44	- 0,014	W <sup>P</sup>
$Q^P_H > 16750$ кДж/м <sup>3</sup>	0,2567	0	0,25	1,08	0,0239	W <sup>P</sup>
<b>Мазут</b>	0,2627	0,007	0,06	- 0,48	- 0,0287	2,0
<b>Твердые виды топлива</b>						
Бурые угли:						
$A^C < 20\%$				1,02	0,0263	W <sup>P</sup>
$A^C = 20-30\%$	0,2627	0,007	0,06	0,97	0,0263	W <sup>P</sup>
$A^C > 30\%$				0,40	0,0086	8,0
Каменные угли:						
$A^C < 20\%$				1,15	0,0287	W <sup>P</sup>
$A^C = 20-30\%$	0,2627	0,007	0,06	0,97	0,0263	W <sup>P</sup>
$A^C > 30\%$				0,40	0,0086	0
Антрацит	0,2627	0,007	0	0,40	0,0086	0
Кокс	0,2627	0,007	0	0,40	0,0086	12,0

#### 2.4. Расчет температур горения топлива

Сведения о температурах горения топлива позволяют дать обоснованную оценку целесообразности использования данного вида топлива в том или ином технологическом процессе, для которого основным источником тепловой энергии являются процессы его горения. Особенно это важно для металлургических технологий, относящихся к высокотемпературным. Для таких технологий важными являются не только характеристики самого топлива – его происхождение, агрегатное состояние, теплота сгорания, но и условия его сжигания – избыток возду-

ха, уровень обогащения воздуха кислородом, степень подогрева воздуха и газообразного топлива, участвующих в процессах горения. Таким образом, температуры горения топлива являются своего рода комплексным, интегральным показателем процесса горения, используемым для объективной оценки соответствия характеристик топлива и условий его сжигания теплотехническим требованиям реализации соответствующей металлургической технологии.

Определение температур горения топлива производится на основе анализа и решения уравнения теплового баланса процесса горения топлива, который протекает в какой-либо топке или тепловом агрегате. Отражая закон сохранения энергии, уравнение теплового баланса включает две части – *приходную и расходную*. Первая учитывает все источники тепловой энергии, вторая – все виды потерь тепловой энергии конкретного агрегата. Исследованиям с помощью теплового баланса могут быть подвергнуты не только топки, печи, тепловые агрегаты, но и их отдельные элементы – рабочее пространство, теплообменные устройства и др. При использовании теплового баланса как инструмента исследования всегда указывается, для какого агрегата (печи, ее элемента) этот баланс составляется. Кроме того, в зависимости от цели анализа устанавливается размерность слагаемых уравнения теплового баланса.

При рассмотрении процессов горения топлива целесообразно тепловой баланс этого процесса составлять на единицу сжигаемого топлива. Поэтому размерность слагаемых в уравнении теплового баланса будет при сжигании газообразного топлива – кДж/м<sup>3</sup>, а при сжигании жидких и твердых видов топлива – кДж/кг. Для выбранной размерности тепловой баланс процесса горения топлива обычно представляется в следующей форме:

$$Q_H^P + Q_{возд} + Q_{мон} + Q_M = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \pm \Delta Q. \quad (2.34)$$

Физическая сущность каждого слагаемого этого уравнения определяется следующим образом.

*Приходная часть теплового баланса:*

$Q_H^P$  – тепловая энергия химического горения топлива, оцениваемую по теплоте его сгорания. Это слагаемое отражает главный источник тепловой энергии, обеспечивающий технологический процесс;

$Q_{возд}$  – тепловая энергия подогретого воздуха, обеспечивающего горение топлива. Подогретый воздух позволяет снизить общий расход топлива на процесс, повысить температуру горения топлива, что обычно приводит к интенсификации процессов теплообмена. Количество тепловой энергии, определяемое этим слагаемым баланса, зависит от расхода воздуха на единицу сжигаемого топлива –  $L_0^6$ ,  $L_\alpha^6$ , теплоемкости воздуха –  $c_\alpha$ , и температуры его подогрева –  $t_\alpha$ , т.е.

$$Q_{возд} = L_0^6 c_\alpha t_\alpha \text{ или } Q_{возд} = L_\alpha^6 c_\alpha t_\alpha . \quad (2.35)$$

Естественно, чем выше температура подогрева, тем ощутимее проявляются преимущества использования подогретого воздуха. Сведения об объемной теплоемкости воздуха приведены в табл. 2.2;

$Q_{мон}$  – тепловая энергия подогретого топлива. Анализ этого слагаемого теплового баланса аналогичен предыдущему. За счет физической тепловой энергии топлива удастся снизить расход топлива на процесс, повысить температуры горения. Численное определение этого слагаемого производится по формуле

$$Q_{мон} = 1,0 c_T t_T . \quad (2.36)$$

Значимость доли этой тепловой энергии возрастает с ростом температуры подогрева топлива –  $t_T$ . Данные об объемных теплоемкостях некоторых газообразных видов топлива –  $c_T$ , содержатся в той же табл. 2.2.

Таблица 2.2

Средняя теплоемкость газообразных видов топлива и воздуха

$t, ^\circ\text{C}$	$c_P, \text{кДж}/(\text{м}^3 \text{К})$				$t, ^\circ\text{C}$	$c_P, \text{кДж}/(\text{м}^3 \text{К})$			
	П	К	Д	В		П	К	Д	В
0	1,55	1,35	1,33	1,29	700	2,36	1,63	1,43	1,36
100	1,64	1,39	1,34	1,29	800	2,45	1,66	1,45	1,38
200	1,76	1,43	1,35	1,31	900	2,56	1,70	1,46	1,39

300	1,90	1,47	1,37	1,32	1000	2,66	1,73	1,48	1,40
400	2,02	1,51	1,39	1,33	1100	-	1,76	1,49	1,41
500	2,14	1,55	1,41	1,34	1200	-	1,79	1,50	1,42
600	2,27	1,59	1,42	1,35	1300	-	1,81	1,51	1,43

Примечание. П - природный, К – коксовый, Д – доменный газы, В – воздух. Теплоемкость смеси газов обычно определяют по правилу аддитивности.

$Q_M$  – тепловая энергия, вносимая подогретыми материалами. При расчете этого слагаемого учитывается и теплота экзотермических реакций, протекающих в самом материале.

Приведенные слагаемые теплового баланса составляют его приходную часть.

*Расходная часть теплового баланса:*

$Q_1$  – тепловая энергия, израсходованная на нагрев, плавление материалов, подвергшихся тепловой обработке. В это же слагаемое включаются затраты тепловой энергии на осуществление эндотермических реакций;

$Q_2$  – тепловую энергию, сосредоточенную в продуктах горения. Величина этой энергии равна

$$Q_2 = V_\alpha c_2 t_2, \quad (2.37)$$

где  $V_\alpha$  - объем продуктов горения, образующихся при сжигании единицы топлива,  $c_2$  и  $t_2$  – их теплоемкость и температура;

$Q_3$  - потери тепловой энергии от химической неполноты горения. Этот вид потерь связан с процессами диссоциации в продуктах горения, которые получают заметное развитие при высоких температурах (более 1500°C). Кроме этого, величина рассматриваемых потерь растет при неудовлетворительном смешении топлива с воздухом, подаваемым для сжигания топлива. Развитие этих процессов приводит к тому, что в продуктах горения топлива появляются несгоревшие компоненты: оксид углерода – СО и водород – Н<sub>2</sub>, хотя и в небольших количествах – 0,5 ... 3,0%. Появление в продуктах горения несгоревших компонентов свиде-

тельствует о неполном использовании химической энергии топлива, о возникновении тепловых потерь данного типа;

$Q_4$  – потери тепловой энергии от механической неполноты горения. Под механической неполнотой горения понимают вывод из процесса горения части топлива. В этой статье расходной части теплового баланса для твердого топлива учитывают потери тепловой энергии, появляющейся за счет провала кусочков топлива через колосниковую решетку, а также уноса мелких его частиц с газами и золой. Обычно такие потери оценивают по экспериментальным данным, приведенным в литературных источниках. При сжигании газообразных и жидких видов топлива подобные потери отсутствуют, т.е. в этих случаях величину  $Q_4$  принимают равной нулю;

$Q_5$  – потери тепловой энергии в окружающую среду. Эта статья теплового баланса наиболее разнообразна по источникам потерь. При ее расчете учитываются потери энергии теплопроводностью через кладку, потери излучением через открытые окна и щели, затраты тепловой энергии на нагрев охлаждающей воды, подсасываемого из атмосферы воздуха и пр.;

$Q_6$  – потери тепловой энергии на разогрев кладки рабочего пространства теплового агрегата (аккумуляция тепловой энергии кладкой). Этот тип потерь присущ только тепловым агрегатам и печам периодического (циклического) действия. Он обусловлен тем, что при выгрузке горячего металла и загрузке холодного футеровка агрегата (печи) остывает и для того, чтобы восстановить тепловое состояние кладки, следует ее нагреть. Затраты теплоты на этот процесс и составляют потери данного типа;

$\Delta Q$  – невязку баланса, которая может возникнуть при экспериментальном исследовании работающей печи или теплового агрегата.

Проанализированные слагаемые теплового баланса составляют его расходную часть.

Приведенная структура теплового баланса используется для расчета температур горения. При этом рассматриваются адиабатические условия горения топ-

лива без влияния на этот процесс каких-либо технологических особенностей технологий и работы оборудования. Эти особенности расчета записываются следующим образом:

$$Q_M = Q_I = Q_5 = Q_6 = \Delta Q = 0 \quad . \quad (2.38)$$

Тогда уравнение теплового баланса (2.34) с учетом (2.38) может быть записано в виде

$$Q_2 = V_\alpha c_2 t_2 = Q_H^P + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{мон}} - (Q_3 + Q_4). \quad (2.39)$$

Из анализа этого уравнения следует, что тепловая энергия, подводимая для организации процесса горения в виде химической энергии топлива и физической энергии воздуха и топлива за вычетом тепловой энергии на компенсацию потерь, связанных с химической и механической неполнотой горения (недожогом топлива), концентрируется в продуктах горения, определяя их теплосодержание на единицу сгоревшего топлива. Если же отнести величину теплосодержания к  $1\text{ м}^3$  продуктов горения, то уравнение (2.39) преобразуется:

$$c_2 t_2 = [Q_H^P + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{мон}} - (Q_3 + Q_4)] / V_\alpha. \quad (2.40)$$

Величину теплосодержания  $c_2 t_2$  обозначают  $i_{\text{общ}}$  и используют для отыскания температур горения. Действительно, при известных значениях теплоемкости продуктов горения –  $c_2$ , выхода продуктов горения –  $V_\alpha$  или  $V_0$ , температура продуктов горения  $t_2$  может быть найдена из (2.39) или (2.40), т.е.

$$t_2 = [Q_H^P + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{мон}} - (Q_3 + Q_4)] / V_\alpha c_2. \quad (2.41)$$

Температура, достигаемая в условиях сжигания топлива при подогреве воздуха и газа с учетом только *теплоты диссоциации продуктов горения* при температурах горения получила название *теоретической температуры горения*. В зависимости от величины коэффициента избытка воздуха эту температуру принято обозначать  $t_0^T$  (при  $\alpha=1,0$ ) и  $t_\alpha^T$  (при  $\alpha>1,0$ ). Для ее определения используют формулы:

$$t_0^T = (Q_H^P + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{мон}} - Q_3^{\text{дис}}) / V_0 c_2, \quad (2.42)$$

$$t_{\alpha}^T = (Q_H^P + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{мон}} - Q_3^{\text{disc}}) / V_{\alpha} c_2, \quad (2.43)$$

Теплосодержание продуктов горения при теоретических температурах горения равно

$$i_{\text{общ}}^T = c_2 t_0^T = (Q_H^P + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{мон}} - Q_3^{\text{disc}}) / V_0$$

или

$$i_{\text{общ}}^T = c_2 t_{\alpha}^T = (Q_H^P + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{мон}} - Q_3^{\text{disc}}) / V_{\alpha}.$$

Температура, определяемая условиями горения при подогреве воздуха и топлива с учетом *химического и механического недожога*, названа *балансовой температурой горения*. Балансовые температуры горения в зависимости от величины коэффициента избытка воздуха принято обозначать  $t_0^{\bar{\delta}}$  (при  $\alpha=1,0$ ) и  $t_{\alpha}^{\bar{\delta}}$  (при  $\alpha>1,0$ ).

Балансовые температуры могут быть найдены на основе следующих формул:

$$t_0^{\bar{\delta}} = [Q_H^P + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{мон}} - (Q_3 + Q_4)] / V_0 c_2, \quad (2.44)$$

$$t_{\alpha}^{\bar{\delta}} = [Q_H^P + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{мон}} - (Q_3 + Q_4)] / V_{\alpha} c_2. \quad (2.45)$$

Этой температуре соответствует теплосодержание  $1 \text{ м}^3$  продуктов горения

$$i_{\text{общ}}^{\bar{\delta}} = c_2 t_0^{\bar{\delta}} = [Q_H^P + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{мон}} - (Q_3 + Q_4)] / V_0,$$

или

$$i_{\text{общ}}^{\bar{\delta}} = c_2 t_{\alpha}^{\bar{\delta}} = [Q_H^P + Q_{\text{возд}} + Q_{\text{мон}} - (Q_3 + Q_4)] / V_{\alpha}.$$

Для отыскания теоретических  $t_0^T$ ,  $t_{\alpha}^T$  и балансовых  $t_0^{\bar{\delta}}$ ,  $t_{\alpha}^{\bar{\delta}}$  температур процесса горения предварительно определяют теплосодержание  $1 \text{ м}^3$  продуктов горения  $i_{\text{общ}}^T$  или  $i_{\text{общ}}^{\bar{\delta}}$ ,  $\text{кДж/м}^3$ , в зависимости от целей расчета. В этих величинах суммируются теплосодержания за счет химической энергии топлива  $i_x$ , за счет подогретого воздуха  $i_v$ , используемого для горения топлива, а также и за счет подогретого топлива  $i_m$ . При этом, когда определяют теоретические температуры

горения  $t_0^T$ ,  $t_\alpha^T$ , величину  $i_{общ}^T$  рассчитывают, вычитая потери тепловой энергии («неиспользованное» теплосодержание продуктов горения), связанные с развитием процессов диссоциации продуктов горения  $i_3^{disc}$ . При определении балансовых температур горения  $t_0^{\delta}$ ,  $t_\alpha^{\delta}$ , расчет  $i_{общ}^{\delta}$  производят, вычитая из этой величины неиспользованную энергию в виде химического  $i_3$  и механического  $i_4$  недожога.

