1 Состав горючих газов газового топлива

Газовое топливо представляет собой смесь различных простых горючих и балластных газов. Свойства газового топлива определяются свойствами отдельных горючих и негорючих газов, его составляющих, и примесей.

Горючая часть газового топлива состоит из углеводородов, водорода и окиси углерода. В негорючую часть входят углекислый газ, азот и кислород. К примесям относят сероводород, аммиак, цианистые соединения, водяные пары, нафталин, смолы, пыль и др. Негорючие газы и примеси являются балластом газового топлива, ухудшающим его теплофизические и эксплуатационные качества. Поэтому содержание их в газовом топливе доводится до строго лимитируемого минимума .

Углеводороды предельного ряда составляют основную горючую часть природных газов и имеют общую химическую формулу C_nH_n+2. Первый в их ряду - метан (CH_4), последующие – этан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}), пентан (C_5H_{12}) и т. д.

Предельные углеводороды характеризуются высокой теплотой сгорания, не имеют цвета и запаха, не токсичны, но оказывают слабое наркотическое действие при большой концентрации (высокомолекулярные углеводороды). При скоплениях в помещениях более 10% по объему они способны вызвать удушье из-за недостатка кислорода воздуха. С увеличением молекулярной массы углеводородов повышаются их теплота сгорания, плотность и способность конденсации.

Непредельные углеводороды входят в значительных количествах в искусственные газы. Их общая химическая формула CnH2n.

Первые три члена - этилен (C_2H_4), пропилен (C_3H_6) и бутилен (C_4H_8). По свойствам они сходны с предельными углеводородами.

Водород (H_2) имеется во всех искусственных газах. Это горючий газ без цвета, запаха и вкуса, не токсичен. В реакциях горения водород весьма активен.

Окись углерода (CO) - горючий газ без цвета, запаха и вкуса, тяжелее воздуха, очень токсичен. Содержится в больших количествах в искусственных газах, а также образуется при неполном сгорании топлива.

Углекислый газ (CO_2) не имеет цвета и запаха, со слабым кисловатым вкусом, не токсичен, но при скоплениях в помещении способен вызвать удушье из-за недостатка кислорода воздуха. Химически инертен.

Азот (N_2) - газ без цвета, запаха и вкуса, не горит и не поддерживает горения, не токсичен. При высоких температурах, например в топках

промышленных агрегатов, возможно образование окислов азота, являющихся высокотоксичными компонентами продуктов сгорания.

Кислород (O_2) - газ без цвета, запаха и вкуса, не горит, но поддерживает горение. Содержится в небольших количествах в некоторых искусственных газах. В присутствии влаги активно способствует коррозии металла газопроводов и арматуры.

Сероводород (H_2S) - бесцветный горючий газ с характерным запахом тухлых яиц. Может содержаться в искусственных и плохо очищенных природных газах. Как сам сероводород, так и продукт его сгорания - сернистый газ (SO_2) - весьма токсичны и разрушают металлы, образуя с железом пирофорные соединения, способные самовоспламеняться в воздухе.

Аммиак (NH_3) - бесцветный газ с острым запахом нашатырного спирта, вредная токсичная примесь некоторых искусственных газов.

Цианистые соединения, в первую очередь синильная кислота (HCN), могут образоваться в коксовых газах в результате взаимодействия углерода топлива с аммиаком. При нормальных условиях синильная кислота - бесцветная легкая жидкость с весьма высокими токсичными и коррозионными свойствами.

Пары воды могут содержаться в недостаточно осушенных газах. При высоких давлениях они образуют с тяжелыми углеводородами кристаллогидратные соединения, внешне напоминающие частички снега или льда, которые закупоривают газопроводы. Кроме того, влага способствует коррозии металлов.

Нафталин, смолы и пыль, откладываясь на внутренних стенках газопроводов, уменьшают их сечения, а при плохой очистке газа - закупоривают отдельные участки газопроводов, преждевременно засоряют фильтры, арматуру и другие устройства.

2 Классификация горючих газов

В практике газоснабжения применяются различные газы, отличающиеся по происхождению, химическому составу и физическим свойствам. По происхождению горючие газы разделяются на естественные, или природные, искусственные, вырабатываемые из твердого и жидкого топлива. Природные газы добываются из скважин чисто газовых месторождений, а также нефтяных месторождений попутно с нефтью и газоконденсатных месторождений.

