

В. А. УЛЬЯНОВ, В. Н. ГУЩИН, Е. А. ЧЕРНЫШОВ

НАГРЕВ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Рекомендовано

*Учебно-методическим объединением по образованию в области металлургии
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению «Металлургия»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2010

УДК 621.783(075.8)
ББК 34.651я73
У517

Рецензенты:

профессор кафедры «Теплофизика и экология металлургического производства» Московского государственного института стали и сплавов (Технологический университет), д-р техн. наук *Ю. П. Филимонов*;
профессор кафедры «Машины и технологии литейного производства» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, д-р техн. наук *В. В. Иванов*

Ульянов В. А.

У517 Нагрев и нагревательные устройства : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / В. А. Ульянов, В. Н. Гушин, Е. А. Чернышов. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 256 с.

ISBN 978-5-7695-4975-5

Приведены основные характеристики различных видов топлива, рассмотрены теория горения топлива, механика газов в печи. Изложены основы теории теплообмена, нагрева и тепловой работы печей. Приведены конструкции различных видов печей и нагревательных устройств. Описаны приборы для контроля и регулирования технологических процессов. Для студентов высших учебных заведений.

УДК 621.783(075.8)
ББК 34.651я73

Оригинал-макет данного издания является собственностью Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом без согласия правообладателя запрещается

© Ульянов В. А., Гушин В. Н., Чернышов Е. А., 2010
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2010
ISBN 978-5-7695-4975-5 © Оформление. Издательский центр «Академия», 2010

*100-летию со дня рождения
одного из крупнейших ученых в области печной теплотехники,
основателя кафедры «Металлургические и нагревательные печи»
Нижегородского государственного технического университета,
Заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации,
профессора Скворцова Алексея Анатольевича посвящается*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Нагрев заготовок является неотъемлемой частью многих технологических процессов, например в машиностроении при обработке металлов давлением, прокатке и термообработке. От правильной организации нагрева зависит достижение заданной производительности нагревательных устройств и получение продукции высокого качества. Этим обуславливается необходимость изучения печной теплотехники (теорий горения топлива и теплообмена, механики газов), тепловой работы печей и конструкций различных видов печей и нагревательных устройств.

По виду используемого энергоносителя печи и нагревательные устройства подразделяют на пламенные и электрические.

Работа пламенных печей складывается из следующих основных процессов: превращения химической энергии топлива в тепловую; движения горячих газов; нагрева заготовок в соответствии с закономерностями теплообмена.

В разработке основных положений печной теплотехники выдающаяся роль принадлежит отечественным ученым: А. Д. Свенчанскому, Д. В. Будрину, М. А. Глинкову, В. И. Иванцову, В. Т. Лисиенко, В. А. Кривандину, В. Ф. Копытову, М. А. Кузьмину, Ю. А. Розенгарту, И. Д. Семикину, Н. Ю. Тайцу, А. А. Скворцову, В. Г. Володину, С. Н. Тельману и многим другим.

Использование электрической энергии для нагрева заготовок под пластическую и термическую обработку было впервые предложено В. В. Петровым в 1807 г. Во второй половине XIX в. после открытия Э. Х. Ленцем и Дж. П. Джоулем закона, характеризующего тепловое действие электрического тока, и разработки М. Фарадеем и Дж. К. Максвеллом основ теории электромагнитного поля и индукции стали использовать электрическую энергию для нагрева металла.

Использование электрического нагрева в печах имеет ряд преимуществ перед пламенным нагревом: это экологические аспекты, значительное упрощение автоматизации процесса нагрева, большие возможности защиты металлов от окисления и обезуглероживания и др. В настоящее время широко применяют разнообразные электрические печи и нагревательные устройства (в частности, печи сопротивления, установки прямого и индукционного нагрева), а также новые способы нагрева: плазменный, электронно-лучевой и лазерный.

При нагреве заготовок из металла, в первую очередь из стали, до высоких температур (как в пламенных, так и в электрических печах) происходят окисление и обезуглероживание поверхности заготовки, сопровождающиеся потерей металла от угара. Для защиты от этих явлений разработан ряд способов безокислительного и обезуглероживающего нагрева: нагрев в защитных контролируемых атмосферах, в дымовых газах в отсутствие кислорода, в расплавах стекла, солей, легкоплавких металлов, в вакууме и т. д.