Таким образом, при отыскании теоретических температур горения

$$i_{общ}^T = i_x + i_e + i_m - i_3^{disc}, \quad (2.46)$$

а при определении балансовых температур горения

$$i_{общ}^{\delta} = i_x + i_e + i_m - (i_3 + i_4). \quad (2.47)$$

Сравнение полученных выражений (2.46) и (2.47) с (2.40) позволяет, используя (2.35) и (2.36), установить что,

$$i_x = Q_H^P / V_\alpha; \quad (2.48)$$

$$i_e = Q_{возд} / V_\alpha = L_\alpha^e c_e t_e / V_\alpha; \quad (2.49)$$

$$i_T = Q_{мон} / V_\alpha = 1,0 c_m t_m / V_\alpha. \quad (2.50)$$

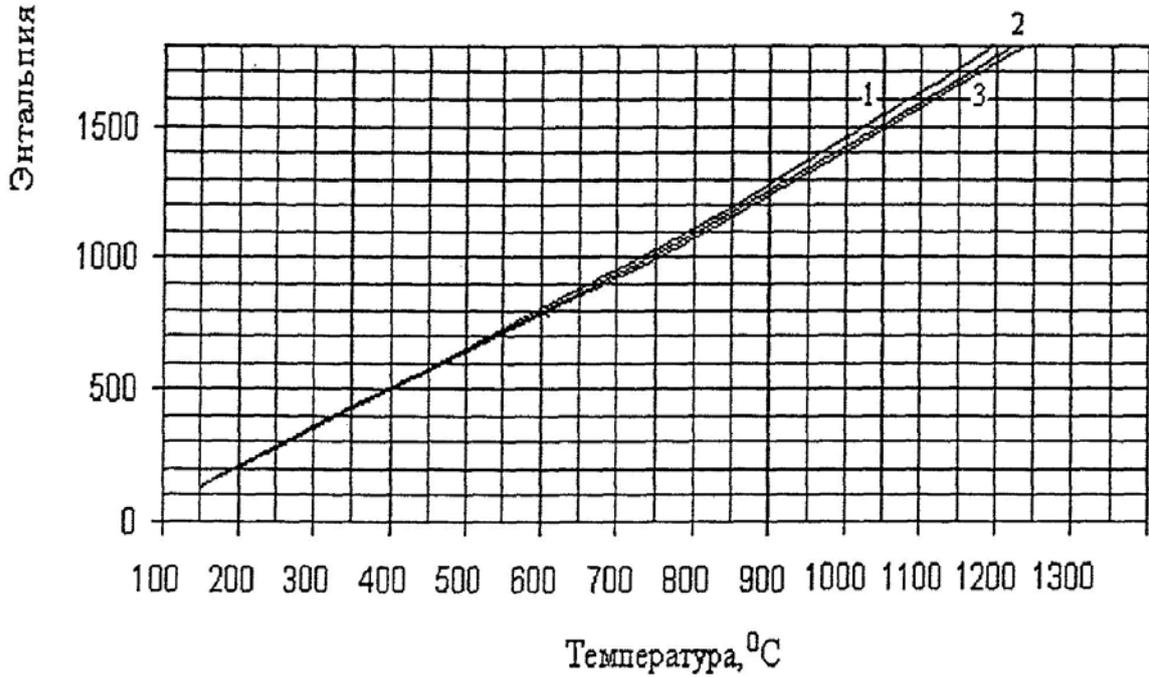
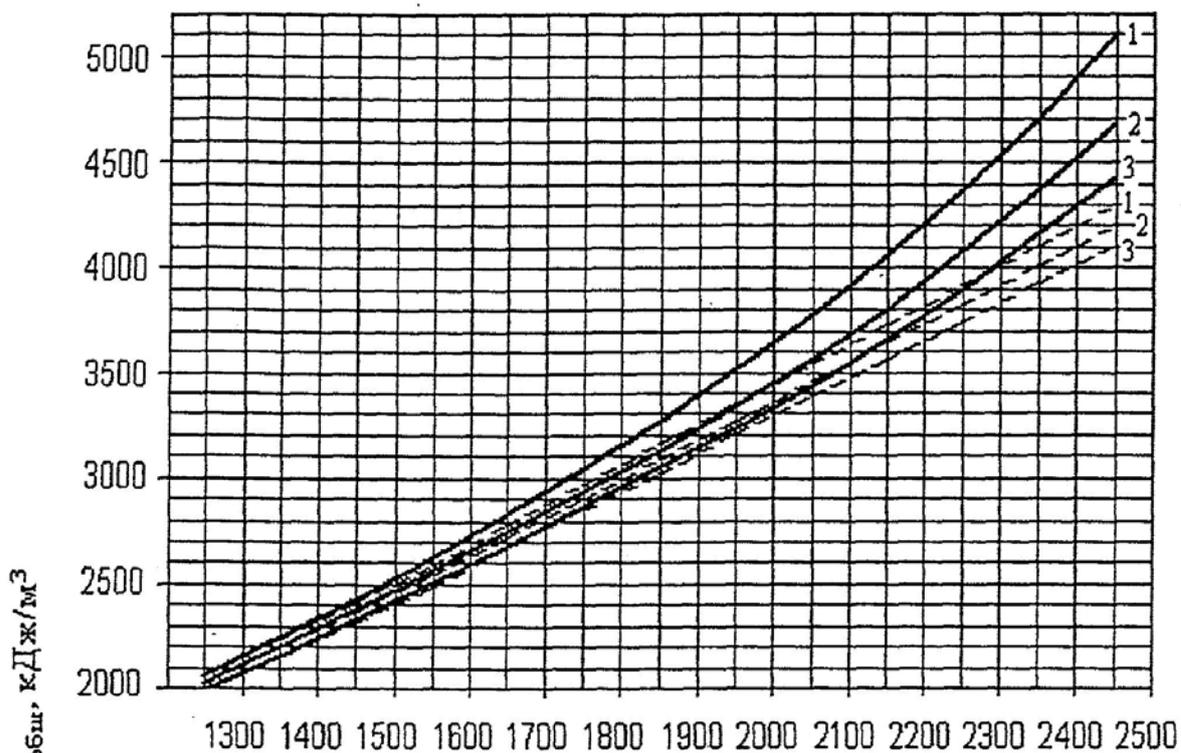
Приведенные формулы справедливы для условий горения топлива как при  $\alpha > 1,0$ , так и при  $\alpha = 1,0$ . В последнем случае при расчете теплосодержания продуктов горения следует использовать величину  $V_0$ .

Если воздух для обеспечения горения поступает из атмосферы, то величина  $i_e$  обычно принимают равной нулю. Значения  $i_T$  для газообразных видов топлива также принимают нулевыми, если топливо поступает на горение при температуре окружающей среды. Для твердых видов топлива, значение  $i_T$ , от которых зависит теплосодержание  $1 \text{ м}^3$  продуктов горения, также принимают равным нулю.

Установленная связь между значениями теплосодержания продуктов горения и температурами горения позволила проф. С.Г.Тройбу построить  $i t$ - диаграммы для определения теоретических и балансовых температур горения, которые приведены на рис. 2.1. ...2.3. Необходимо подчеркнуть, что выбор для ис-

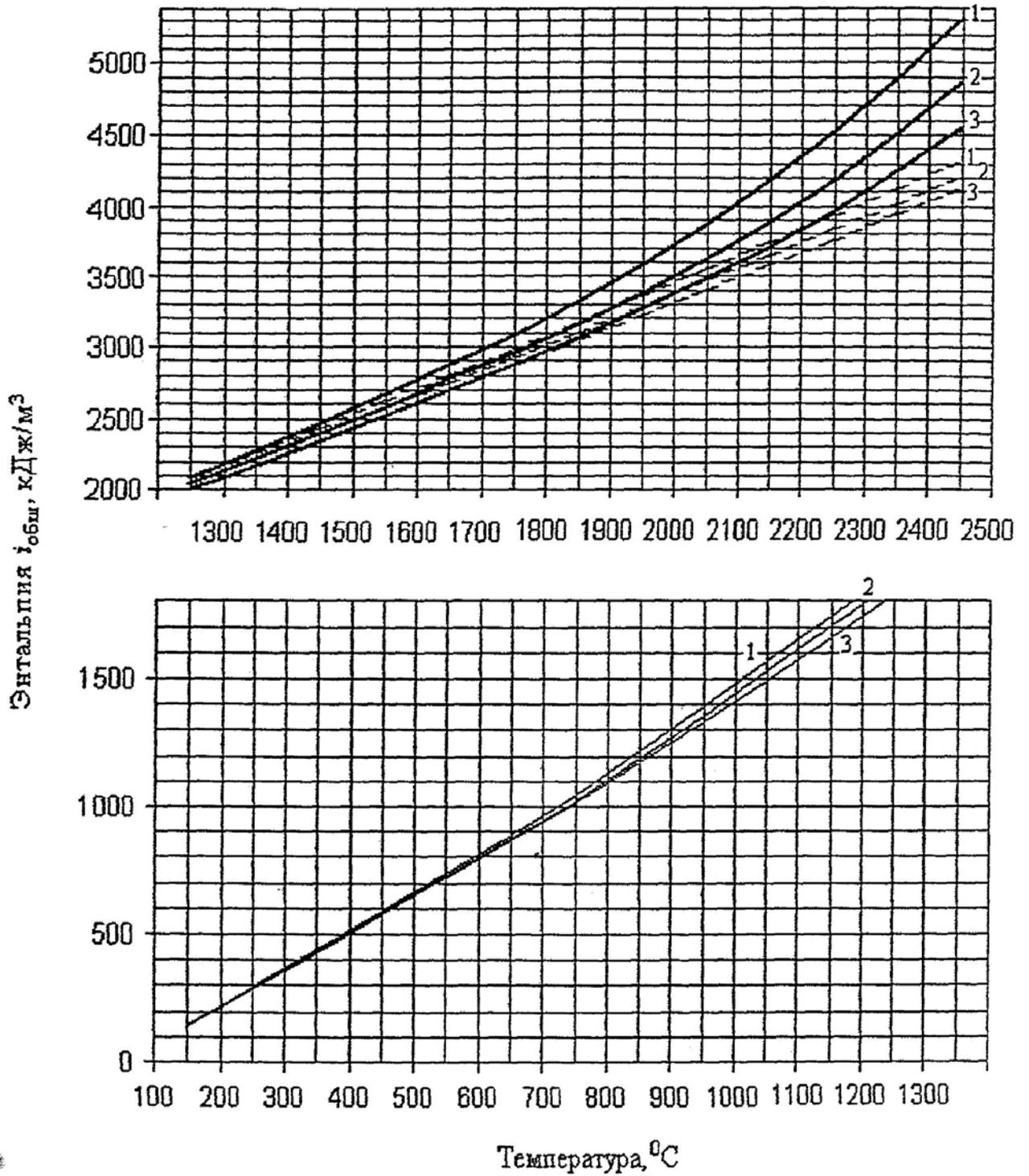
пользования той или иной  $i t$  – диаграммы следует производить в зависимости от вида топлива, а для газообразных видов топлива и от величины их теплоты сгорания. Достоинство диаграмм проф. С.Г.Тройба состоит в том, что в них учтена зависимость теплоемкости продуктов горения от избытка воздуха в них. С этой целью им введен параметр –  $v_L$ , характеризующий избыток воздуха в продуктах горения при определении температур горения. Для определения этого параметра используется формула

$$v_L = (L_\alpha^g - L_o^g)100/V_\alpha. \quad (2.51)$$



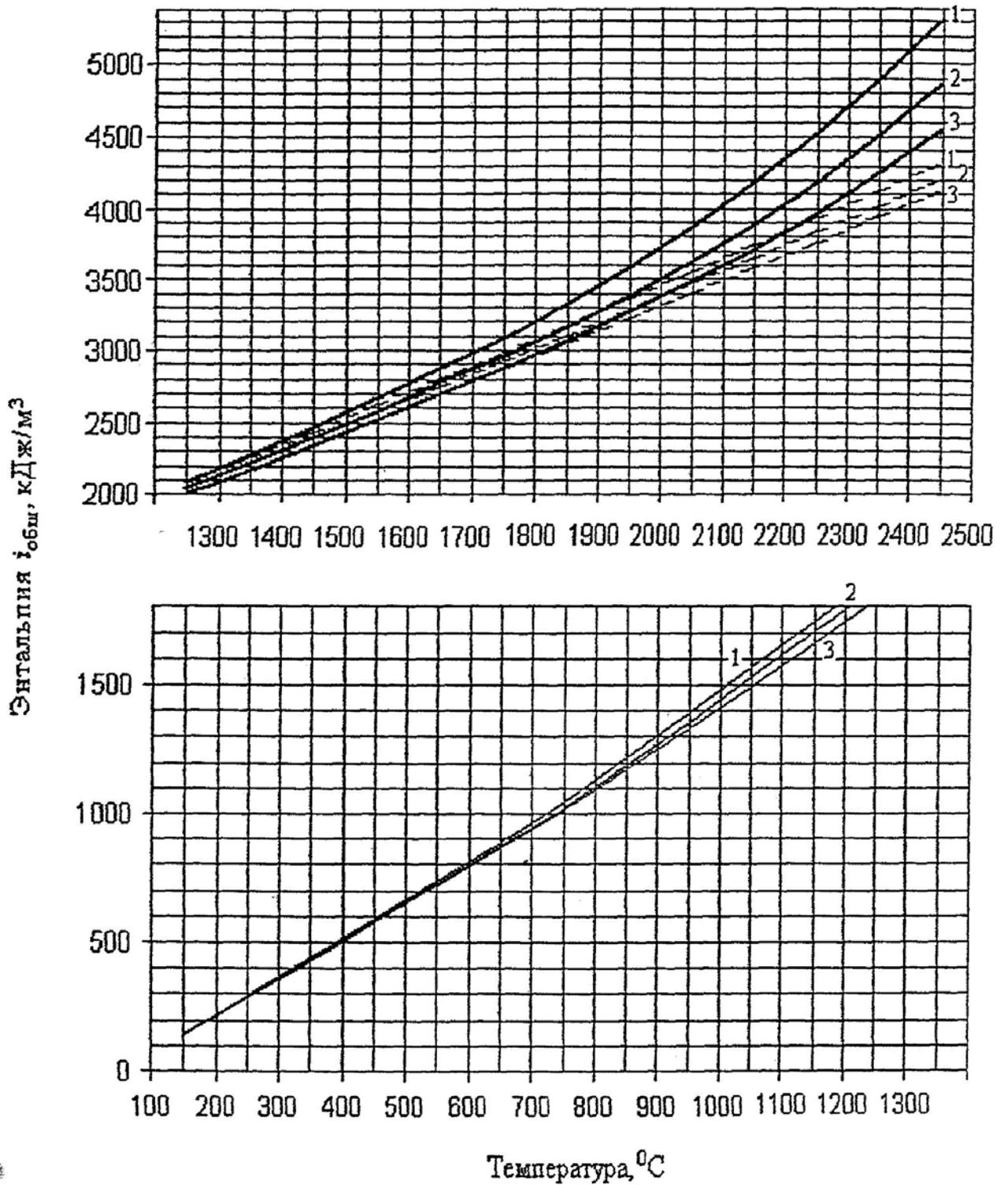
1 -  $V_L = 0$  (продукты горения без воздуха); 2 -  $V_L = 20\%$ ; 3 -  $V_L = 40\%$ .

Рис.2.1. **i-t** – диаграмма для смеси доменного и природного газов при  $Q_H^P > 12500$  кДж/м<sup>3</sup>, а также для коксового и природного газов



1 -  $V_L=0$  (продукты горения без воздуха); 2 -  $V_L=20\%$ ; 3 -  $V_L=40\%$ .

Рис.2.2.  $i-t$  – диаграмма для газов и их смесей при  $8000 < Q_H^P < 12500$  кДж/м<sup>3</sup>, а также для мазута, каменных углей, антрацита и кокса



1 -  $V_L=0$  (продукты горения без воздуха); 2 -  $V_L=20\%$ ; 3 -  $V_L=40\%$ .

Рис.2.3. *i-t* – диаграмма для смеси доменного и коксового газов при  $Q_H^P \leq 8000 \text{ кДж/м}^3$ , а также для доменного газа, бурых углей и торфа

На диаграммах представлены пучки кривых в декартовых координатах, каждая из которых отражает зависимость  $t_i = f(i_{общ})$ , причем сплошные линии соответствуют  $t_0^T$ ,  $t_\alpha^T$ , а пунктирные  $t_0^\delta$ ,  $t_\alpha^\delta$ , при этом параметром для соответствующих пар кривых служит величина  $v_L$ .

Для подъема температуры горения любого вида топлива можно использовать:

- подогрев воздуха, идущего на горение (для любых видов топлива);
- подогрев газообразного топлива. Ограничения существуют для природного газа, нагрев которого не должен превышать  $500^\circ\text{C}$ . При более высоких температурах происходит разложение метана с выделением сажистого углерода;
- подогрев и воздуха, и газообразного топлива, участвующих в процессе горения;
- обогащение бедных газообразных видов топлива более богатыми, например, путем подмешивания к ним природного газа;
- обогащение воздуха кислородом, при этом в зависимости от степени обогащения снижается объем продуктов горения.