Газы чисто газовых месторождений преимущественно состоят из метана (до 99 %) с небольшим содержанием тяжелых углеводородов и негорючих примесей. Они характеризуются относительным постоянством состава и теплотой сгорания.

Газы газоконденсатных месторождений представляют собой месторождения в виде смеси различных предельных углеводородов, в основном метана (80…94 %), и более тяжелых гомологов вплоть до пентана, гексана, газового бензина и керосиновых фракций, причем по массе их количество может достигать 25 %. Газоконденсатные месторождения залегают на большой глубине. Они образовались в результате процесса обратного испарения конденсата, протекающего при высоких давлениях и температурах. Особенности разработки газоконденсатных месторождений заключаются в том, что обработка и переработка газа (выделение тяжелых фракций) производится на промысле; применяются дорогостоящие аппаратура и трубопроводы из-за высокого давления, необходимого для вытеснения газа и транспортировки.

В газах газонефтяных месторождений наряду с метаном содержится значительное количество тяжелых углеводородов (пропан и бутан). Природный газ не имеет запаха, в связи с этим до подачи в сеть его одорируют, т.е. добавляют небольшое количество органических веществ (одорантов), обладающих резким запахом, что позволяет обнаруживать утечки.

Искусственные газы вырабатывают на специальных газобензиновых заводах, а также на заводах по переработке нефти или получают как побочный продукт при сжигании угля на металлургических заводах.

Для газоснабжения населенных пунктов из искусственных газов используют главным образом сжиженные углеводородные газы, которые представляют собой смесь, состоящую преимущественно из пропана, нормального бутана и изобутана. В отдельных случаях в состав смеси также входят пропилен, бутилен и некоторые другие углеводороды.

Характерным свойством углеводородных газов и их смесей является их относительно легкий переход в жидкое состояние при нормальной температуре и небольшом избыточном давлении. При снижении давления эти газы переходят обратно в газообразное состояние. Таким образом, углеводородные фракции, находясь в жидком состоянии, приобретают преимущества, свойственные жидкостям при хранении и транспорте. Находясь в газообразном состоянии, они приобретают преимущества, свойственные газам при их распределении по сетям и сжигании. Основным источником получения

сжиженных газов являются попутные нефтяные газы, которые подвергаются переработке с целью получения из них бензина и сжиженных газов.

3 Реакции горения

3.1 Стехиометрические уравнения

Горением называется быстро протекающая химическая реакция взаимодействия горючих компонентов топлива с кислородом, которой сопутствует интенсивное выделение теплоты, вызывающее резкий рост температуры. В отличие от обычных химических реакций с высоким экзотермическим эффектом при горении наблюдается пламя, представляющее собой зону реакций, происходящих в газообразной фазе. Теоретический итог реакций горения описывается при помощи так называемых стехиометрический уравнений. Эти уравнения качественно и количественно характеризуют вещества, вступающие в реакцию, и продукты, образующиеся в результате нее. В случае реакций горения их результат дополняется тепловым эффектом, то есть количеством теплоты, выделяющимся во время реакции. Рассмотрим примеры стехиометрических уравнений реакций горения водорода, оксида углерода и метана (без учета теплоты конденсации образующегося водяного пара):

$$2H_2 + O_2 \Rightarrow 2H_2O + 483{,}2 \text{ кДж}, \quad (3.1)$$

$$2CO + O_2 \Rightarrow 2CO_2 + 566{,}0 \text{ кДж}, \quad (3.2)$$

$$CH_4 + 2O_2 \Rightarrow CO_2 + 2H_2O + 802{,}2 \text{ кДж}. \quad (3.3)$$

Реакция горения любого углеводорода может быть выражена универсальным уравнением

$$C_mH_n + \left(m + \frac{n}{4}\right)O_2 \Rightarrow mCO_2 + \frac{n}{2}H_2O + Q, \quad (3.4)$$

где m − количество атомов углерода в молекуле углеводорода; n − количество атомов водорода в молекуле углеводорода; Q − тепловой эффект реакции (теплота сгорания). Для распространенных компонентов горючих газов стехиометрические уравнения и тепловой эффект их реакции с кислородом приведены в таблице 3.1.

Необходимо подчеркнуть, что стехиометрические уравнения представляют только конечный результат горения и его суммарный тепловой

эффект, однако по этим уравнениям нельзя судить ни о скорости протекания реакции, ни о механизме химических превращений.