Повышение эффективности пламенных и электрических печей и нагревательных устройств связано с технологическими и экономическими факторами (производительностью, расходом топлива и электроэнергии, качеством готовой продукции, близостью электро- и топливопроизводящих предприятий), которые создают основные предпосылки для снижения себестоимости нагрева.

Увеличение производительности связано с четкой организацией рабочего процесса, сокращением простоев и полной загрузкой оборудования. Особое значение при этом приобретает комплексная механизация трудоемких процессов — загрузка, выгрузка, продвижение заготовок в печи и др. При использовании печей всех типов необходимо стремиться к всемерному сокращению потерь теплоты в окружающее пространство и на аккумуляцию ограждениями рабочей камеры. Отходящие дымовые газы и химическая неполнота сгорания топлива обуславливают большие потери теплоты в пламенных печах.

Предлагаемое учебное пособие написано на основе курса лекций, читаемого на кафедре «Теплофизика, автоматизация и экология печей» Нижегородского государственного технического университета.

Основная цель учебного пособия — дать студентам комплекс сведений, необходимых для выполнения курсовых и дипломных проектов по печам и нагревательным устройствам, используемым при термообработке и перед пластической обработкой заготовок и изделий.

1.1. Классификация и характеристики топлива

Топливо — горючее вещество, при сгорании которого выделяется значительное количество теплоты, используемой в качестве источника энергии.

Превращение химической энергии топлива в тепловую происходит в процессе окисления горючих составляющих топлива кислородом воздуха. Этот процесс называется *горением*.

К топливу предъявляют следующие основные требования [23, 24]:

- выделение достаточно большого количества теплоты при горении;
- большие запасы в природе, обеспечивающие рациональную и дешевую его добычу и использование;
- газообразность продуктов горения;
- безвредность их для технологического оборудования и обслуживающего персонала.

Общая классификация топлива, основанная на агрегатном состоянии и происхождении, приведена в табл. 1.1.

Основными характеристиками топлива являются его химический состав, теплота сгорания и температура горения [27, 33].

Химический состав топлива определяет его теплотворные свойства. Основными горючими составляющими топлива являются углерод и водород, выделяющие при окислении большое количество тепла. Они входят в состав топлива обычно в виде соединений с другими элементами, только водород в составе газообразного топлива может быть в молекулярном виде. Кроме углерода и водорода в состав горючей части топлива входят кислород, азот и сера.

Кислород в топливе является нежелательным элементом, так как он связывает водород и частично углерод в гидроксильные группы, влагу и угольную кислоту, уменьшая количество горючих составляющих.

Азот не принимает участия в реакциях горения и переходит в продукты горения. Кислород и азот образуют внутренний балласт топлива.

Общая классификация топлива

Агрегатное состояние	Происхождение топлива	
	естественное	искусственное
Твердое	Дрова, торф, бурый уголь, горючие сланцы, каменный уголь, антрацит	Древесный уголь, кокс, полукокс, брикеты, пылевидное топливо
Жидкое	Нефть	Бензин, керосин, соляровое масло, мазут и другие продукты переработки нефти, каменноугольная смола, сланцевое масло, спирт
Газообразное	Природный (естественный) и попутный (нефтяной) газы	Коксовый, светильный, нефтяной, генераторный, доменный и другие газы

Сера находится в топливе в нескольких разновидностях. В твердом топливе она может быть в виде органической составляющей S_o (в составе сложных органических соединений), колчеданной или пиритной составляющей S_k (в составе FeS_2) и сульфитной составляющей S_c (в составе солей серной кислоты $CaSO_4$, $MgSO_4$, $FeSO_4$ и др.). Сера органическая и колчеданная составляют летучую серу и участвуют в горении $S_{л} = S_o + S_k$. Сера сульфитная S_c в горении не участвует. Суммарное содержание серы $S_{общ} = S_o + S_k + S_c$. В жидком топливе сера содержится в виде свободного и органического компонентов $S_{общ} = S_{св} + S_o$. В газообразном топливе сера связана с водородом в виде соединения H_2S или кислородом в виде молекул SO_2 . Сера является вредной составляющей топлива, так как диоксид серы отравляет окружающий воздух; кроме того, ее наличие увеличивает окисление металла при нагреве и ухудшает его качество.