### 3. Примеры расчета процессов горения топлива

Ниже приведены примеры расчетов горения топлива, наиболее часто встречающиеся при проектировании и эксплуатации промышленных печей и тепловых агрегатов.

#### 3.1. Расчет процесса горения природного газа

Выполнить аналитический расчет полного горения природного газа, состав которого (на сухой газ) определяют следующие компоненты:  $\text{CH}_4 = 98,0\%$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,1\%$ ,  $\text{CO}_2 = 0,3\%$ ,  $\text{N}_2 = 1,6\%$ , а также определить теоретические ( $t_0^T$ ,  $t_\alpha^T$ ) и балансовые ( $t_0^\delta$ ,  $t_\alpha^\delta$ ) температуры горения при следующих условиях:

а/ когда коэффициент избытка воздуха  $\alpha=1,0$  и температуры подогрева газа и воздуха равны нулю;

б/ когда коэффициент избытка воздуха  $\alpha=1,2$ , температура подогрева топлива  $t_T = 0^\circ\text{C}$ , а температура подогрева воздуха  $t_e=1100^\circ\text{C}$ .

В расчетах принять содержание влаги: в газе –  $g_{H_2O}^{c.2} = 0,0 \text{ г/м}^3$  (газ сухой) и в воздухе -  $g_{H_2O}^{c.6} = 15 \text{ г/м}^3$ . При определении балансовых температур горения считать все виды недожога равными  $0,03 Q_H^P$ .

Следуя положениям методики расчета процессов горения газообразного топлива, необходимо определить:

1. Расход воздуха для обеспечения полного горения в теоретических ( $\alpha=1,0$ ) и практических ( $\alpha=1,2$ ) условиях сжигания топлива. Для этого первоначально рассчитывается

$$V_{O_2}^{TOP} = 0,01(2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6) = 0,01 (2 \cdot 98,0 + 3,5 \cdot 0,1) = 1,964 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

и далее –

объем сухого воздуха:

$$L_0 = (1+K) V_{O_2}^{TOP} = (1 + 3,762)1,964 = 9,353 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$L_\alpha = \alpha L_0 = 1,2 \cdot 9,353 = 11,224 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

объем влажного воздуха:

$$L_o^B = (1 + 0,001244 g_{H_2O}^{c.6}) L_0 = (1+0,001244 \cdot 15)9,353 = 9,528 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$L_\alpha^B = \alpha L_o^B = 1,2 \cdot 9,528 = 11,434 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

2. Выход продуктов горения и их состав в теоретических ( $\alpha =1,0$ ) и практических ( $\alpha =1,2$ ) условиях.

При  $\alpha =1,0$ :

выход диоксида углерода –

$$V_0^{CO_2} = 0,01(\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6) = 0,01 (0,30+98,0 + 2 \cdot 0,1) = 0,985 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

выход водяного пара –

$$V_0^{H_2O} = 0,01(2CH_4 + 3C_2H_6) + 0,001244 g_{H_2O}^{c.6} L_0 =$$

$$= 0,01 (2 \cdot 98,0 + 3 \cdot 0,1) + 0,001244 \cdot 15 \cdot 9,353 = 2,138 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

выход азота –

$$V_0^{N_2} = 0,01N_2 + 0,79 L_0 = 0,01 \cdot 1,6 + 0,79 \cdot 9,353 = 7,405 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Общий выход продуктов горения при  $\alpha = 1,0$  -

$$V_0 = V_0^{CO_2} + V_0^{H_2O} + V_0^{N_2} = 0,985 + 2,138 + 7,405 = 10,528 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Состав продуктов горения:

$$CO_2 = (V_0^{CO_2} / V_0) 100 = (0,985 / 10,528) 100 = 9,36\%.$$

Аналогично определяется процентное содержание и других компонентов продуктов горения.

В итоге получим

$$CO_2 = 9,36\%, \quad H_2O = 20,31\%, \quad N_2 = 70,33\% \quad \text{и} \quad \Sigma = 100\%.$$

Если сумма компонентов отличается от 100% из-за округления двух значащих цифр после запятой, то корректировать следует наиболее значащую цифру. Такая цифра при определении состава продуктов горения обычно отражает содержание азота.

При  $\alpha = 1,2$  имеем:

выход диоксида углерода –

$$V_\alpha^{CO_2} = V_0^{CO_2} = 0,985 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

выход водяного пара

$$V_\alpha^{H_2O} = V_0^{H_2O} + (\alpha - 1) 0,001244 g_{H_2O}^{c.6} L_0 =$$

$$= 2,138 + (1,2 - 1) 0,001244 \cdot 15 \cdot 9,353 = 2,173 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

выход азота –

$$V_\alpha^{N_2} = V_0^{N_2} + (\alpha - 1) 0,79 L_0 = 7,405 + (1,2 - 1,0) 0,79 \cdot 9,353 = 8,883 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

выход избыточного кислорода -

$$V_{изб}^{O_2} = (\alpha - 1) 0,21 L_0 = (1,2 - 1,0) 0,21 \cdot 9,353 = 0,393 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Общий выход продуктов горения при  $\alpha = 1,2$  –

$$V_{\alpha} = V_{\alpha}^{CO_2} + V_{\alpha}^{H_2O} + V_{\alpha}^{N_2} + V_{\alpha}^{O_2} = 0,985 + 2,173 + 8,883 + 0,393 = 12,434 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Состав продуктов горения для данных условий сжигания природного газа,  
% :

CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Σ
7,92	17,48	71,44	3,16	100,00

3. Определение теплоты сгорания природного газа:

$$Q_H^P = 358 \text{ CH}_4 + 636 \text{ C}_2\text{H}_6 = 358 \cdot 98 + 636 \cdot 0,1 = 35148 \text{ кДж/м}^3.$$

4. Определение температур горения: теоретических ( $t_0^T$ ,  $t_{\alpha}^T$ ) и балансовых ( $t_0^{\delta}$ ,  $t_{\alpha}^{\delta}$ ).

При  $\alpha = 1,0$ .

В соответствии с условиями примера теплосодержание продуктов горения для этого случая будет определяться только химической энергией топлива, т.е. теплотой его сгорания.

Поэтому

$$i_{\text{общ}}^T = i_x = (Q_H^P / V_0) = 35148 / 10,528 = 3339 \text{ кДж/м}^3;$$

$$i_{\text{общ}}^{\delta} = i_x = (Q_H^P - 0,03 Q_H^P) / V_0 = (35148 - 0,03 \cdot 35148) / 10,528 = 3238 \text{ кДж/м}^3.$$

Рассчитанные теплосодержания продуктов горения позволяют определить по  $it$  – диаграмме для природного газа ( $Q_H^P = 35148 \text{ кДж/м}^3$ ), представленной на рис 2.1, теоретическую и балансовую температуры горения. Используя эту диаграмму, получим

$$t_0^T = 1875^{\circ}\text{C} \text{ и } t_0^{\delta} = 1900^{\circ}\text{C}.$$

При  $\alpha = 1,2$ .

Для этого случая горения природного газа в соответствии с условиями примера теплосодержание продуктов горения будет определяться не только химической энергией топлива, но и физической теплотой, которая вносится в про-

цесс горения подогретым воздухом. Таким образом, с учетом этого обстоятельства будем иметь

$$\begin{aligned} i_{\text{общ}}^T &= i_x + i_e = (Q_H^P / V_\alpha) + (L_\alpha^B c_e t_e / V_\alpha) = \\ &= (35148 / 12,434) + (11,434 \cdot 1,41 \cdot 1100 / 12,434) = 4253 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

В этом выражении теплоемкость воздуха в интервале температур от 0 до 1100°C принята равной  $c_e = 1,41$  кДж/(м<sup>3</sup> К) (см. табл. 2.2)

$$\begin{aligned} i_{\text{общ}}^{\bar{}} &= i_x + i_e = (Q_H^P - 0,03 Q_H^P) / V_\alpha + (L_\alpha^B c_e t_e / V_\alpha) = \\ &= (35148 - 0,03 \cdot 35148) / 12,434 + (11,434 \cdot 1,41 \cdot 1100 / 12,434) = 4168 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

При  $\alpha = 1,2$  в продуктах горения присутствует избыточный воздух. Его количество  $v_L$  рассчитывается в соответствии с выражением (2.51).

Тогда -

$$v_L = (L_\alpha^B - L_0^B) 100 / V_\alpha = (11,434 - 9,528) 100 / 12,434 = 15,33\%.$$

Воспользовавшись той же диаграммой (рис. 2.1.), для рассчитанных значений  $i_{\text{общ}}^T$ ,  $i_{\text{общ}}^{\bar{}}$  и  $v_L$ , получим

$$t_\alpha^T = 2250^\circ\text{C}; \quad t_\alpha^{\bar{}} = 2420^\circ\text{C}.$$

### 3.2. Расчет процесса горения мазута

Выполнить аналитический расчет полного горения мазута, состав которого определяют следующие компоненты, % на горючую массу:  $C^T = 87,20$ ;  $H^T = 11,5$ ;  $S^T = 0,5$ ;  $O^T = 0,5$ ;  $N^T = 0,3$ ; на сухую массу:  $A^C = 0,3$ ; на рабочую массу:  $W^P = 1,0$ , а также определить теоретические ( $t_0^T$ ,  $t_\alpha^T$ ) и балансовые ( $t_0^{\bar{}}$ ,  $t_\alpha^{\bar{}}$ ) температуры горения при следующих условиях;

а) когда коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,0$ , температура подогрева воздуха равна нулю, т.е.  $t_v = 0^\circ\text{C}$ . Мазут, поступающий к печам, как правило, подогревают, чтобы обеспечить его жидкотекучесть. Температура подогрева мазута зависит от его состава и устанавливается ниже температуры вспышки. Обычно

эта температура не превышает 100°C. Таким образом, температуру подогрева мазута обычно принимают  $t_m = 100^\circ\text{C}$ ;

б) когда коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,2$ , температура подогрева воздуха  $t_B = 1100^\circ\text{C}$ , температура подогрева мазута  $t_m = 100^\circ\text{C}$ .

В расчетах принять содержание влаги в воздухе  $g_{H_2O}^{c.6} = 15 \text{ г/м}^3$ . Распыление мазута осуществляется паром, расход которого на 100 кг мазута составляет 60 кг, т.е.  $W_{расп} = 60 \%$ . При определении балансовых температур горения принять все виды недожога равными  $0,03 Q_H^P$ .

1. Следуя положениям методики расчета процессов горения жидких и твердых видов топлива, в первую очередь необходимо рассчитать рабочий состав мазута. Для этого воспользуемся коэффициентами пересчета состава топлива, приведенными в табл.1.3.

Для пересчета с сухой массы топлива на рабочую массу коэффициент  $k$  будет равен:  $k = (100 - W^P) / 100 = 0,99$ . Тогда величина, характеризующая зольность топлива в рабочем состоянии, будет равна  $A^P = 0,99 A^C \approx 0,30 \%$ .

Для пересчета с горючей массы на рабочую коэффициент  $k$  в соответствии с формулами (табл.1.3) равен:  $k = [100 - (A^P + W^P)] / 100 \approx 0,99$ .

В итоге состав мазута на рабочую массу будет, %:

$C^P$	$H^P$	$S^P$	$O^P$	$N^P$	$A^P$	$W^P$
86,24	11,16	0,50	0,50	0,30	0,30	1,00

Все нижеприведенные расчеты базируются на этом рабочем составе мазута.

2. Расход воздуха для обеспечения полного горения в теоретических ( $\alpha = 1,0$ ) и практических ( $\alpha = 1,2$ ) условиях. Для этого первоначально рассчитывается

$$V_{O_2}^{TOP} = 0,01(1,867 C^P + 5,6 H^P + 0,7 S^P - 0,7 O^P) =$$

$$= 0,01(1,867 \cdot 86,24 + 5,6 \cdot 11,16 + 0,7 \cdot 0,5 - 0,7 \cdot 0,5) = 2,235 \text{ м}^3/\text{кг}$$

и далее –

объем сухого воздуха:

$$L_0 = (1+k) V_{O_2}^{TOII} = 4,762 \cdot 2,235 = 10,643 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$L_\alpha = \alpha L_0 = 1,2 \cdot 10,643 = 12,772 \text{ м}^3/\text{кг};$$

объем влажного воздуха:

$$L_o^B = (1 + 0,001244 g_{H_2O}^{c.6}) L_0 = (1 + 0,001244 \cdot 15) 10,643 = 10,842 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$L_\alpha^B = \alpha L_o^B = 1,2 \cdot 10,842 = 13,01 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

3. Выход продуктов горения и их состав в теоретических ( $\alpha = 1,0$ ) и практических ( $\alpha = 1,2$ ) условиях сжигания мазута.

При  $\alpha = 1,0$ :

выход диоксида углерода –

$$V_0^{CO_2} = 0,01 \cdot 1,867 C^P = 0,01 \cdot 1,867 \cdot 86,24 = 1,610 \text{ м}^3/\text{кг};$$

выход диоксида серы -

$$V_0^{SO_2} = 0,01 \cdot 0,7 S^P = 0,01 \cdot 0,7 \cdot 0,5 = 0,0035 \text{ м}^3/\text{кг};$$

выход водяного пара -

$$\begin{aligned} V_0^{H_2O} &= 0,01 \cdot 11,2 H^P + 0,01 \cdot 1,244 (W^P + W_{расн}) + 0,001244 g_{H_2O}^{c.6} \cdot L_0 = \\ &= 0,01 \cdot 11,2 \cdot 11,16 + 0,01 \cdot 1,244 (1,0 + 60) + 0,001244 \cdot 15 \cdot 10,643 = 2,207 \text{ м}^3/\text{кг}; \end{aligned}$$

выход азота -

$$V_0^{N_2} = 0,01 \cdot 0,8 N^P + 0,79 L_0 = 0,01 \cdot 0,8 \cdot 0,3 + 0,79 \cdot 10,643 = 8,410 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Общий выход продуктов горения при  $\alpha = 1,0$  –

$$V_0 = V_0^{CO_2} + V_0^{SO_2} + V_0^{H_2O} + V_0^{N_2} = 1,610 + 0,0035 + 2,207 + 8,410 = 12,231 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Состав продуктов горения характеризуется следующими данными, %:

CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Σ
13,16	0,03	18,04	68,77	100,00

При  $\alpha = 1,2$ :

выход диоксида углерода -

$$V_\alpha^{CO_2} = V_0^{CO_2} = 1,610 \text{ м}^3/\text{кг};$$

выход диоксида серы -

$$V_{\alpha}^{SO_2} = V_0^{SO_2} = 0,0035 \text{ м}^3/\text{кг};$$

выход водяного пара –

$$\begin{aligned} V_{\alpha}^{H_2O} &= V_0^{H_2O} + (\alpha - 1) 0,001244 g_{H_2O}^{c.6} L_0 = \\ &= 2,207 + (1,2 - 1,0) 0,001244 \cdot 15 \cdot 10,643 = 2,247 \text{ м}^3/\text{кг}; \end{aligned}$$

выход азота -

$$V_{\alpha}^{N_2} = V_0^{N_2} + (\alpha - 1) 0,79L_0 = 8,410 + (1,2 - 1,0) 0,79 \cdot 10,643 = 10,092 \text{ м}^3/\text{кг};$$

выход избыточного кислорода -

$$V_{изб}^{O_2} = (\alpha - 1) 0,21L_0 = (1,2 - 1,0) 0,21 \cdot 10,643 = 0,447 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Общий выход продуктов горения при  $\alpha = 1,2$  -

$$\begin{aligned} V_{\alpha} &= V_{\alpha}^{CO_2} + V_{\alpha}^{SO_2} + V_{\alpha}^{H_2O} + V_{\alpha}^{N_2} + V_{изб}^{O_2} = \\ &= 1,610 + 0,0035 + 2,247 + 10,092 + 0,447 = 14,400 \text{ м}^3/\text{м}^3. \end{aligned}$$

Состав продуктов горения, % :

CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Σ
11,18	0,02	15,60	70,10	3,10	100,0

4. Определение теплоты сгорания мазута.

$$\begin{aligned} Q_H^P &= 339C^P + 1030H^P - 109(O^P - S^P) - 0,25 W^P = \\ &= 339 \cdot 86,24 + 1030 \cdot 11,16 - 109 (0,50 - 0,50) - 25 \cdot 1,0 = 40705 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

5. Определение температур горения: теоретических ( $t_0^T, t_{\alpha}^T$ ) и балансовых ( $t_0^{\delta}, t_{\alpha}^{\delta}$ ).