Таблица 3.1− Стехиометрические уравнения и тепловой эффект реакций горения сухих газов в кислороде

Наименование	Стехиометрическое уравнение горения	Теплота сгорания	
		$Q_в$, МДж/м^3	$Q_н$, МДж/м^3
Водород	$H_2+0,5O_2 \Rightarrow H_2O$	10,785	10,785
Окись углерода	$CO+0,5O_2 \Rightarrow CO_2$	12,627	12,627
Метан	$CH_4+2O_2 \Rightarrow CO_2+2H_2O$	39,758	35,831
Этан	$C_2H_6+3,5O_2 \Rightarrow 2CO_2+3H_2O$	69,668	63,765
Пропан	$C_3H_8+5O_2 \Rightarrow 3CO_2+4H_2O$	99,143	91,272
Бутан	$C_4H_{10}+6,5O_2 \Rightarrow 4CO_2+5H_2O$	128,493	[illegible]
Пентан	$C_5H_{12}+8O_2 \Rightarrow 5CO_2+6H_2O$	157,905	[illegible]
Этен	$C_2H_4+3O_2 \Rightarrow 2CO_2+2H_2O$	63,011	59,076
Пропен	$C_3H_6+4,5O_2 \Rightarrow 3CO_2+3H_2O$	91,942	86,039
Бутен	$C_4H_8+6O_2 \Rightarrow 4CO_2+4H_2O$	121,417	113,546
Пентен	$C_5H_{10}+7,5O_2 \Rightarrow 5CO_2+5H_2O$	150,725	140,928
Ацетилен	$C_2H_2+2,5O_2 \Rightarrow 2CO_2+H_2O$	58,008	56,044

3.2 Кинетика реакции горения

Скорость химической реакции W, моль/(м^3 · с), можно определить как изменение концентрации компонентов за единицу времени в единице объема. Для необратимых реакций, происходящих при сжигании горючих газов, скорость их протекания можно описать следующей зависимостью:

$$W = -\frac{dC}{d\tau} = kC_1C_2, \qquad (3.5)$$

где k − константа скорости химической реакции; C_1, C_2 − концентрация реагирующих компонентов, моль/м^3 (знак «−» в дифференциальной форме указывает на уменьшение концентрации исходных реагентов с течением времени).

При организованном сжигании топлива в технических устройствах концентрации реагирующих веществ можно условно считать постоянными, поскольку в зону горения происходит непрерывный приток топлива и окислителя. В этих условиях значение константы скорости реакции определяется экспоненциальным уравнением *Аррениуса:*

$$k = k_0 e^{-\frac{E}{RT}}, \qquad (3.6)$$

где k_o − предэкспоненциальный множитель, который характеризует данную реакцию и в первом приближении принимается постоянным; E − энергия активации, Дж/моль; R − универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T − абсолютная температура в реакционной зоне, K. Уравнение (3.6) показывает, что скорость химической реакции зависит как от свойств реагентов *(R, E)*, так и от температуры, быстро увеличиваясь с ее ростом.

4 Расчет физико-химических свойств природного газа

Характеристика природного газа приведена в таблице 4.1.

Таблица 4.1− Состав природного газа

Газы	Химическая формула	Средний состав газа, %, по объему	Предел взрываемости, %		ρ, кг/м^3
			нижний	верхний	
Метан	CH_4	94,55	5	15	0,72
Этан	C_2H_6	1,34	3	14	1,36
Пропан	C_3H_8	0,72	2	9,5	2,02
Бутан	C_4H_{10}	0,10	1,5	8,5	2,70
Изобутан	C_4H_{10}	0,14	1,5	8,5	2,70
Углекислый газ	CO_2	0,03	-	-	1,98
Сероводород	H_2S	-	-	-	1,52
Азот	N_2	2,97	-	-	1,25
Кислород	O_2	0,15	-	-	1,30

4.1 Плотность газа

4.1.1 Плотность газа при нормальных условиях (t = 0°С; Р =101,3 кПа), кг/м^3, определена по правилу смешения

$$\rho_0 = \frac{\rho_1\vartheta_1 + \rho_2\vartheta_2 + ... + \rho_n\vartheta_n}{100},$$

где $\rho_1, \rho_2, ... \rho_n$ - плотность компонентов газовой смеси, кг/м^3;

$V_1, V_2, ... V_n$ - объемное содержание компонентов в смеси, %.