Кроме перечисленных элементов топливо содержит балласт — негорючую часть, состоящую для твердого и жидкого топлива из золы (A) и влаги (W), для газообразного топлива — из негорючих газов и паров воды.

Основными составляющими золы являются глинозем (Al_2O_3), диоксид кремния (SiO_2), оксид кальция (CaO), оксиды железа (FeO и Fe_2O_3), соли азотной и других кислот, а также минеральные примеси и неорганические соединения. Увеличение содержания золы уменьшает содержание горючей части топлива и теплоту его сгорания.

Влага в топливе также является нежелательной составляющей, так как от нее не только уменьшается горючая часть, но и беспо-

лезно затрачивается часть теплоты горения на ее нагрев и испарение. В результате сильно снижается теплота сгорания и понижается температура горения. Влагу в топливе разделяют на внешнюю (механическую) и внутреннюю. Внешняя влага попадает в топливо из окружающей среды во время его добычи, транспортирования и хранения. Внутреннюю влагу, в свою очередь, делят на гигроскопическую и гидратную. Внешнюю влагу можно удалять путем естественной сушки. Гигроскопическую влагу удаляют путем искусственной сушки при температуре около 100 °С. Гидратной называется влага, содержащаяся в минеральных и органических соединениях, не удаляющаяся при сушке. Сумма внешней и гигроскопической влаги называется *рабочей влажностью топлива* W^p . Содержание влаги определяют путем высушивания пробы топлива в сушильном шкафу при температуре 105...110 °С до получения постоянной массы. В газообразном топливе влага находится в виде паров воды.

Для определения состава топлива выполняют его химический анализ. При этом для твердого и жидкого топлива определяют *элементарный состав* (С, Н, О, N, S), а для газа проводят *полный анализ*, определяя содержания в топливе отдельных химических соединений (СО, СО₂, СН₄ и др.).

В соответствии с элементарным анализом различают с соответствующим обозначением в верхнем индексе: *сухую массу* ($C^c + H^c + O^c + N^c + S^c + A^c$), *горючую массу* ($C^r + H^r + O^r + N^r + S^r$) и *органическую массу* ($C^o + H^o + O^o + N^o$). Органическая масса топлива дает возможность судить о его природе, а горючая масса — о топливе как горючем.

Рабочий состав топлива в процентах по массе выражается суммой долей ее рабочих элементов:

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100,$$

где A^p и W^p — содержание золы и влаги.

Смысл такого метода характеристики химического состава топлива заключается в том, что когда требуется знание рабочего состава топлива, можно не производить каждый раз полного химического анализа, а определять только содержание золы, влаги и в некоторых случаях серы.

Коэффициенты для пересчета элементарного состава твердого и жидкого топлив приведены в табл. 1.2.

Газообразное топливо представляет собой смесь горючих, негорючих газов и водяных паров.

К горючим газам, входящим в состав газообразного топлива, относят оксид углерода (СО), водород (Н₂), метан (СН₄) и другие углеводороды (С_nН_m), сероводород (Н₂S).

К негорючим газам относят диоксид углерода (СО₂), азот (N₂), кислород (О₂), диоксид серы (SO₂), влагу (Н₂O).

Коэффициенты для пересчета состава твердого и жидкого топлива

Масса, с которой производится пересчет	Коэффициенты для пересчета на массу			
	рабочую	сухую	горючую	органическую
Рабочая	1	$\frac{100}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - (W + A)^p}$	$\frac{100}{100 - (W + A + S)^p}$
Сухая	$\frac{100 - W^p}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$	$\frac{100}{100 - (A + S)^c}$
Горючая	$\frac{100 - (W + A)^p}{100}$	$\frac{100 - A^c}{100}$	1	$\frac{100}{100 - S^g}$
Органическая	$\frac{100 - (W + A + S)^p}{100}$	$\frac{100 - (A + S)^c}{100}$	$\frac{100 - S^g}{100}$	1

Химический состав газообразного топлива характеризует содержание отдельных составляющих в объемных процентах в сухом и влажном газе:

сухой газ

$$\text{CO}^c + \text{H}_2^c + \text{CH}_4^c + \text{C}_n\text{H}_m^c + \text{H}_2\text{S}^c + \text{CO}_2^c + \text{SO}_2^c + \text{N}_2^c + \text{O}_2^c = 100;$$

влажный газ

$$\text{CO}^{\text{вл}} + \text{H}_2^{\text{вл}} + \text{CH}_4^{\text{вл}} + \text{C}_n\text{H}_m^{\text{вл}} + \text{H}_2\text{S}^{\text{вл}} + \text{CO}_2^{\text{вл}} + \text{O}_2^{\text{вл}} + \text{N}_2^{\text{вл}} + \text{O}_2^{\text{вл}} = 100.$$

Расход газа измеряют в кубических метрах при нормальных физических условиях (НФУ), соответствующих температуре 0 °С и давлению 0,101 МПа. Наравне с НФУ используют также стандартные технические условия (давление 0,101 МПа, температура 20 °С).

Содержание влаги и других примесей (смолы, жидких углеводородов, угольной и минеральной пыли) выражают в граммах на кубический метр сухого газа при НФУ.

Сухой газ пересчитывают на влажный по формуле

$$X^{\text{вл}} = X^c 100 / (100 + 0,1242 W^p),$$

где $X^{\text{вл}}$, X^c — конкретная составляющая сухого и влажного газа, %; W^p — содержание влаги сухом газе при НФУ, г/м³.

Если содержание влаги в газообразном топливе неизвестно, то вместо влаги принимают приближенно содержание водяных паров при данной температуре и 100%-ном насыщении.

Теплотой сгорания топлива называют количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы массы (или объема) топлива. Различают две величины сгорания — высшую и низшую теплоту сгорания топлива.

Высшей теплотой сгорания называют количество теплоты, которое выделяется при сжигании единицы топлива до продуктов полного сгорания при условии, что вся влага, образовавшаяся при горении, находится в сконденсированном состоянии при 0 °С.

Низшая теплота сгорания соответствует условию, что содержащаяся в продуктах сгорания влага находится в виде пара, охлажденного до 20 °С.

Соотношение между высшей Q_B^p и низшей Q_H^p теплотой сгорания при НФУ определяют по формуле

$$Q_B^p = Q_H^p + qW_{п.г},$$

где Q_B^p , Q_H^p — высшая и низшая теплота сгорания, кДж/кг или кДж/м³; q — теплота испарения и охлаждения влаги от 100 до 20 °С, $q = 2516,4$ кДж/кг; $W_{п.г}$ — содержание влаги в продуктах горения при НФУ, кг/м³.

Для твердого и жидкого топлива содержание влаги в продуктах горения, кг/кг топлива, определяют по формуле $W_{п.г} = 0,01(9H + W^p)$.

Тогда $Q_B^p = Q_H^p + 25,12(9H + W^p)$.

Определить теплоту сгорания топлива можно в зависимости от его химического состава экспериментальным и расчетными способами. В первом случае определяют экспериментально количество теплоты, выделяющейся при горении определенного количества топлива. Для этого используют приборы, которые называются *калориметрами*.

Расчетный способ основан на связи теплоты сгорания топлива с его химическим составом и представлении о теплоте сгорания как о сумме теплоты горения содержащихся в топливе элементов и их соединений с учетом их объемных долей, что наиболее точно соответствует газообразному топливу.

Зная количество теплоты, которое выделяется при горении каждой из составляющих, получим формулы для определения теплоты сгорания *газообразного топлива*.

Для высшей теплоты сгорания топлива при НФУ, кДж/м³:

$$Q_B^p = 126,4CO + 127,7H_2 + 397,7CH_4 + 636,5C_2H_4 + 699,2C_2H_6 + 992,3C_3H_8 + 1285,3C_4H_{10} + 255,4H_2S.$$

Для низшей теплоты сгорания топлива при НФУ, кДж/м³:

$$Q_H^p = 126,4CO + 107,8H_2 + 358,3CH_4 + 590,2C_2H_4 + 636,3C_2H_6 + 912,7C_3H_8 + 1184,9C_4H_{10} + 234,5H_2S.$$

Для определения теплоты сгорания *твердого* и *жидкого топлива*, у которых вид соединения элементов в горючей массе не всегда можно определить, разные авторы предлагают большое количество эмпирических формул. Наиболее часто используют формулы, предложенные Д. И. Менделеевым.