При  $\alpha = 1,0$ .

В соответствии с условиями примера теплосодержание продуктов горения для этого случая будет определяться только химической энергией топлива, т.е. теплотой его сгорания.

Поэтому

$$i_{общ}^T = i_x = (Q_H^P / V_0) = (40705 / 12,231) = 3328 \text{ кДж/м}^3.$$

$$i_{общ}^{\bar{o}} = i_x = (Q_H^P - 0,03 Q_H^P) / V_0 = (40705 - 0,03 \cdot 40705) / 12,231 = 3228 \text{ кДж/м}^3.$$

Рассчитанные теплосодержания продуктов горения позволяют определить по  $it$  – диаграмме для мазута ( $Q_H^P = 40705$  кДж/кг), представленной на рис. 2.2, теоретическую и балансовую температуры горения. Используя эту диаграмму, получим

$$t_0^T = 1830^\circ\text{C} \text{ и } t_0^{\bar{o}} = 1870^\circ\text{C}.$$

При  $\alpha = 1,2$ .

Для этого случая горения мазута в соответствии с условиями примера теплосодержание продуктов горения будет определяться не только химической энергией топлива, но и физической теплотой, которая вносится в процесс горения подогретым воздухом. Физической теплотой, обусловленной подогревом мазута до  $100^\circ\text{C}$ , обычно пренебрегают в виду незначительности той тепловой энергии, которую вносит подогретый мазут в тепловой баланс процесса горения. Таким образом, с учетом этого обстоятельства теплосодержание продуктов горения, необходимое для определения теоретической температуры горения будет

$$\begin{aligned} i_{общ}^T &= i_x + i_e = (Q_H^P / V_\alpha) + L_\alpha^B c_e t_e / V_\alpha = \\ &= (40705 / 14,400) + 12,772 \cdot 1,41 \cdot 1100 / 14,400 = 4200 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

В этом выражении теплоемкость воздуха в интервале температур от 0 до  $1100^\circ\text{C}$  принята равной  $c_B = 1,41$  кДж/( $\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ) (см.табл.2.2).

$$\begin{aligned} i_{общ}^{\bar{o}} &= i_x + i_e = (Q_H^P - 0,03 Q_H^P / V_\alpha) + (L_\alpha^B c_e t_e / V_\alpha) = \\ &(40705 - 0,03 \cdot 40705) / 14,400 + 12,772 \cdot 1,41 \cdot 1100 / 14,400 = 4118 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

При  $\alpha = 1,2$  в продуктах горения присутствует избыточный воздух. Его количество  $v_L$  рассчитывается в соответствии с выражением (2.51). Тогда

$$v_L = (L_\alpha^B - L_0^B) 100 / V_\alpha = (12,772 - 10,643) 100 / 14,400 = 14,78 \text{ \%}.$$

Воспользовавшись той же диаграммой (рис.2.2), получим

$$t_\alpha^T = 2220^\circ\text{C}; \quad t_\alpha^{\bar{o}} = 2380^\circ\text{C}.$$

### 3.3. Расчет процесса горения газовых смесей

Выполнить аналитический расчет полного горения смешанного газа, теплота сгорания которого равна  $8000 \text{ кДж/м}^3$ . Такой газ приготовлен из смеси доменного и коксового газов. Их составы (на сухой газ) определяют следующие компоненты, %:

	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	$g_{\text{H}_2\text{O}}^{c.2}, \text{г/м}^3$
Доменный газ	17,7	22,2	6,8	0,1	-	53,2	-	35
Коксовый газ	2,1	6,8	59,4	26,6	2,1	2,6	0,4	25

Определить теоретические  $(t_0^T, t_\alpha^T)$  и балансовые  $(t_0^\delta, t_\alpha^\delta)$  температуры горения при следующих условиях:

а) когда коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,0$  и температуры подогрева газа и воздуха равны нулю;

б) когда коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,2$ , температура подогрева топлива  $t_T = 0^\circ\text{C}$ , а температура подогрева воздуха  $t_\alpha = 1100^\circ\text{C}$ .

В расчетах принять содержание влаги в воздухе  $g_{\text{H}_2\text{O}}^{c.6} = 15 \text{ г/м}^3$ . При определении балансовых температур горения все виды недожога считать равными  $0,03(Q_H^P)_{\text{см.г}}$ , т.е.  $Q_3 + Q_4 = 0,03 \cdot 8000 = 240 \text{ кДж/м}^3$ .

1. При решении задачи этого примера первоначально следует определить рабочие (влажные) составы доменного и коксового газов, идущих на приготовление смешанного газа. Для этого следует воспользоваться материалами п.1.2.1. В соответствии с формулой 1.1:

$$(\text{H}_2\text{O}^B)_{\text{д.г.}} = g_{\text{H}_2\text{O}}^{c.2} / (8,036 + g_{\text{H}_2\text{O}}^{c.2}) = 35 / (8,036 + 0,01 \times 35) = 4,17 \%,$$

$$(\text{H}_2\text{O}^B)_{\text{к.г.}} = g_{\text{H}_2\text{O}}^{c.2} / (8,036 + g_{\text{H}_2\text{O}}^{c.2}) = 25 / (8,036 + 0,01 \times 25) = 3,02 \%.$$

Полученные данные позволяют пересчитать составы сухих газов на рабочие (влажные), для чего следует воспользоваться соотношением:

$$X_i^e = X_i (1 - 0,01 \times H_2O^B).$$

Не приводя всех деталей определения, представим конечный результат.

Рабочие составы влажных газов, %:

	$CO_2^e$	$CO^e$	$H_2^e$	$CH_4^e$	$C_2H_6^e$	$N_2^d$	$O_2^e$	$H_2O^e$
Доменный газ	16,96	21,27	6,52	0,01	-	51,07	-	4,17
Коксовый газ	2,04	6,59	57,60	25,80	2,04	2,52	0,39	3,02

Чтобы рассчитать доли доменного -  $x$ , и коксового -  $y$ , газов, используемых для смешения, следует обратиться к системе уравнений, отражающих условия приготовления смешанного газа. Первое уравнение учитывает, что  $1 \text{ м}^3$  смешанного газа складывается из указанных выше долей:

$$x + y = 1,0,$$

а второе – учитывает, что заданная теплота сгорания смешанного газа равна –

$$x(Q_H^P)_{д.г} + y(Q_H^P)_{к.г} = (Q_H^P)_{см.г}.$$

Для решения этой системы следует определить теплоты сгорания доменного и коксового газов, имея в виду рабочий состав каждого газа. Применяя формулу (1.9), будем иметь:

$$(Q_H^P)_{д.г} = 3456 \text{ кДж/м}^3,$$

$$(Q_H^P)_{к.г} = 17596 \text{ кДж/м}^3.$$

Подставляя полученные данные в систему уравнений, получим:

$$x + y = 1,0;$$

$$x \cdot 3456 + y \cdot 17596 = 8000.$$

В результате решения:

$$x = 0,679 \quad \text{и} \quad y = 0,321.$$

Таким образом, для приготовления  $1,0 \text{ м}^3$  смешанного газа требуемой теплоты сгорания –  $8000 \text{ кДж/м}^3$ , необходимо, чтобы смесь содержала  $0,679 \text{ м}^3$  доменного газа и  $0,321 \text{ м}^3$  коксового газа.

Эти данные позволяют определить рабочий состав смешанного газа, используя следующее соотношение.

$$X_{i,\text{см.г}} = 0,679 X_{i,\text{д.г}} + 0,321 X_{i,\text{к.г}},$$

где  $X_i$  – процентное содержание компонентов соответствующих газообразных видов топлива – смешанного, доменного и коксового газов. В итоге расчета будем иметь:

CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Σ
12,17	16,55	22,92	8,35	0,66	35,42	0,13	3,80	100

Далее все расчеты производятся в соответствии с положениями методики расчета процессов горения газообразного топлива.

2. Расход воздуха для обеспечения полного горения в теоретических ( $\alpha=1,0$ ) и практических ( $\alpha=1,2$ ) условиях. Как и ранее, первоначально рассчитывается

$$\begin{aligned} V_{O_2}^{mon} &= 0,01(0,5 \text{ CO} + 0,5 \text{ H}_2 + 2 \text{ CH}_4 + 3,5 \text{ C}_2\text{H}_6 - \text{O}_2) = \\ &= 0,01(0,5 \cdot 16,55 + 0,5 \cdot 22,92 + 2 \cdot 8,35 + 3,5 \cdot 0,66 - 0,13) = 0,387 \text{ м}^3/\text{м}^3, \end{aligned}$$

а затем объем сухого воздуха:

$$L_0 = (1 + k) V_{O_2}^{TOP} = 4,762 \cdot 0,387 = 1,843 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$L_\alpha = \alpha L_0 = 1,2 \cdot 1,843 = 2,212 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

и объем влажного воздуха:

$$L_o^B = (1 + 0,001244 g_{H_2O}^{c.6}) L_0 = (1 + 0,001244 \cdot 15) 1,843 = 1,877 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

$$L_\alpha^B = \alpha L_o^B = 1,2 \cdot 1,877 = 2,252 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

3. Выход продуктов горения и их состав в теоретических ( $\alpha=1,0$ ) и практических ( $\alpha=1,2$ ) условиях.

При  $\alpha = 1,0$ :

выход диоксида углерода -

$$\begin{aligned} V_0^{CO_2} &= 0,01(CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_6) = \\ &= 0,01(12,17 + 16,55 + 8,35 + 2 \cdot 0,66) = 0,384 \text{ м}^3/\text{м}^3. \end{aligned}$$

выход водяного пара –

$$\begin{aligned} V_0^{H_2O} &= 0,01(H_2O + H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 0,001244 g_{H_2O}^{c.6} L_0) = \\ &= 0,01(3,80 + 22,92 + 2 \cdot 8,35 + 3 \cdot 0,66) + 0,001244 \cdot 15 \cdot 1,843 = 0,488 \text{ м}^3/\text{м}^3. \end{aligned}$$

выход азота –

$$V_0^{N_2} = 0,01 N_2 + 0,79 L_0 = 0,01 \cdot 35,42 + 0,79 \cdot 1,843 = 1,810 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Общий выход продуктов горения при  $\alpha = 1,0$  –

$$V_0 = V_0^{CO_2} + V_0^{H_2O} + V_0^{N_2} = 0,384 + 0,488 + 1,810 = 2,682 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Состав продуктов горения характеризуется следующими данными, % :

CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Σ
14,32	18,19	67,49	100,0

Если сумма компонентов отличается от 100 % из-за округления двух значащих цифр после запятой, то корректировать следует наиболее значащую цифру. Такая цифра при определении состава продуктов горения отражает содержание азота.

При  $\alpha = 1,2$ :

выход диоксида углерода -

$$V_\alpha^{CO_2} = V_0^{CO_2} = 0,384 \text{ м}^3/\text{м}^3;$$

выход водяного пара –

$$\begin{aligned} V_\alpha^{H_2O} &= V_0^{H_2O} + (\alpha - 1) 0,001244 g_{H_2O}^{c.6} L_0 = \\ &= 0,488 + (1,2 - 1,0) 0,001244 \cdot 15 \cdot 1,843 = 0,495 \text{ м}^3/\text{м}^3. \end{aligned}$$

выход азота –

$$V_\alpha^{N_2} = V_0^{N_2} + (\alpha - 1) 0,79 L_0 = 1,810 + (1,2 - 1,0) 0,79 \cdot 1,843 = 2,101 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

выход избыточного кислорода –

$$V_{изб}^{O_2} = (\alpha - 1) 0,21L_0 = (1,2 - 1,0) 0,21 \cdot 1,843 = 0,077 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Общий выход продуктов горения при  $\alpha = 1,2$  -

$$\begin{aligned} V_{\alpha} &= V_{\alpha}^{CO_2} + V_{\alpha}^{H_2O} + V_{\alpha}^{N_2} + V_{изб}^{O_2} = \\ &= 0,384 + 0,495 + 2,101 + 0,077 = 3,057 \text{ м}^3/\text{м}^3. \end{aligned}$$

Состав продуктов горения для условий сжигания смешанного газа, %:

CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Σ
12,56	16,19	68,73	2,52	100,0

4. Определение теплоты сгорания смешанного газа. В данном случае проведение этого этапа расчета не требуется, так как теплота сгорания задана условием расчета и равна

$$Q_H^P = 8000 \text{ кДж/м}^3.$$

5. Определение температур горения: теоретических ( $t_0^T, t_{\alpha}^T$ ) и балансовых ( $t_0^{\delta}, t_{\alpha}^{\delta}$ ).

При  $\alpha = 1,0$ .

В соответствии с условиями примера теплосодержание продуктов горения для этого случая будет определяться только химической энергией топлива, т.е. теплотой его сгорания.

Поэтому

$$i_{общ}^T = i_x = (Q_H^P / V_0) = 8000 / 2,682 = 2983 \text{ кДж/м}^3;$$

$$i_{общ}^{\delta} = i_x = (Q_H^P - 0,03 Q_H^P) / V_0 = (8000 - 0,03 \cdot 8000) / 2,682 = 2893 \text{ кДж/м}^3.$$

Рассчитанные теплосодержания продуктов горения позволяют определить по  $it$  – диаграмме для смешанного газа, представленной на рис. 2.3, теоретическую и балансовую температуры горения. Используя эту диаграмму, получим

$$t_0^T = 1700^{\circ}\text{C} \text{ и } t_0^{\delta} = 1730^{\circ}\text{C}.$$

При  $\alpha = 1,2$ .

Для этого случая горения смешанного газа в соответствии с условиями примера теплосодержание продуктов горения будет определяться не только химической энергией топлива, но и физической теплотой, которая вносится в процесс горения подогретым воздухом. Таким образом, с учетом этого обстоятельства будет:

$$\begin{aligned} i_{общ}^T &= i_x + i_g = Q_H^P / V_\alpha + L_\alpha^B c_g t_g / V_\alpha = \\ &= 8000 / 3,057 + 2,252 \cdot 1,41 \cdot 1100 / 3,057 = 3759 \text{ кДж/м}^3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} i_{общ}^{\bar{o}} &= i_x + i_g = (Q_H^P - 0,03 Q_H^P) / V_\alpha + L_\alpha^B c_g t_g / V_\alpha = \\ &= (8000 - 0,03 \cdot 8000) / 3,057 + 2,252 \cdot 1,41 \cdot 1100 / 3,057 = 3681 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

При  $\alpha = 1,2$  в продуктах горения присутствует избыточный воздух. Его количество  $v_L$  рассчитывается в соответствии с выражением (2.51). Тогда

$$v_L = (L_\alpha^B - L_0^B) 100 / V_\alpha = (2,252 - 1,877) 100 / 3,057 = 12,27\%.$$

Воспользовавшись той же диаграммой (рис.2.3), для рассчитанных значений  $i_{общ}^T$ ,  $i_{общ}^{\bar{o}}$  и  $v_L$  получим

$$t_\alpha^T = 2060^\circ\text{C} \text{ и } t_\alpha^{\bar{o}} = 2130^\circ\text{C}.$$

В некоторых случаях возникает необходимость использования топливного газа, приготовленного из трех видов топлива, например доменного, коксового и природного. Для них расчет процесса горения следует производить следующим образом:

1. В соответствии с балансом доменного и коксового газов на предприятии определяется соотношение этих газов ( $x$  – доля доменного газа и  $y$  – доля коксового газа), используемых для приготовления первоначальной смеси. Эти данные, дополненные сведениями о составе доменного и коксового газов, являются базой для расчета состава первоначальной смеси газов и характеристик процесса горения такой смеси. Методика определения указанных величин отражена в примере п.3.3.