$$\rho_0 = 0{,}01 \cdot (0{,}72 \cdot 94{,}55 + 1{,}36 \cdot 1{,}34 + 2{,}02 \cdot 0{,}72 + 2{,}7 \cdot 0{,}1 + $$
$$+ 2{,}7 \cdot 0{,}14 + 1{,}98 \cdot 0{,}03 + 1{,}25 \cdot 2{,}97 + 1{,}3 \cdot 0{,}15) = 0{,}76 \text{ кг/м}^3$$

4.1.2 Плотность газа в рабочих условиях, кг/м^3, определена по формуле:

$$\rho = \rho_o \frac{273(P_{бар} + P_{изб})}{P_{бар}(t + 273)},$$

где ρ_o − плотность газа при нормальных условиях, кг/м^3;

$P_{бар}$ − барометрическое давление среды, $P_{бар}$ = 101,3 кПа;

$P_{изб}$ − избыточное давление смеси газов в рабочих условиях, $P_{изб}$ = 3 кПа;

t − температура смеси в рабочих условиях, t = 20°С

$$\rho = 0{,}76\frac{273(101{,}325+3)}{101{,}325(20+273)} = 0{,}73 \text{ кг/м}^3$$

4.1.3 Относительная плотность газа (по воздуху) при н.у. (безразмерная величина) определена по формуле:

$$s = \frac{\rho_0}{\rho_B},$$

где ρ_o − плотность газа при нормальных условиях, кг/м^3;

$\rho_в$ − плотность воздуха при нормальных условиях, $\rho_в$ = 1,293 кг/м^3.

$$s = \frac{0{,}76}{1{,}293} = 0{,}588$$

4.2 Теплота сгорания газа

Теплотой сгорания газа называют количество тепла, выделяющееся при полном сгорании 1 м^3 или 1 кг газа. Различают *низшую* теплоту сгорания, когда не учитывается скрытая теплота, выделяющаяся при конденсации водяных паров из продуктов сгорания газа, и *высшую*, когда эта теплота учитывается.

Для определения высшей и низшей теплоты сгорания, кДж/м^3, использованы следующие формулы:

$$Q_н = 108H_2 + 126{,}4CO + 357{,}9CH_4 + 637{,}3C_2H_6 + 912{,}8C_3H_8 + \\ + 1184{,}9C_4H_{10} + 1461{,}4C_5H_{12} + 234{,}9H_2S$$

$$Q_в = 127{,}7H_2 + 126{,}4CO + 397{,}8CH_4 + 696{,}7C_2H_6 + 922{,}4C_3H_8 + \\ + 1285{,}9C_4H_{10} + 1578{,}5C_5H_{12} + 256{,}4H_2S$$

где CH_4, C_2H_6 и т.д. - объемное содержание газов в смеси, %.

$Q_н$ = 0 + 0 + 357,9 · 94,55 + 636,4 · 1,34 + 912,8 · 0,72 + 1184,9 · 0,1+ +1184,9 · 0,14+ 0 + 0 = 35633 кДж/м^3,

$Q_в$ = 0 + 0 + 397,8 · 94,55 + 696,7 · 1,34 + 922,3 · 0,72 + 1285,9 ·0,1 + + 1285,9 ·0,14 + 0 + 0 = 39519 кДж/м^3

4.3 Число Воббе

Число Воббе - характеристика, позволяющая судить о возможности взаимозаменяемости газов, кДж/м^3, определена по формуле

$$W_0 = \frac{Q_H}{\sqrt{S}},$$

где $Q_н$ - низшая теплота сгорания газа, кДж/м^3

S - относительная плотность газа (по воздуху) при нормальных условиях (безразмерная величина)

$$W_0 = \frac{35633}{\sqrt{0,588}} = 46458 \text{ кДж/м}^3$$

5 Расчеты по реакциям горения

5.1 Теоретический расход сухого воздуха, необходимого для сжигания 1 м^3 газа, м^3/м^3, определен по формуле

$$V_T = \frac{4,76}{100}(0,5H_2 + 0,5CO + 2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 +$$
$$+ 6,5C_4H_{10} + 8C_5H_{12} + 1,5H_2S - O_2),$$

где CH_4, C_2H_6 и т.д. - объемное содержание газов в смеси, %

V_T = 0,0476 · (0 + 0 + 2 · 94,55 + 3,5 · 1,34 + 5 · 0,72 + 6,5 · 0,1 + 6,5 · 0,14- – 0,15) = 9,463 м^3/м^3

5.2 Действительный расход воздуха, м^3/м^3, вследствие несовершенства смешения горючего газа и окислителя в процессе горения принимается несколько больше теоретического

$$V_Д = \alpha \cdot V_T,$$

где V_T - теоретический расход сухого воздуха, м^3/м^3

α - коэффициент избытка воздуха, α = 1,1

$$V_Д = 1,1 \cdot 9,463 = 10,409 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

Если воздух или кислород доставлять до зоны горения в теоретически необходимом количестве, то полное сгорание топлива обеспечить невозможно. В конечной фазе горения молекулы топлива и окислителя будут настолько разделены массой балласта и уже образовавшихся продуктов сгорания, что не смогут войти в контакт и прореагировать, несмотря на то, что их общее количество соответствует стехиометрическому балансу. Так возникает явление химического недожога.