Для высшей теплоты сгорания, кДж/кг:

$$Q_B^p = 339,1C^p + 1\,256H^p + 108,8(S^p - O^p).$$

Для низшей теплоты сгорания, кДж/кг:

$$Q_H^p = 339,1C^p + 1\,256H^p + 108,8(S^p - O^p) - 25,1(9H^p + W^p).$$

Эти формулы можно применять и для определения теплоты сгорания сухой, горючей и органической масс твердого и жидкого топлива.

При нагревании твердого и жидкого топлива без доступа воздуха сначала происходит испарение влаги, а затем выделяются горючие газообразные вещества, которые называют *летучими*. Твердый остаток, который получают при полном удалении летучих веществ, называют окисовавшимся топливом или *коксом*. Соотношение летучих веществ и кокса дает представление о характере горения: $L + K = 100\%$, где L — доля летучих веществ; K — доля кокса в процентах по массе.

При большом содержании летучих веществ горение происходит, главным образом, в топочном объеме ярким излучающим факелом пламени. При малом содержании летучих веществ горение в большей степени совершается в слое топлива, а пламя получается небольшое — слабо светящееся. Соотношение между летучими веществами и коксом является одним из признаков классификации каменных углей по сортам и маркам.

Калориметрической температурой t_k называют температуру продуктов горения, которая получается при сжигании топлива в следующих идеальных условиях: топливо и воздух перед сжиганием имеют температуру 0°C , количество воздуха равно теоретически необходимому, горение протекает до полного окисления всех горючих составляющих топлива (влага в продуктах горения находится в парообразном состоянии), вся выделившаяся теплота используется на нагрев газообразных продуктов горения.

Исходя из этих условий калориметрическую температуру можно определить по формуле

$$t_k = Q_H^p / \sum mc,$$

где m — количество продуктов горения, получающихся при сгорании 1 кг или 1 м^3 топлива при НФУ, кг/кг; c — удельная теплоемкость отдельных газообразных составляющих продуктов горения (средняя от 0 до t_k), кДж/(кг·К) или кДж/($\text{м}^3 \cdot \text{К}$).

Величина t_k характеризует химический состав топлива и не учитывает условий сжигания. Действительные температуры продуктов горения, получаемые при сжигании данного вида топлива, могут быть ниже и выше (при сжигании с подогретым воздухом и топливом) величины t_k .

При использовании твердого топлива в промышленных условиях обычно проводят так называемый технический анализ топлива, который заключается в экспериментальном определении следующих величин: влажности W^p , содержания золы A^p , содержания летучих веществ L^r и кокса K^r ; теплоты сгорания Q_H^p и Q_B^p , содержания серы $S_{\text{общ}} = S_o + S_k + S_c$. В некоторых случаях ограничиваются определением содержания влаги и золы.

1.2. Особенности отдельных видов топлива

Искусственные виды твердого топлива получают из естественных видов механическим и термохимическим способами переработки. К искусственным видам твердого топлива, имеющим практическое значение, относят древесный уголь и, главным образом, каменноугольный кокс.

Естественным видом жидкого топлива является нефть, представляющая собой смесь жидких углеводородов с примесью некоторых органических соединений. Нефть южных месторождений состоит из 85...87 % углерода и 12...14 % водорода, 0,5...0,7 % серы и десятых долей кислорода и азота. Высокосернистая нефть восточных и северных районов зачастую содержит 1...4 % серы.

Нефть перерабатывают главным образом методом перегонки. Как топливо сырую нефть не используют. При нагревании до 200 °С выделяющиеся из нефти фракции образуют бензин с плотностью 720...760 кг/м³. Средний состав бензина — 85 % углерода и 15 % водорода, теплота сгорания 41 900...44 000 кДж/кг. Выделяющиеся при температуре 200...220 °С фракции с плотностью 770...790 кг/м³ называют *лигроином*, а при 220...315 °С с плотностью 800...833 кг/м³ — *керосином*. При более высоких температурах отгоняется так называемый соляровый дистиллят или соляровое масло. Выход этих легких фракций составляет 25...30 %. Остатком после их отгонки является *мазут*. По элементарному составу мазуты мало отличаются друг от друга: $C^r = 86,3...87,1\%$; $H^r = 12,5...13,1\%$; $S^r = 0...4,0\%$; $O^r = 0...0,35\%$; $N^r = 0...0,5\%$; $A^p = 0...0,2\%$; $W^p = 0...10\%$; $Q_H^p = 39\,700...41\,870$ кДж/кг.