2. Второй этап расчета, по существу, повторяет первый с той лишь разницей, что в качестве первого газа выступает первоначальная смесь, а в качестве второго – природный газ. Доли первоначальной смеси  $x_{см}$ , и природного газа  $z$  рассчитываются в зависимости от заданной теплоты сгорания, устанавливаемой требованиями теплового режима работы печи. По этим данным и составу смешиваемых газов определяется конечный состав смешанного газа и далее по методике, представленной в примере п.3.3 рассчитываются все характеристики процесса горения, включая и температуры горения.

### 3.4. Расчет процесса совместного горения природного газа и мазута

Выполнить расчет горения смеси природного газа и мазута, если количество мазута по тепловой энергии составляет 30% от общего количества тепла, т.е. в  $1\text{ м}^3$  продуктов сгорания 70% тепловой энергии получают за счет сжигания природного газа, а остальные 30% - за счет сжигания мазута.

Состав природного газа (на сухой газ), об. %:

$\text{CH}_4 = 98,0\%$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6 = 0,1\%$ ,  $\text{CO}_2 = 0,3$ ,  $\text{N}_2 = 1,6$ .

Состав мазута, масс. %:

$\text{C}^F = 87,20$ ;  $\text{H}^F = 11,5$ ;  $\text{S}^F = 0,5$ ;  $\text{O}^F = 0,5$ ;  $\text{N}^F = 0,3$ ;  $\text{A}^C = 0,3$ ;  $\text{W}^P = 1,0$ .

Для указанных условий (совместного сжигания природного газа и мазута) необходимо определить теоретические ( $t_0^T$ ,  $t_\alpha^T$ ) и балансовые ( $t_0^{\circ}$ ,  $t_\alpha^{\circ}$ ) температуры горения, имея в виду, что:

а) Коэффициент расхода воздуха  $\alpha = 1,0$  и температуры подогрева природного газа и воздуха равны нулю, т.е.  $t_\Gamma = t_B = 0^\circ\text{C}$ . Мазут, поступающий к печам, как правило, подогревают, чтобы обеспечить его жидкотекучесть. Температура подогрева мазута зависит от его состава и устанавливается ниже температуры вспышки. Обычно эта температура не превышает  $100^\circ\text{C}$ . Таким образом температура подогрева мазута  $t_M = 100^\circ\text{C}$ ;

б) Коэффициент расхода воздуха  $\alpha = 1,2$ , а температура подогрева природного газа  $t_r = 0^\circ$ , мазута  $t_m = 100^\circ\text{C}$ , а температура подогрева воздуха  $t_b = 1100^\circ\text{C}$ .

В расчетах принять содержание влаги в воздухе  $g_{H_2O}^{c.6} = 15 \text{ г/м}^3$ .

При определении балансовых температур горения все виды недожога для каждого вида топлива принять равными 3 % или  $0,03 (Q_H^P)_i$ .

При решении задач этого примера первоначально следует учесть, что совместное сжигание природного газа и мазута формируют продукты горения, теплосодержание которых определяют балансовую температуру горения -  $t_\alpha^\delta$ . В общем случае из анализа теплового баланса процесса горения вытекает, что

$$i_{\text{общ}} = (1 - z) \times (i_{\text{общ}})_{\text{п.г.}} + z \times (i_{\text{общ}})_M,$$

где  $z$  – доля тепловой энергии, получаемой при сжигании мазута. Первое слагаемое этого выражения указывает на долю тепловой энергии, которая поступает в продукты горения за счет сжигания природного газа, а второе - за счет сжигания мазута.

Следовательно решение задачи этого примера следует начинать с определения характеристик процесса горения: расхода воздуха -  $L_i^{61}$ , выхода продуктов горения -  $V_i$ , а также теплоты сгорания -  $(Q_H^P)_{\text{п.г.}}$ ,  $(Q_H^P)_M$ .

1. Для расчета характеристик процесса горения природного газа и мазута в данном случае целесообразно воспользоваться полученными ранее данными, в частности, результатами расчета примера п. 3.1 (для природного газа) и примера п. 3.2. (для мазута). Эти данные приведены в табл. 3.1.

2. Определение теплоты сгорания природного газа и мазута. Расчет этих характеристик может быть осуществлен по формулам (1,8) и (1,9'). Однако, этот

Таблица 3.1

Результаты расчета характеристик процесса горения  
природного газа и мазута

№ п/п	Характеристики процесса	Раз- мер- ность	Природный газ		Мазут	
			$\alpha=1,0$	$\alpha=1,2$	$\alpha=1,0$	$\alpha=1,2$
1	Расход влажно- го воздуха, $L_i^{вл}$	$\text{м}^3/\text{м}^3$ , $\text{м}^3/\text{кг}$	9,528	11,434	10,842	13,010
2	Объем образу- ющихся про- дуктов горения, $V_i$	$\text{м}^3/\text{м}^3$ , $\text{м}^3/\text{кг}$	10,528	12,434	12,204	14,400

этап расчета в данном случае может быть опущен, так как сведения о теплоте сгорания этих видов топлива для данного примера также представлены результатами расчетов указанных выше примеров (п.3.1.) и (п.3.2.). Таким образом:

$$(Q_n^p)_{п.г.} = 35\,148 \text{ кДж/м}^3, \quad (Q_n^p)_м = 40\,705 \text{ кДж/кг.}$$

3.Определение температур горения: теоретических ( $t_0^T, t_\alpha^T$ ) и балансовых ( $t_0^б, t_\alpha^б$ ).

При  $\alpha=1,0$ .

В соответствии с условиями примера теплосодержание продуктов горения для этого случая будет определяться только химической энергией природного газа и мазута, т.е. их величинами -  $(Q_n^p)_{п.г.}$  и  $(Q_n^p)_м$ . Поэтому теплосодержание продуктов горения для определения теоретической температуры горения –

$$\begin{aligned} i_{обц}^m &= (1 - z) \times (i_{обц}^m)_{п.г.} + z \times (i_{обц}^m)_м = \\ &= (1 - 0,3) \times (Q_n^p)_{п.г.} / (V_0)_{п.г.} + 0,3 \times (Q_n^p)_м / (V_0)_м = \\ &= (1 - 0,3) \times 35\,148 / 10,528 + 0,3 \times 40\,705 / 12,204 = 3338 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Аналогичная величина для отыскания балансовой температуры горения -

$$\begin{aligned} i_{\text{общ}}^{\delta} &= (1 - z) \times (i_{\text{общ}}^{\delta})_{\text{п.г.}} + z \times (i_{\text{общ}}^{\delta})_{\text{м}} = \\ &= (1 - 0,3) \times (Q_n^p - 0,03 Q_n^p)_{\text{п.г.}} / (V_0)_{\text{п.г.}} + 0,3 \times (Q_n^p - 0,03 Q_n^p)_{\text{м}} / (V_0)_{\text{м}} = \\ &= (1 - 0,3) \times 0,97 \times 35\,148 / 10,528 + 0,3 \times 0,97 \times 40\,617 / 12,204 = 3238 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Поскольку доля природного газа по теплоте в продуктах горения составляет 70%, то целесообразно воспользоваться для определения теоретической и балансовой температур горения  $it$  – диаграммой для природного газа, представленной на рис. 2.1. Используя эту диаграмму, получим

$$t_0^T = 1850^\circ\text{C} \text{ и } t_0^{\delta} = 1890^\circ\text{C}.$$

При  $\alpha = 1,2$ .

В соответствии с условиями примера теплосодержание продуктов горения будет определяться не только химической энергией этих топлив, но и физической теплотой, которую вносит в процесс горения подогретый воздух. Физической теплотой, обусловленной подогревом мазута до  $100^\circ\text{C}$ , обычно пренебрегают в виду незначительности той тепловой энергии, которую вносит подогретый мазут в тепловой баланс процесса горения. Таким образом, с учетом этого обстоятельства теплосодержание продуктов горения, необходимое для определения теоретической температуры горения составит

$$\begin{aligned} i_{\text{общ}}^m &= (1 - z) \times (i_{\text{общ}}^m)_{\text{п.г.}} + z \times (i_{\text{общ}}^m)_{\text{м}} = \\ &= (1 - z) \times (i_x + i_b)_{\text{п.г.}} + z \times (i_x + i_b)_{\text{м}} = (1 - z) \times \{[(Q_n^p)_{\text{п.г.}} / (V\alpha)_{\text{п.г.}}] + \\ &+ [(L\alpha)_{\text{п.г.}} \times c_0^t \times t_b / (V\alpha)_{\text{п.г.}}]\} + z \times \{[(Q_n^p)_{\text{м}} / (V\alpha)_{\text{м}}] + [(L\alpha)_{\text{м}} \times c_0^t \times t_b / (V\alpha)_{\text{м}}]\} = \\ &= (1 - 0,3) \times [(35\,148 / 12,434) + (11,434 \times 1,40 \times 1100 / 12,434)] + \\ &+ 0,3 \times [(40\,705 / 14,400) + (13,010 \times 1,40 \times 1100 / 14,400)] = 4115 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

В этом выражении теплоемкость воздуха в интервале температур от 0 до  $1100^\circ\text{C}$  принята равной  $c_0^t = 1,40 \text{ кДж} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$  (см. табл.2.2).

$$\begin{aligned} i_{\text{общ}}^{\delta} &= (1 - z) \times (i_{\text{общ}}^{\delta})_{\text{п.г.}} + z \times (i_{\text{общ}}^{\delta})_{\text{м}} = \\ &= \{(1 - 0,3) \times (Q_n^p - 0,03 \times Q_n^p)_{\text{п.г.}} / (V\alpha)_{\text{п.г.}} + [(L\alpha)_{\text{п.г.}} \times c_0^t \times t_b / (V\alpha)_{\text{п.г.}}]\} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \{0,3 \times (Q_n^p - 0,03 \times Q_n^p)_{\text{м}} / (V\alpha)_{\text{м}} + [(L\alpha)_{\text{м}} \times c'_0 \times t_{\text{в}} / (V\alpha)_{\text{м}}]\} = \\
& = (1 - 0,3) \times [(0,97 \times 35\,148 / 12,434) + (11,434 \times 1,40 \times 1100 / 12,434)] + \\
& + 0,3 \times [(0,97 \times 40\,705 / 12,204) + (13,01 \times 1,40 \times 1100 / 14,400)] = 4203 \text{ кДж/м}^3.
\end{aligned}$$

При  $\alpha=1,2$  в продуктах горения присутствует избыточный воздух. Его количество  $v_L$  рассчитывают в соответствии с выражением (2.51). Для применения этой формулы следует располагать значениями расходов воздуха -  $(L_0)$  (при  $\alpha=1,0$ ) и  $(L\alpha)$  (при  $\alpha=1,2$ ), а также значением выхода продуктов горения -  $(V\alpha)$  (при  $\alpha=1,2$ ). Эти величины позволяют определить избыток воздуха при сжигании отдельно природного газа и мазута:

$$\begin{aligned}
(v_L)_{\text{п.г.}} &= [(L\alpha)_{\text{п.г.}} - (L_0)_{\text{п.г.}}] \times 100 / (V\alpha)_{\text{п.г.}} = \\
&= (11,224 - 9,353) \times 100 / 12,434 = 15,05 \% \\
(v_L)_{\text{м}} &= [(L\alpha)_{\text{м}} - (L_0)_{\text{м}}] \times 100 / (V\alpha)_{\text{м}} = \\
&= (13,010 - 10,842) \times 100 / 14,400 = 13,40 \%.
\end{aligned}$$

По полученным выше данным следует найти процентное содержание избыточного воздуха в продуктах горения. В первом приближении с достаточной для инженерных расчетов точностью избыток воздуха при совместном сжигании природного газа и мазута можно рассчитать по следующей формуле:

$$\begin{aligned}
(v_L)_{\text{см}} &= [(1 - z) \times (v_L)_{\text{п.г.}} + z \times (v_L)_{\text{м}}] = \\
&= (1 - 0,3) \times 15,05 + 0,3 \times 13,40 = 14,52 \%
\end{aligned}$$

Используя для определения теоретической и балансовой температур горения  $it$  - диаграмму для природного газа, представленную на рис. 2.1, и рассчитанные значения  $i_{\text{общ}}^m = 4115 \text{ кДж/м}^3$  и  $i_{\text{общ}}^{\delta} = 4203 \text{ кДж/м}^3$ , а также  $(v_L)_{\text{см}} = 13,40\%$ , получим

$$t_{\alpha}^m = 2260^{\circ}\text{C}, \quad t_{\alpha}^{\delta} = 2410^{\circ}\text{C}.$$

### 3.5. Расчет температуры подогрева воздуха

Определить температуру подогрева воздуха, способную обеспечить при горении доменного газа с коэффициентом расхода воздуха  $\alpha = 1,2$  нагрев сталь-

ных заготовок. Практическая температура горения, которая устанавливается в процессе эксплуатации печного агрегата при нагреве стальных заготовок составляет  $t_{пр} = 1350$  °С, что для рассматриваемых условий нагрева металла соответствует теоретической температуре горения, равной  $t_{\alpha}^r = 1588$  °С (пирометрический коэффициент  $\eta = 0,85$ ).

Сжигание доменного газа, теплота сгорания которого равна  $(Q_{н}^q)_{д.г.} = 3500$  кДж/м<sup>3</sup>, в атмосфере холодного воздуха при коэффициенте его расхода  $\alpha = 1,2$  не может обеспечить такой температурный потенциал, так как теоретическая температура горения в этих условиях оказывается равной  $t_{\alpha}^r = 1270$  °С, а практическая температура горения –  $t_{пр} = 1079$  °С при том же пирометрическом коэффициенте.

Для того, чтобы определить какое теплосодержание продуктов горения соответствует теоретической температуре горения, равной  $t_{\alpha}^r = 1588$  °С, при коэффициенте расхода воздуха  $\alpha = 1,2$ , необходимо располагать такими характеристиками процесса горения, как теоретический и практический расходы воздуха на горение  $L_0$ ,  $L_{\alpha}$ , теоретический и практический выход продуктов горения  $V_0$ ,  $V_{\alpha}$ . Решение этой задачи можно осуществить, используя приближенный метод расчета горения топлива.

1. В соответствии с данными табл.1.8 формулы для определения необходимых величин таковы:

$$L_0 = 0,001 \times 1_1 \times (Q_{н}^q)_{д.г.} = 0,001 \times 0,191 \times 3500 = 0,669 \text{ м}^3 / \text{м}^3;$$

$$\Delta V = 0,97 - 0,001 \times 0,031 \times (Q_{н}^q)_{д.г.} = 0,97 - 0,001 \times 0,031 \times 3500 = 0,861 \text{ м}^3 / \text{м}^3;$$

$$V_0 = L_0 + \Delta V = 0,669 + 0,861 = 1,53 \text{ м}^3 / \text{м}^3;$$

$$V_{\alpha} = L_{\alpha} + \Delta V = \alpha \times L_0 + \Delta V = 1,2 \times 0,669 + 0,861 = 1,664 \text{ м}^3 / \text{м}^3;$$

$$v_L = [(L_{\alpha} - L_0) / V_{\alpha}] \times 100 = [(0,803 - 0,669) / 1,664] \times 100 = 8,1\%.$$

Полученные данные позволяют, используя диаграмму рис. 2.3, определить теплосодержание продуктов горения при заданных теоретической температуре горения (1588°С) и коэффициенте расхода воздуха  $\alpha = 1,2$ . Последнее условие со-

ответствует  $v_L = 8,1\%$ . При этом алгоритм решения поставленной задачи определяется следующими этапами:

2. По диаграмме рис. 2.3 определяют общее теплосодержание  $1 \text{ м}^3$  продуктов горения –  $i_{\text{общ}}$ , соответствующее заданным условиям –  $t_{\alpha}^r = 1588^{\circ}\text{C}$  и  $v_L = 8,1\%$ . В итоге получают

$$i_{\text{общ}} = i_{\text{хим}} + i_{\text{возд}} = 2700 \text{ кДж/м}^3.$$

3. Определяют количество тепловой энергии, которая поступает в  $1 \text{ м}^3$  продуктов горения за счет сжигания доменного газа

$$i_{\text{хим}} = (Q_{\text{н}}^q)_{\text{д.г.}} / V_{\alpha} = 3500 / 1,664 = 2103 \text{ кДж/м}^3.$$

4. Определяют количество тепловой энергии, которую следует внести подогретым воздухом в  $1 \text{ м}^3$  продуктов горения –  $i_{\text{возд}}$ , чтобы обеспечить получение заданной температуры горения

$$i_{\text{возд}} = i_{\text{общ}} - i_{\text{хим}} = 2700 - 2103 = 597 \text{ кДж/м}^3.$$

5. Определяют теплосодержание воздуха –  $i_{\text{возд}}^*$ , подаваемого для сжигания  $1 \text{ м}^3$  доменного газа. Для этого следует воспользоваться формулой (2.49), преобразование которой позволяет получить

$$i_{\text{в}}^* \times V_{\alpha} / L_{\alpha} = 597 \times 1,664 / 0,803 = 1237 \text{ кДж/м}^3.$$

6. Определяют требуемую температуру подогрева воздуха –  $t_{\text{в}}$ , для чего используют данные, полученные на предыдущем этапе расчета, а именно:

$$i_{\text{в}}^* = 1 \times c_{\text{в}} \times t_{\text{в}} = 1237 \text{ кДж/м}^3.$$

Преобразуя это выражение относительно  $t_{\text{в}} = 1237/c_{\text{в}}$  и подбирая по табл.2.2 значения теплоемкости воздуха, можно, используя метод последовательного приближения, рассчитать величину  $t_{\text{в}}$ . Для рассматриваемого примера она оказалась равной  $880^{\circ}\text{C}$ .

Следовательно, при сжигании доменного газа с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1,2$  и необходимости получения заданной теоретической температуры горения ( $1588^\circ\text{C}$ ) следует обеспечить подогрев воздуха, используемого для горения, до  $880^\circ\text{C}$ .

Подобным образом могут быть решены и другие задачи по определению условий для обеспечения необходимых температур в рабочем пространстве печи, связанные с расчетом требуемого повышения теплоты сгорания топлива путем приготовления смесей, с расчетом температур подогрева газа, с расчетом обогащения воздуха кислородом и т.п. Основу методики таких расчетов составляет уравнение:

$$i_{\text{общ}}^T = i_{\text{хим}} + i_{\text{возд}} + i_{\text{топ}} = Q_H^P / V_{\alpha} + 1,0 \times c_T \times t_T / V_{\alpha} + L_{\alpha}^B \times c_B \times t_B / V_{\alpha}. \quad (1.48)$$

Проведение расчетного анализа в соответствии с возникающими задачами позволяет не только получать конкретные данные для разработки температурных и тепловых режимов работы печей, но и выполнять оценку эффективности мероприятий, влияющих на температуры горения, тепловой баланс рабочего пространства печи и всего печного агрегата в целом. В конечном итоге получаемые данные могут быть использованы в определении путей ресурсо- и энерго-сбережения.

### 3.6. Оценка влияния подогрева воздуха

#### на балансовую температуру горения

Выполнить аналитический расчет процесса горения топлива для оценки и сравнения влияния подогрева воздуха на балансовые температуры горения при сжигании природного, а также и доменного газа.

Составы газов (на сухой газ), %% :

	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	N <sub>2</sub>
природного	0,3	-	-	98,0	0,1	1,6
доменного	17,7	22,2	6,8	0,1	-	53,2

Влажность доменного газа составляет  $g_{H_2O}^{c.2} = 35 \text{ г/м}^3$ , а влажность воздуха при сжигании каждого газа одинакова и равна  $g_{H_2O}^{c.6} = 15 \text{ г/м}^3$ .

Оценку и сравнение результатов произвести при следующих условиях:

- 1) Температура подогрева газообразных топлив  $t_T = 0^\circ\text{C}$ ;
- 2) Оба газа сжигаются с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha = 1,1$ ;
- 3) Температуры подогрева воздуха равны:  $t_B = 0; 200; 400; 600; 800; 1000; 1200^\circ\text{C}$ .
- 4) Величина химического недожога равна  $0,02 Q_H^P$ .

Для выполнения поставленной задачи целесообразно воспользоваться приближенным методом расчета процесса горения проф. С.Г. Тройба.

1. При решении задачи этого примера первоначально следует определить рабочий (влажный) состав доменного газа. Для этого следует воспользоваться материалами п.1.2.1. В соответствии с формулой 1.1:

$$(H_2O^B)_{д.г.} = g_{H_2O}^{c.2} / (8,036 + 0,01 \times g_{H_2O}^{c.2}) = 35 / (8,036 + 0,01 \times 35) = 4,17 \%,$$

Пересчитать состав сухого доменного газа на рабочий (влажный) можно, если воспользоваться соотношением:

$$X_i^e = X_i (1 - 0,01 \times H_2O^B).$$

Не приводя всех деталей определения, в конечном итоге будет:

Рабочий состав влажного доменного газа, % :

$CO_2^e$	$CO^e$	$H_2^e$	$CH_4^e$	$C_2H_6^e$	$N_2^d$	$O_2^e$	$H_2O^e$
16,96	21,27	6,52	0,01	-	50,98	-	4,17

2. Вторым этапом расчета является определение теплоты сгорания каждого топлива.

Теплота сгорания природного газа

$$Q_H^P = 358 CH_4 + 636 C_2H_6 = 358 \times 98 + 636 \times 0,1 = 35148 \text{ кДж/м}^3.$$

Теплота сгорания доменного газа

$$Q_H^P = 127,7 \text{ CO}^B + 108 \text{ H}_2^e + 358 \text{ CH}_4 =$$

$$= 127,7 \times 21,27 + 108 \times 5,52 + 358 \times 0,1 = 3456 \text{ кДж/м}^3.$$

В соответствии с условиями задания расчет процесса горения топлива следует осуществить, используя приближенный метод С.Г. Тройба. Основная расчетная формула этого метода [см.п. 2.3, формулы (2.32) и (2.33)]:

$$L_0 = 0,001 \times l_1 \times Q_H^P + l_2 \times W^P - \Delta L \text{ м}^3 / \text{м}^3 ;$$

$$\Delta V = V_0 - L_0 = V\alpha - L\alpha = S_1 - 0,001 \times S_2 \times Q_H^P - 0,0124 \times (W^P - W_{\text{гр}}) \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Коэффициенты  $l_i$  и  $S_i$  следует принять по данным табл. 2.1.

	$l_1$	$l_2$	$\Delta L$	$S_1$	$S_2$	$W_{\text{гр}}$
Природный газ	0,264	0,0	0,05	1,0	0,0	$W^P$
Доменный газ	0,191	0,0	0,0	0,97	0,031	$W^P$

Тогда:

для природного газа

$$L_0 = 0,001 \times 0,264 \times Q_H^P + 0,0 \times W^P - 0,05 =$$

$$= 0,001 \times 0,264 \times 35148 + 0,0 \times W^P - 0,05 = 9,23 \text{ м}^3 / \text{м}^3 ;$$

$$\Delta V = 1,0 - 0,001 \times 0,0 \times Q_H^P - 0,0124 \times (W^P - W_{\text{гр}}) = 1,0 \text{ м}^3 / \text{м}^3 ;$$

$$L\alpha = \alpha L_0 = 1,1 \times 9,23 = 10,15 \text{ м}^3 / \text{м}^3 ;$$

$$V\alpha = L\alpha + \Delta V = 10,15 + 1,0 = 11,15 \text{ м}^3 / \text{м}^3 .$$

для доменного газа

$$L_0 = 0,001 \times 0,191 \times Q_H^P + 0,0 \times 4,17 - 0 =$$

$$= 0,001 \times 0,191 \times 3456 = 0,66 \text{ м}^3 / \text{м}^3 ;$$

$$\Delta V = 0,97 - 0,001 \times 0,031 \times Q_H^P - 0,0124 \times (4,17 - 4,17) =$$

$$= 0,97 - 0,001 \times 0,031 \times 3456 = 0,86 \text{ м}^3 / \text{м}^3 ;$$

$$L\alpha = \alpha L_0 = 1,1 \times 0,66 = 0,73 \text{ м}^3 / \text{м}^3 ;$$

$$V\alpha = L\alpha + \Delta V = 0,73 + 0,86 = 1,59 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

4. Для данного случая горения природного и доменного газов теплосодержание продуктов горения будет определяться не только химической энергией топлива с учетом химического недожога, но и физической теплотой, которая вносится подогретым воздухом. С учетом этого обстоятельства:

$$i_{\text{общ}}^{\delta} = i_x + i_B = [(Q_H^P - 0,02 \times Q_H^P) / V\alpha] + L\alpha \times c_B \times t_B / V\alpha, \text{ кДж} / \text{м}^3.$$

При  $\alpha=1,1$  в продуктах горения присутствует избыточный воздух. Его количество  $v_L$  рассчитывается в соответствии с выражением (2.51). Тогда для природного газа

$$v_L = (L\alpha - L_0) \times 100 / V\alpha = (10,15 - 9,23) \times 100 / 11,15 = 8,25 \%,$$

для доменного газа

$$v_L = (L\alpha - L_0) \times 100 / V\alpha = (0,73 - 0,66) \times 100 / 1,59 = 4,40 \%.$$

Таблица 3.2

Результаты определения балансовых температур

Топливо	Характеристики процесса горения	Температура воздуха, °С						
		0,0	200	400	600	800	1000	1200
Природный газ	$i_x, \text{ кДж} / \text{м}^3$	3089	3089	3089	3089	3089	3089	3089
	$i_B, \text{ кДж} / \text{м}^3$	-	239	485	738	1005	1275	1551
	$i_{\text{общ}}^{\delta}, \text{ кДж} / \text{м}^3$	3089	3328	3574	3827	4094	4364	4640
	$t_{\alpha}^{\delta}, \text{ °С}$	1830	1980	2100	2220	2350	2470	2570
Доменный газ	$i_x, \text{ кДж} / \text{м}^3$	2130	2130	2130	2130	2130	2130	2130
	$i_B, \text{ кДж} / \text{м}^3$	-	120	244	372	506	643	782
	$i_{\text{общ}}^{\delta}, \text{ кДж} / \text{м}^3$	2130	2250	2374	2502	2636	2773	2912
	$t_{\alpha}^{\delta}, \text{ °С}$	1270	1330	1415	1490	1560	1615	1690

5. По найденным значениям  $i_{\text{общ}}^{\delta}$  и  $v_L$  по  $it$ -диаграммам (рис. 2.1) и (рис. 2.3) следует определить балансовые температуры горения  $t_{\alpha}^{\delta}$  соответственно для природного и доменного газов. Результаты этих определений представлены в таблице 3.2 и на рис. 3.1.

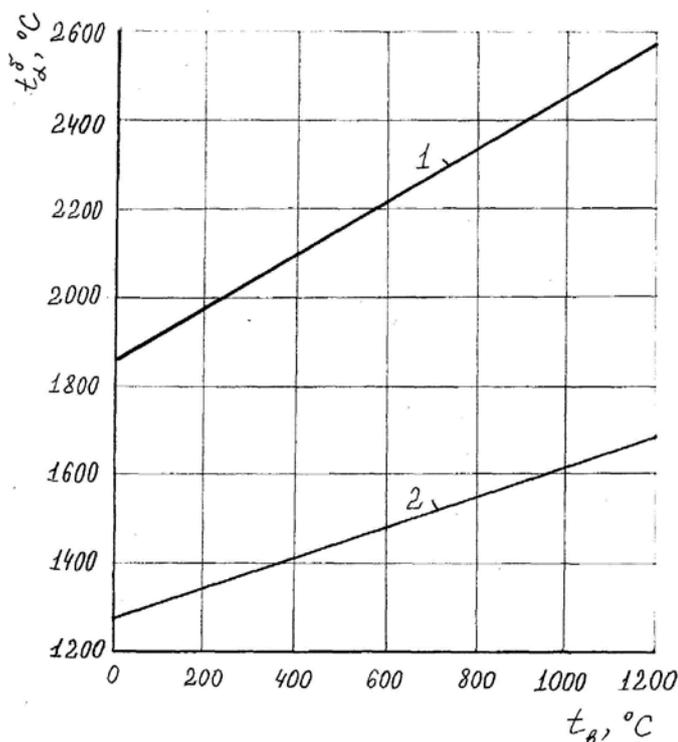


Рис. 3.1. Зависимость балансовой температуры горения  $t_{\alpha}^{\delta}$  от температуры подогрева воздуха  $t_b$ : 1 - для природного газа; 2 - для доменного газа.

Из анализа зависимостей изменения балансовых температур для природного и доменного газов следует:

1. Влияние подогрева воздуха проявляется при сжигании каждого из исследованных газов, причем рост балансовой температуры при увеличении температуры подогрева воздуха происходит с разной, но постоянной скоростью.

2. Более высокая скорость подъема балансовой температуры горения за счет подогрева воздуха при сжигании природного газа находит объяснение в различии расходов воздуха, необходимых для сжигания  $1 \text{ м}^3$  газа. При сжигании природно-

го газа  $L_0 = 9,23 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , а при сжигании доменного -  $L_0 = 0,66 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Различие между теоретическими расходами воздуха для горения природного и доменного газов почти в 14 раз и определяет более высокую скорость роста балансовой температуры горения при сжигании природного газа. Это следует из анализа выражения

$$i_{\text{общ}}^{\bar{}} = i_x + i_v = [(Q_H^P - 0,02 \times Q_H^P) / V\alpha] + L\alpha \times c_v \times t_v / V\alpha,$$

в котором изменение доли составляющей, определяемой уровнем подогрева воздуха (второе слагаемое), значительно выше для природного газа нежели для доменного.

### **3.7. Оценка влияния химического недожога на балансовую температуру горения**

Недожог топлива реально может возникать:

1. *При неудовлетворительном смешении газа и воздуха*, когда для сжигания  $1 \text{ м}^3$  газа поступает теоретически необходимое количество воздуха -  $L_0$  ( $\alpha = 1,0$ ), а при  $\alpha > 1,0$  - практически необходимое -  $L\alpha$ .

2. *При недостатке окислителя (воздуха)*, когда для сжигания  $1 \text{ м}^3$  газа поступает воздуха меньше теоретически необходимого количества -  $L_0$ . В этих условиях горение протекает при коэффициенте избытка воздуха менее единицы, т.е. при  $\alpha < 1$ .

Условия сжигания топлива, представленные этими двумя ситуациями требуют разного подхода к расчету выхода продуктов горения, объем которых и определяет температуры горения. В остальном методика расчета температур горения соответствует, приведенной выше.

*3.7.1. Оценка влияния недожога в условиях сжигания топлива при неудовлетворительном смешении его с воздухом.* В подобной ситуации выход продуктов горения при  $\alpha = 1$  будет представлять собой сумму:

- объема несгоревшей части топлива;

- объема продуктов горения, сформировавшихся за счет сгоревшей части топлива;

- объема воздуха, не использованного для горения топлива.

Выход продуктов горения при недожоге данного типа при  $\alpha > 1$  включает:

- объем несгоревшей части топлива;

- объем продуктов горения, сформировавшихся за счет сгоревшей части топлива;

- объем воздуха, не использованного для горения топлива при  $\alpha = 1$ ;

- объем избыточного воздуха, подаваемого при коэффициентах избытка воздуха более единицы, т.е. при  $\alpha > 1$ .