Сжигание мазутов прямой возгонки считается нерациональным, их подвергают крекингу. Чем полнее крекинг и больше получено легких фракций, тем более вязким и плотным получается мазут.

Крекинг-мазуты классифицируют по вязкости и содержанию серы на марки 40; 100; 200 и мазут для мартеновских печей — МП (табл. 1.3).

Классификация мазута

Характеристика	Марка мазута			
	40	100	200	МП
Условная вязкость при 50 °С, °ВУ	5 ... 8	13 ... 15,5	6,5 ... 9,5 (при 100 °С)	8 ... 16
Температура вспышки, °С	90	110	140	110
Температура застывания, °С	10	25	35	25

По содержанию серы мазуты делят на малосернистые $S_{\text{общ}}^p < 0,5 \%$, сернистые $S_{\text{общ}}^p = 0,5 \dots 1,0 \%$ и высокосернистые $S_{\text{общ}}^p = 1,0 \dots 4,0 \%$.

Вязкость мазутов, как и других жидкостей, снижается с повышением температуры [23].

Кроме мазутов ряд смол, а также сланцевое масло могут быть использованы как жидкое топливо. Смешивать смолы с мазутом недопустимо, так как при этом образуются высоковязкие соединения.

Газообразное топливо имеет большие преимущества перед твердым и жидким топливом: лучше перемешивается с воздухом, что позволяет сжигать его с меньшим избытком воздуха; его более удобно транспортировать; установки, работающие на газообразном топливе, проще обслуживать и регулировать. В некоторых случаях газ можно подогревать перед сжиганием, что позволяет получать более высокий пирометрический эффект и улучшать теплоиспользование.

Газообразное топливо принято подразделять на газы с высокой теплотой сгорания $Q_{\text{н}}^p > 12\,560 \text{ кДж/м}^3$ (естественные, получаемые при переработке нефти, при коксовании и дистилляции углей и др.) и газы с низкой теплотой сгорания $Q_{\text{н}}^p < 12\,560 \text{ кДж/м}^3$, получаемые за счет неполноты горения различных видов твердого топлива.

Применение газа повышает экономичность печных установок. К отрицательным свойствам газообразного топлива относят взрывоопасность, а в ряде случаев и токсичность.

Природные газы можно разделить на две группы: газы из чисто газовых месторождений, содержащие до 98 % метана, и попутные газы, связанные с нефтяными месторождениями, имеющие повышенное содержание тяжелых углеводородов.

При дистилляции (нагревании без доступа воздуха) любых видов твердого топлива получают газообразные продукты, имеющие достаточно высокую теплоту сгорания, которые могут быть использованы как топливо. Характеристика их дана в табл. 1.4. Наибольшее практическое значение имеет газ, получаемый при кок-

Таблица 1.4

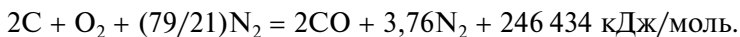
Характеристика газов, получаемых при дистилляции и коксовании различных каменных углей

Топливо и характер процессов	Состав газа по объему, %								Теплота сгорания Q_{H^p} , кДж/м ³
	CO ₂	CO	CH ₄	C _n H _m	H ₂	N ₂	O ₂	H ₂ S	
Челябинский бурый уголь (при полукоксовании)	19,7	16,4	39,8	1,4	18,0	3,0	—	1,7	21 277
Лисичанский уголь (при полукоксовании)	4,2	7,7	50,8	6,4	20,4	2,4	—	7,5	29 908
Печи с динасовой кладкой (при коксовании каменных углей)	2,4	5,6	23,3	1,7	51,5	8,8	0,7	—	18 000
Печи с шамотной кладкой (при коксовании каменных углей)	3,1	5,3	84,8	3,1	55,8	7,1	0,8	—	17 640
Светильный газ (при дистилляции углей марки Д-Г в чугунных ретортах)	5,0	5,0	36,0	5,0	42,0	7,0	—	—	20 086

совании каменных углей и широко используемый как топливо на металлургических заводах (часто в смеси с доменным газом).