Если ввести обозначения:

$b_T$  - часть сгоревшего топлива, доли  $1 \text{ м}^3$  (1 кг);

$(1 - b_T)$  - часть несгоревшего топлива, доли  $1 \text{ м}^3$  (1 кг) топлива; а также часть воздуха, не использованного для окисления горючих компонентов топлива  $L_0$ , доли  $\text{м}^3 / \text{м}^3$  ( $1 \text{ м}^3 / \text{кг}$ ) топлива, то формулы для расчета  $V_\alpha$  с учетом недожога принимают вид:

для области горения  $\alpha = 1$

$$(V_{O_2})_1 = (1 - b_T) + b_T \times V_0 + (1 - b_T) \times L_0,$$

для области горения  $\alpha > 1$ :

$$V_\alpha = (1 - b_T) + b_T \times V_0 + (1 - b_T) \times L_0 + (\alpha - 1) \times L_0.$$

При известных величинах  $V_{O_2}$  и  $V_\alpha$  для определения теплосодержания  $1 \text{ м}^3$  продуктов горения следует использовать формулы (2.47 – 2.50), учитывая при этом условия горения топлива – температуры подогрева топлива и воздуха, величину недожога и пр.

Лучшей иллюстрацией изложенного, может служить следующий пример.

*Выполнить аналитический расчет процесса сжигания природного газа для оценки влияния на балансовые температуры горения химического недожога (не-*

полноты горения топлива), вызванного неудовлетворительным смешением воздуха и газа.

Данные для расчета.

Состав природного газа (на сухой газ), % % :

CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	N <sub>2</sub>
0,3	-	-	98,0	0,1	1,6

Оценку результатов произвести при следующих условиях:

1) температура подогрева природного газа  $t_T = 0^\circ\text{C}$ ;

2) температура подогрева воздуха равна:  $t_B = 0^\circ\text{C}$ .

3) величина химического недожога  $Q_3$  составляет в долях от величины  $Q_H^P$  :

при  $\alpha \leq 1,0$

0,5  $Q_H^P$  ( $\alpha = 0,5$ ); 0,4  $Q_H^P$  ( $\alpha = 0,6$ ); 0,3  $Q_H^P$  ( $\alpha = 0,7$ ); 0,2  $Q_H^P$  ( $\alpha = 0,8$ ); 0,1

$Q_H^P$  ( $\alpha = 0,9$ ); 0,05  $Q_H^P$  ( $\alpha = 0,95$ ); 0,03  $Q_H^P$  ( $\alpha = 1,0$ );

при  $\alpha > 1,0$

0,02  $Q_H^P$  ( $\alpha = 1,1$ ) и 0,01  $Q_H^P$  ( $\alpha = 1,2$ ).

1. Первым этапом расчета является определение теплоты сгорания природного газа, для чего применима формула (1.8), которая для заданного состава природного газа упрощается:

$$Q_H^P = 358 \text{ CH}_4 + 636 \text{ C}_2\text{H}_6 = 358 \cdot 98 + 636 \cdot 0,1 = 35148 \text{ кДж/м}^3.$$

2. Вторым этапом расчета является определение объема продуктов горения. В условиях заданного примера (недожог топлива при  $\alpha \leq 1,0$  обусловлен плохим перемешиванием топлива с воздухом) формула для расчета объема продуктов горения была получена выше, а именно:

для области горения  $\alpha \leq 1$ :

$$V_{Q_3} = (1 - b_T) + b_T \times V_0 + (1 - b_T) \times L_0 ;$$

для области горения  $\alpha > 1$ :

$$V_{Q_3} = (1 - b_T) + b_T \times V_0 + (1 - b_T) \times L_0 + (\alpha - 1) \times L_0.$$

Для выполнения поставленной задачи целесообразно воспользоваться приближенным методом расчета процесса горения проф. С.Г. Тройба. В соответствии с этим методом основные расчетные формулы для определения параметров горения  $L_0$  и  $\Delta V$  [см.п. 2.3, формулы (2.32) и (2.33)] таковы:

$$L_0 = 0,001 \times l_1 \times Q_H^P + l_2 \times W^P - \Delta L \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

$$\Delta V = V_0 - L_0 = V\alpha - L\alpha = S_1 - 0,001 \times S_2 \times Q_H^P - 0,0124 \times (W^P - W_{гр}) \text{ м}^3 / \text{м}^3$$

Коэффициенты  $l_i$  и  $S_i$  принимают для природного газа по данным табл. 2.1.

$l_1$	$l_2$	$\Delta L$	$S_1$	$S_2$	$W_{гр}$
0,264	0,0	0,05	1,0	0,0	$W^P$

Тогда для условий примера

$$\begin{aligned} L_0 &= 0,001 \times 0,264 \times Q_H^P + 0,0 \times W^P - 0,05 = \\ &= 0,001 \times 0,264 \times 35\,148 + 0,0 \times W^P - 0,05 = 9,23 \text{ м}^3 / \text{м}^3 ; \end{aligned}$$

$$\Delta V = 1,0 - 0,001 \times 0,0 \times Q_H^P - 0,0124 \times (W^P - W_{гр}) = 1,0 \text{ м}^3 / \text{м}^3 ;$$

$$V_0 = L_0 + \Delta V = 9,23 + 1,0 = 10,23 \text{ м}^3 / \text{м}^3 ;$$

В качестве иллюстрации приведем расчет для условий недожога  $0,5 Q_H^P$ . Для этого и других вариантов расчета целесообразно связать характеристики недожога с частями несгоревшего топлива. Такая связь представлена в табл.3.3.

Таким образом, для области горения  $\alpha < 1$ :

$$\begin{aligned} V_{Q_3=0,5} &= (1 - b_T) + b_T \times V_0 + (1 - b_T) \times L_0 = \\ &= (1 - 0,5) + 0,5 \times 10,23 + (1 - 0,5) \times 9,23 = 10,23 \text{ м}^3 / \text{м}^3 \end{aligned}$$

Найденные таким образом значения расхода воздуха и выхода продуктов горения в зависимости от других величин коэффициента избытка воздуха сведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Результаты расчетов процесса горения природного газа при различных значениях коэффициента избытка воздуха

Характеристика процесса горения	Величина недожога топлива, $Q_3$ , доли $Q_n^p$								
	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01
$b_T$ , доли	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,97	0,98	0,99
$(1 - b_T)$	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01
$\alpha = L\alpha / L_0$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2
$b_T \times V_0, \text{м}^3/\text{м}^3$	5,11	6,14	7,16	8,18	9,21	9,72	9,92	11,00	11,12
$(1 - b_T) \times L_0, \text{м}^3/\text{м}^3$	4,62	3,69	2,77	1,85	0,92	0,46	0,28		
$(\alpha - 1) \times L_0, \text{м}^3/\text{м}^3$								0,92	1,85
$(V_{Q_3})_1, \text{м}^3/\text{м}^3$	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23	10,23		
$V_\alpha, \text{м}^3/\text{м}^3$								11,94	12,98
$Q_n^p, \text{кДж}/\text{м}^3$	35 148								
$Q_n^p - Q_3, \text{кДж}/\text{м}^3$	17574	21089	24604	28118	31633	33391	34094	34445	34797
$i_{общ}^{\delta}, \text{кДж}/\text{м}^3$	1718	2061	2405	2749	3092	3264	3333	2885	2681
$v_L$	-	-	-	-	-	-	-	8,25	15,3
$t_\alpha^{\delta}, ^\circ\text{C}$	1150	1250	1450	1640	1820	1920	1950	1730	1620

3. Теплосодержание продуктов горения в общем случае представляет собой сумму трех слагаемых: первое определяется химической энергией топлива с учетом величины его химического недожога, второе - физической теплотой, вносимой подогретым топливом, и третье слагаемое отражает физическую теплоту, которая вносится в процесс горения подогретым воздухом, т.е.

$$i_{общ}^{\delta} = i_x + i_m + i_v = [(Q_n^p - Q_3) / V_\alpha] + c_m \times t_m / V_\alpha + (L\alpha \times c_v \times t_v / V_\alpha), \text{кДж} / \text{м}^3.$$

Если топливо и воздух подают в топку холодными, то в этом случае ограничиваются лишь первым слагаемым этой формулы.

Для химического недожога, достигающего 50%, расчет по этому выражению даёт:

$$i_{общ}^{\delta} = [(35148 - 0,5 \times 35148) / 10,23 = 1718 \text{ кДж} / \text{м}^3.$$

Результаты расчетов при других значениях химического недожога представлены в той же табл.3.3.

4. По рассчитанным значениям  $i_{общ}^{\delta}$  и  $v_L$ , используя  $it$ -диаграмму (рис. 2.1) определяют балансовые температуры горения  $t_{\alpha}^{\delta}$ . Их значения занесены в табл. 3.3. Зависимость балансовой температуры горения от величины химического недожога топлива  $Q_3$  представлена на рис. 3.2.

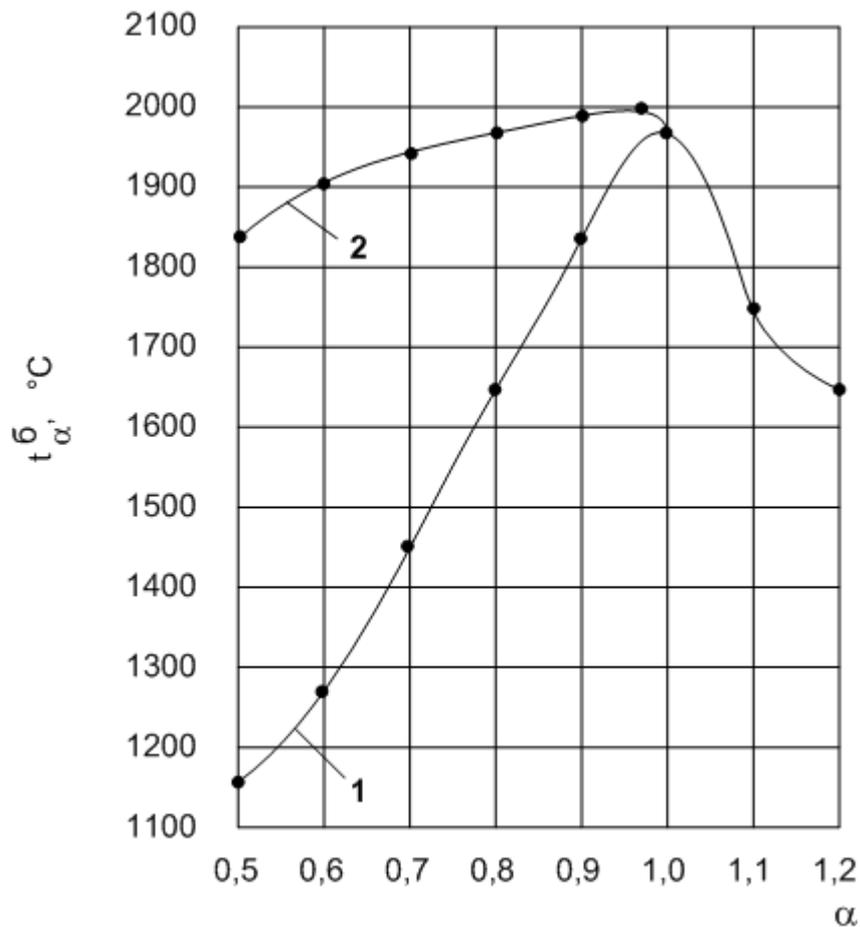


Рис. 3.2. Зависимость балансовой температуры горения  $t_{\alpha}^{\delta}$  от величины коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ :  
 1 – при неудовлетворительном смешении;  
 2 – при недостатке воздуха.

3.7.2. Оценка влияния недожога в условиях сжигания топлива при недостатке воздуха. Подобная ситуация возникает при сжигании топлива при  $\alpha < 1$ . Объем продуктов горения для этих условий представляет собой сумму:

- объема несгоревшей части топлива;
- объема продуктов горения, сформировавшихся за счет сгоревшей части топлива.

Если принять обозначения, введенные в п. 3.7.1, то в этом случае формула для определения объема продуктов горения принимает вид:

$$(V_{Q_3})_2 = (1 - b_T) + b_T \times V_0.$$

Из сравнения выражений для определения объема продуктов горения при различных типах недожога следует различие в уровне балансовых температур горения. Такой вывод подкрепляет приводимый ниже пример.

*Выполнить аналитический расчет процесса сжигания природного газа для оценки влияния на балансовые температуры горения химического недожога (неполноты горения топлива), вызванного недостатком воздуха.*

Данные для расчета соответствуют данным примера 3.7.1. Целесообразность такого выбора данных с одной стороны позволит сравнить результаты примеров между собой и, таким образом, оценить значимость влияния различных видов недожога на балансовые температуры горения, и с другой – воспользоваться результатами расчета предыдущего примера. Результаты расчета и определения температур горения представлены в табл.3.4.

Анализ полученных данных позволяет заключить:

1. По мере уменьшения химического недожога происходит более полное окисление горючих компонентов природного газа (растет  $i_x = [(Q_n^p - Q_3) / V_\alpha]$ , в результате чего балансовая температура увеличивается и при наименьшей величине недожога (при  $\alpha = 1,0$ ) достигает максимума.

2. Влияние недожога вследствие недостатка воздуха на балансовые температуры горения проявляется в двух направлениях: первое – существенно повышается уровень температур из-за меньшего выхода продуктов горения и второе – градиент изменения температур в области коэффициентов избытка воздуха в пре-

делах  $0,5 < \alpha < 1,0$  значительно меньше, чем для случая недожога, обусловленного неудовлетворительным смешением топлива с воздухом.

Таблица 3.4

Результаты расчетов процесса горения природного газа при различных значениях коэффициента избытка воздуха

Характеристика процесса горения	Величина недожога топлива, $Q_3$ , доли $Q_n^p$								
	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01
$b_T$ , доли	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,97	0,98	0,99
$(1 - b_T)$	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01
$\alpha = L\alpha / L_0$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	0,97	1,1	1,2
$b_T \times V_0, \text{м}^3/\text{м}^3$	5,11	6,14	7,16	8,18	9,21	9,72	9,92	11,00	11,12
$(\alpha - 1) \times L_0, \text{м}^3/\text{м}^3$								0,92	1,85
$(V_{Q_3})_2, \text{м}^3/\text{м}^3$	5,61	6,54	7,46	8,38	9,31	9,77	9,95		
$V\alpha, \text{м}^3/\text{м}^3$								11,94	12,98
$Q_n^p, \text{кДж}/\text{м}^3$	35 148								
$Q_n^p - Q_3, \text{кДж}/\text{м}^3$	17574	21089	24604	28118	31633	33391	34094	34445	34797
$i_{\text{общ}}^{\delta}, \text{кДж}/\text{м}^3$	3133	3225	3298	3355	3398	3418	3427	2885	2681
$v_L$	-	-	-	-	-	-	-	8,25	15,3
$t_{\alpha}^{\delta}, ^\circ\text{C}$	1825	1900	1925	1950	1975	1990	2000	1730	1620

3. С увеличением коэффициента избытка воздуха выше теоретически необходимого, т.е. при  $\alpha > 1,0$  недожог формируется исключительно вследствие неудовлетворительного смешения окислителя (воздуха) с топливом, при этом общее теплосодержание продуктов горения -  $i_{\text{общ}}^{\delta}$ , неуклонно снижется, главным образом, из-за увеличения  $V_{\alpha}$  - выхода продуктов горения.

### Библиографический список

1 Теплотехника металлургического производства: учеб. пособие: Т.1. Теоретические основы/под ред. В.А. Кривандина – М.: МИСиС, 2002, - 608 с.

2. Теплотехнические расчеты металлургических печей. Учебное пособие. Изд. 3-е /Я.М. Гордон, Б.Ф. Зобнин, М.Д. Казяев [и др.], под ред. А.С. Телегина. М.: Металлургия, 1993. 368 с.

3. Теория и практика теплогенерации. Учебник. Изд.2-е, перераб. и доп. [Текст]/ С.Н.Гуцин, М.Д. Казяев, Ю.В. Крюченков [и др.] под ред. В.И. Лобанова и С.Н. Гуцина. Екатеринбург: УГТУ, 2005. 379 с.

4. Гуцин С.Н. Теоретические основы энерготехнологических процессов цветной металлургии: учебник/С.Н.Гуцин, Н.Г. Агеев, Ю.В. Крюченков, под ред. Ю.Г.Ярошенко.Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2000. 312 с.

5. Гуцин С.Н. Расчеты горения топлив. Учебное пособие / С.Н. Гуцин, М.Д. Казяев. Екатеринбург: УМЦ УПИ, 2001. 48 с.

## Приложение 1

Давление водяного пара и влагосодержание газа при состоянии насыщения  
в интервале температур -25 до + 100<sup>0</sup>С и давлении смеси 760 мм рт.ст.

Температура, °С	Влагосодержание при полном насыщении		Парциальное давление пара в смеси при 760 мм рт.ст. Р <sub>в.п.н</sub>
	На 1 м <sup>3</sup> сухого газа (при 0 <sup>0</sup> С и 760 мм рт.ст.) г <sup>с.з.</sup> H <sub>2</sub> O <sub>н</sub>	На 1 м <sup>3</sup> влажного газа (при 0 <sup>0</sup> С и 760 мм рт.ст.) г <sup>с.з.</sup> H <sub>2</sub> O <sub>н</sub>	
-20	0,81	0,81	0,77
-10	2,1	2,1	1,95
±0	4,8	4,8	4,58
+10	9,8	9,7	9,2
20	18,9	18,5	17,5
30	35,1	33,6	31,8
40	63,1	58,5	55,3
50	111,4	97,9	92,6
60	196	158	149,4
70	361	249	233,7
80	716	379	355,1
90	1877	563	525,8
100	-	816	760,0

**Домашняя работа по разделу «Топливо и расчеты его горения»**

**Внимание!**

*Исходные данные для выполнения задания выдаются преподавателем.*

**Домашнее задание № 1**

*(Для студентов всех специальностей по направлению «Металлургия»)*

Для топлива, состав которого соответствует заданию, выполнить расчет процесса полного горения топлива аналитическим и приближенным методами, а также определить теоретические  $(t_o^m, t_\alpha^m)$  и балансовые  $(t_o^b, t_\alpha^b)$  температуры горения при следующих условиях:

а) коэффициент расхода воздуха  $\alpha=1,0$  и температуры подогрева топлива и воздуха равны нулю;

б) коэффициент расхода воздуха  $\alpha=\alpha_{зад}$  и температуры подогрева топлива и воздуха равны нулю;

в) коэффициент расхода воздуха  $\alpha=1,0$  а температуры подогрева топлива: для газа  $t_\Gamma = t_{\Gamma. зад}$ ; для мазута  $t_\Gamma = 100^0\text{C}$ . Температура подогрева воздуха  $t_B = t_{B. зад}$ ;

г) коэффициент расхода воздуха  $\alpha=\alpha_{зад}$ , а температуры подогрева топлива: для газа  $t_\Gamma = t_{\Gamma. зад}$  ; для мазута  $t_\Gamma = 100^0\text{C}$ . Температура подогрева воздуха  $t_B = t_{B. зад}$ .

В расчетах принять содержание влаги в топливе: для газа  $g_{H_2O}^{c.з.} = (g_{H_2O}^{c.з.})_{зад}$ , для мазута  $W^P = (W^P)_{зад}$  и в воздухе  $g_{H_2O}^{c.в.} = (g_{H_2O}^{c.в.})_{зад}$ .

При расчете характеристик горения мазута учесть, что распыление мазута осуществляется паром, расход которого на 100 кг мазута составляет  $M_{пар}$ , что соответствует  $W_{расп.} = M_{пар} \%$ . Величина  $W_{расп.}$  приводится в задании.

При определении теоретических температур потери теплоты на диссоциацию учтены при построении  $it$  – диаграмм. Определение балансовых температур горения производить при условии, что все виды недожога составляют величину, равную 1,0 %, т.е.  $(Q_3 + Q_4) = 0,01 Q_H^P$ .

При расчете заданий получаемые цифровые значения топливных характеристик ограничивают второй значащей цифрой после запятой.

Результаты расчета представить в виде следующей таблицы.

Таблица

Результаты расчета процесса горения топлива

№ п.п.	Характеристики процесса горения	Размер- ность	Аналитиче- ский метод		Приближен- ный метод		Погреш- ность, %
			$\alpha=1,$ 0	$\alpha=\alpha_{зад}$	$\alpha=1,0$	$\alpha=\alpha_{зад}$	
1.	Расход: кислорода - $V_{O_2}^{тон}$ воздуха: сухого - $L_o^{св}$ и $L_\alpha^{св}$ : влажного - $L_o^{св.в}$ и $L_\alpha^{св.в}$ :	$O_2$ м <sup>3</sup> /ед.топл.  м <sup>3</sup> /ед.топл.  м <sup>3</sup> /ед.топл.					
2.	Выход продук- тов горения	м <sup>3</sup> прод. гор./ ед.топл.					
3.	Состав продук- тов горения						

	CO <sub>2</sub> SO <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O N <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Σ	% % % % % 100 %					
4.	Температуры горения: при $t_T = t_B = 0$ : : теоретическая – $t_0^m$ балансовая – $t_0^{\delta}$ при $t_T = t_{T, \text{зад}}$ и $t_B = t_{B, \text{зад}}$ теоретическая $t_{\alpha}^m$ балансовая – $t_{\alpha}^{\delta}$	°C					

## Домашнее задание № 2

*(Для студентов, обучающихся по направлению «Металлургия»  
специальности «Теплофизика, автоматизация и экология промышленных печей»)*

1. Выполнить аналитический расчет процесса горения топлива для оценки и сравнения влияния подогрева воздуха на балансовые температуры горения при сжигании газа состава, соответствующего заданию. Влажность воздуха при сжигании газа следует принять равной  $g_{H_2O}^{c.6} = 15 \text{ г/м}^3$ .

Для выполнения поставленной задачи целесообразно воспользоваться приближенным методом расчета процесса горения проф. С.Г. Тройба.

Результаты расчета оформить в виде таблицы и графика  $t_{\alpha}^{\delta} = f(t_B)$ .

2. Выполнить расчет процесса горения топлива для оценки влияния химического недожога (неполноты горения топлива) на балансовую температуру горения при сжигании газа, состав которого задается преподавателем. Влажность воздуха равна  $g_{H_2O}^{c.б} = 15 \text{ г/м}^3$ .

Оценку результатов произвести при следующих условиях:

1) температура подогрева природного газа  $t_T = 0^\circ\text{C}$ ;

2) температура подогрева воздуха  $t_B = 0^\circ\text{C}$ ;

3) величина химического недожога  $Q_3$  составляет от величины  $Q_H^P$ : 50%, ( $\alpha=0,5$ ); 40%, ( $\alpha=0,6$ ); 30%, ( $\alpha=0,7$ ); 20%, ( $\alpha=0,8$ ); 10%, ( $\alpha=0,9$ ); 5%, ( $\alpha=0,95$ ); 0%, ( $\alpha=1,0$ ) или соответственно в долях  $0,5 Q_H^P$ ;  $0,4 Q_H^P$ ;  $0,3 Q_H^P$ ;  $0,2 Q_H^P$ ;  $0,1 Q_H^P$ ;  $0,05 Q_H^P$ ;  $0,03 Q_H^P$ ; для  $\alpha = 1,05$ ,  $\alpha = 1,1$  и  $\alpha = 1,2$  эта величина равна соответственно  $0,025 Q_H^P$ ,  $0,02 Q_H^P$ ,  $0,01 Q_H^P$ .

Для выполнения поставленной задачи целесообразно воспользоваться приближенным методом расчета процесса горения проф. С.Г. Тройба.

Результаты расчета оформить в виде таблицы и графика  $t_{\alpha}^{\circ} = f(Q_3)$  или  $t_{\alpha}^{\circ} = f(\alpha)$ .

## Приложение 3

### Варианты домашнего задания по расчету горения топлива.

#### 1. Твердые и жидкие виды топлива

##### Химический состав топлива и условия его сжигания

№ варианта	Содержание элементов, масс. %							$\alpha$	$t_T, ^\circ\text{C}$	$t_B, ^\circ\text{C}$	$g_{H_2O}^{c.в.}, \text{г/м}^3$
	C <sup>P</sup>	H <sup>P</sup>	O <sup>P</sup>	N <sup>P</sup>	S <sup>P</sup>	A <sup>P</sup>	W <sup>P</sup>				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Торф</b>											
1	49,1	6,1	6,5	0,8	0,1	6,2	31,2	1,50	-	235	15,1
2	50,4	5,9	6,8	0,9	0,1	3,9	32,0	1,45	-	245	15,5
3	49,7	6,0	5,3	0,7	0,1	8,1	30,1	1,47	-	225	14,2
4	48,9	5,8	5,5	0,6	0,1	7,9	31,2	1,48	-	230	13,8
5	51,0	5,7	5,6	0,8	0,1	8,2	28,6	1,51	-	240	14,5
<b>Каменный уголь</b>											
6	79,3	5,2	1,0	0,8	0,5	8,6	4,6	1,50	-	210	13,3
7	83,9	3,8	0,9	1,2	0,8	5,6	3,8	1,47	-	220	14,4
8	81,7	4,1	1,2	1,1	0,7	7,7	3,5	1,49	-	215	15,8
9	79,8	5,0	0,8	1,3	0,6	8,4	4,1	1,45	-	225	13,8
10	83,2	4,5	1,3	1,0	0,5	6,7	2,8	1,52	-	205	12,9
<b>Кокс</b>											
11	91,8	1,3	1,1	1,3	1,1	0,4	3,0	1,46	-	240	15,2
12	93,7	1,2	0,8	1,3	1,0	0,5	1,5	1,48	-	220	13,9
13	93,6	1,0	0,9	1,1	0,7	0,3	2,4	1,52	-	215	16,0
14	90,5	1,4	1,3	1,2	0,8	0,5	4,3	1,45	-	250	14,8
15	92,4	0,7	0,9	1,1	0,7	0,4	3,8	1,50	-	235	15,3
<b>Мазут</b>											
16	85,1	9,9	0,2	0,5	0,3	0,1	3,9	1,25	98	280	13,0

17	88,0	8,5	0,4	0,3	0,5	0,3	2,0	1,30	95	290	14,0
18	84,7	10,6	0,5	0,4	0,7	0,2	2,9	1,38	100	295	15,1
19	86,2	9,7	0,3	0,5	0,4	0,1	2,8	1,26	90	300	14,7
20	87,0	8,6	0,2	0,3	0,6	0,3	3,0	1,37	100	280	13,2

21	84,6	10,7	0,4	0,4	0,3	0,2	3,4	1,34	95	285	13,9
22	87,6	8,3	0,5	0,4	0,5	0,1	2,6	1,27	98	295	15,3
23	86,9	9,2	0,3	0,3	0,7	0,3	2,3	1,32	97	290	15,4
24	85,5	10,3	0,2	0,4	0,5	0,2	2,9	1,29	100	280	13,4
25	87,9	8,0	0,4	0,5	0,6	0,1	2,5	1,36	96	285	14,2

## 2.Газообразные виды топлива

### Химический состав топлива и условия его сжигания

№ ва- ри- ан- та	Содержание об., %							$\alpha$	$t_T, ^\circ\text{C}$	$t_B, ^\circ\text{C}$	$g_{H_2O}^{с.в.}$ Г/М <sup>3</sup>	$g_{H_2O}^{сж}$ Г/М <sup>3</sup>
	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>					
<b>Доменный газ</b>												
26	9,2	26,8	1,5	0,2	-		62,3	1,10	300	300	35	14
27	10,1	27,7	1,2	0,3	-		60,7	1,20	250	270	20	15
28	11,3	28,4	1,1	0,4	-		58,8	1,15	260	280	25	13
29	12,5	29,3	1,4	0,2	-		56,6	1,16	270	290	27	12
30	9,7	27,9	1,3	0,5	-		60,6	1,11	280	300	30	16
31	10,2	28,5	2,0	0,1	-		59,2	1,12	240	310	28	17
32	10,7	27,8	2,5	0,2	-		58,8	1,05	230	320	32	11
33	10,8	26,9	2,4	0,3	-		59,6	1,06	220	290	31	10
34	10,5	27,3	2,3	0,1	-		59,8	1,07	210	280	29	13
35	10,6	28,4	2,1	0,2	-		58,7	1,12	230	250	30	14
<b>Мазут</b>												
36	2,1	6,5	57,0	26,0	2,2	0,6	5,6	1,10	250	300	25	13

37	2,3	7,0	58,0	25,3	2,1	0,5	4,8	1,15	260	290	20	14
38	2,4	6,8	59,4	26,3	2,3	0,4	2,4	1,05	270	280	22	15
39	2,2	6,9	60,0	25,5	2,4	0,3	2,7	1,06	280	270	23	16
40	2,5	6,7	59,	25,8	2,3	0,5	2,4	1,11	285	310	24	18
41	2,3	6,6	58,9	26,2	2,5	0,3	3,2	1,10	300	280	26	13
42	2,6	6,5	59,4	25,9	2,4	0,6	2,6	1,12	290	265	30	12
43	2,7	6,4	60,1	25,8	2,6	0,7	1,7	1,20	300	250	25	14
44	2,4	6,7	59,5	26,4	2,5	0,6	1,9	1,15	250	300	24	15
45	2,5	6,8	58,9	25,9	2,4	0,7	2,8	1,05	260	320	23	13

	Содержание об., %								$\alpha$	$t_T, ^\circ\text{C}$	$t_B, ^\circ\text{C}$	$g_{H_2O}^{c.6.}$
	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	N <sub>2</sub>				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>Природный газ</b>												
46	-	1,8	96,4	1,5	0,1	0,1	0,1	-	1,20	200	200	15
47	-	0,2	90,0	4,5	0,9	0,3	1,1	3,0	1,15	20	300	14
48	-	0,5	92,6	0,4	0,3	0,2	0,1	5,9	1,10	25	350	13
49	-	1,1	94,6	0,5	0,3	0,2	-	3,3	1,05	150	230	12
50	-	0,2	91,5	3,3	1,4	-	1,6	2,0	1,20	30	240	14
51	-	0,1	85,0	3,3	1,2	0,5	-	9,9	1,30	100	340	13
52	-	0,8	78,3	6,4	1,7	-	-	12,8	1,10	140	320	15
53	-	-	90,9	5,2	1,3	0,2	1,5	0,9	1,20	200	300	12
54	0,6	0,8	75,4	5,0	1,7	1,3	1,2	14,0	1,25	160	270	13
55	0,4	0,5	71,9	4,8	1,6	0,8	-	20,0	1,05	150	300	14
56	0,5	0,3	75,2	5,0	1,2	0,8	-	17,0	1,15	170	280	15
57	0,1	0,9	82,7	1,4	0,6	0,3	-	14,0	1,20	180	290	16
58	0,1	0,1	80,2	5,5	1,7	1,2	0,2	11,0	1,05	250	350	14
59	-	0,1	98,0	0,4	0,2	-	-	1,3	1,10	200	150	13
60	-	0,1	93,5	4,0	1,0	0,5	0,5	0,4	1,15	210	320	12

Учебное пособие

Сергей Николаевич Гущин  
Лик Анварович Зайнуллин  
Михаил Дмитриевич Казяев  
Борис Петрович Юрьев  
Юрий Гаврилович Ярошенко

## Топливо и расчеты его горения

Редактор издательства –  
Технический редактор –  
Корректор  
ИД № xxxxx от xx.xx. 2007 г.

---

Подписано в печать xx.xx.2007 г.      Формат  
Бумага типографская.      Печать офсетная  
Усл. печ.л. xxx. Уч.изд. л. Xxx.      Тираж xxx экз.      Заказ xxx  
Цена «С»

Редакционно-издательский отдел ГОУ ВПО «УГТУ - УПИ»  
62002, Екатеринбург, ул. Мира, 17

Типография «Уральский центр академического обслуживания»  
620219, Екатеринбург, ул. Первомайская, 91