Характеристики природных газов приведены в табл. 1.5 и 1.6.

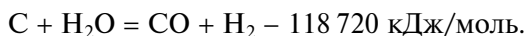
Если через слой раскаленного топлива пропустить воздух в количестве, недостаточном для полного горения, то будет протекать реакция



Полученный газ содержит по объему 34,7 % CO и 65,3 % N₂ и имеет низшую теплоту сгорания

$$Q_H^p = 4\,425 \text{ кДж/м}^3 \text{ при НФУ и } t_{\max} = 1\,623 \text{ }^\circ\text{C (воздушный газ).}$$

Если же в слой раскаленного углерода подать водяной пар, то будет протекать реакция



Полученный газ, называемый *водяным*, содержит 50 % CO и 50 % H₂ и имеет низшую теплоту сухого вещества $Q_H^c = 11\,765 \text{ кДж/м}^3$ и максимальную температуру горения 2 300 °С. Так как процесс получения водяного газа требует затраты теплоты, то для его осуществления применяют двухкамерные генераторы. Состав практически получаемого водяного газа следующий: CO = 40 %, H₂ = 50 %, CO₂ = 4,5 %, N₂ = 5,0 %, CH₄ = 0,5 %; его $Q_H^c = 10\,467 \text{ кДж/м}^3$ при НФУ.

Водяной газ редко используют как топливо, чаще его применяют в химической промышленности (например, для получения водорода). Совмещая процесс получения воздушного и водяного газов, получают так называемый *смешанный* или *генераторный газ*, который представляет собой смесь продуктов взаимодействия воздушного и водяного газов, летучих веществ и водяного пара.

К газам с низкой теплотой сгорания относят *доменный* или *колошниковый газ*. Это отходящий газ доменных печей, получающийся в больших количествах при работе доменных печей (около 3... 4 м³ на 1 кг чугуна). Этот газ играет значительную роль в топливном балансе металлургических заводов. Так как теплота сгорания доменного газа невысокая, то его часто используют в смеси с коксовым газом в виде коксодоменной смеси с теплотой сгорания 7 500... 10 000 кДж/м³ при НФУ.

Для удобства планирования, учета и сравнения различных видов топлива введено понятие условного топлива. *Условным топливом* называют идеальный, не существующий реально вид топлива, который имеет низшую теплоту сгорания 29 300 кДж/кг. Реальное топливо переводят в условное с помощью теплового эквивалента Э, который определяют по выражению

$$\text{Э} = Q_H^p / 29\,300.$$

Таблица 1.5

Состав сухих нефтепромысловых попутных природных газов

Месторождение	Состав газа по объему, %										Низшая теплота сгорания $Q_{нт}^p$, кДж/м ³	Плотность, кг/м ³
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C _n H _m	C ₃ H ₁₂	C ₆ H ₁₄	H ₂ S	CO ₂	N ₂		
Туймазанское	30,0	13,0	14,3	6,3	—	3,3	1,4	0,7	1,0	30,0	46 892	1,293
	39,5	20,0	18,5	7,7	—	2,8	1,4	—	0,1	10,0	59 453	1,293
Мухановское	57,5	15,0	11,0	8,0	—	4,0	—	—	1,5	3,0	55 433	1,165
	42,7	20,0	19,5	9,5	—	2,9	—	—	0,2	5,2	61 337	1,293
Ромашкинское	40,0	19,5	18,0	7,5	—	3,8	1,1	—	0,1	10,0	59 536	1,423
Шугуровское	23,7	12,0	10,0	2,8	—	1,5	1,0	2,0	1,0	46,0	32 783	1,293
Сызранское	29,0	15,8	15,8	15,8	—	—	—	—	3,5	20,1	48 148	1,420
Кинельское	64,0	9,2	7,0	5,3	—	—	—	2,5	0,5	8,4	47 102	1,200
Штимбаевское	42,4	12,0	20,5	7,2	—	—	—	2,8	1,0	11,0	51 916	1,380