5.3 Объем продуктов сгорания

Объем отдельных компонентов продуктов сгорания, м^3/м^3, при сжигании их с избытком влажного воздуха определен по следующим формулам:

а) объем двуокиси углерода

$$V_{CO_2} = 0{,}01(CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12}),$$

$$V_{CO_2} = 0{,}01(0{,}03 + 0 + 94{,}55 + 2 \cdot 1{,}34 + 3 \cdot 0{,}72 + 4 \cdot 0{,}1 + 4 \cdot 0{,}14) = 1{,}04 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

б) объем водяных паров

$$V_{H_2O} = 0{,}01(H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12} +$$
$$+ 0{,}124(d_Г + d_B \alpha V_T)),$$

$$V_{H_2O} = 0{,}01(0 + 2 \cdot 94{,}55 + 3 \cdot 1{,}34 + 4 \cdot 0{,}72 + 5 \cdot 0{,}1 + 5 \cdot 0{,}14 +$$
$$+ 0{,}124(4{,}9 + 4{,}5 \cdot 1{,}1 \cdot 9{,}463)) = 2{,}036 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

в) объем азота

$$V_{N_2} = 0{,}79\alpha V_T + 0{,}01N_2,$$

$$V_{N_2} = 0{,}79 \cdot 1{,}1 \cdot 9{,}463 = 8{,}223 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

г) объем кислорода

$$V_{O_2} = 0{,}21(\alpha - 1) V_T,$$

$$V_{O_2} = 0{,}0073(1{,}1 - 1) \cdot 9{,}463 = 0{,}007 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

д) общий объем продуктов сгорания

$$V = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2},$$

$$V = 1{,}04 + 2{,}036 + 8{,}223 + 0{,}007 = 11{,}306 \text{ м}^3/\text{м}^3$$

5.4 Пределы воспламенения горючей смеси

Смеси горючих газов с воздухом (с кислородом) могут воспламеняться (взрываться) только в том случае, когда содержание газа в смеси укладывается в строго определенные границы. С этой точки зрения различают <u>нижний и верхний концентрационные пределы воспламенения</u> (границы взрываемости, воспламеняемости или распространения пламени). Нижний предел Lн соответствует минимальному содержанию газа в смеси, а верхний предел Lв — его максимальному содержанию, при которых происходит воспламенение (взрыв) смеси или самопроизвольное (без притока теплоты извне) распространение пламени в объеме смеси. <u>Вне концентрационных пределов воспламенения газовоздушные смеси не горят и не взрываются.</u> Поэтому эта характеристика так важна с точки зрения эффективного и безопасного использования газообразных топлив.

Пределы воспламенения смесей газов, не имеющих балластных примесей или содержащих их в небольшом количестве, определены по следующей формуле, %,

$$L = \frac{V_1 + V_2 + \ldots + V_n}{\frac{V_1}{l_1} + \frac{V_2}{l_2} + \ldots + \frac{V_n}{l_n}},$$

где l_1, l_2, l_n - пределы воспламенения (нижний или верхний) отдельных компонентов смеси, %.

$$L_H = \frac{94{,}55 + 1{,}34 + 0{,}72 + 0{,}1 + 0{,}14}{94{,}55/5 + 1{,}34/3 + 0{,}72/2 + 0{,}1/1{,}5 + 0{,}14/1{,}5} = 4{,}87\%$$

$$L_B = \frac{94{,}55 + 1{,}34 + 0{,}72 + 0{,}1 + 0{,}14}{94{,}55/15 + 1{,}34/14 + 0{,}72/9{,}5 + 0{,}1/8{,}5 + 0{,}14/8{,}5} = 14{,}9\%$$

6 Температура сгорания

а) жаропроизводительность: $t_ж$ - максимальная температура продуктов полного сгорания газа в адиабатических условиях с коэффициентом избытка воздуха α = 1,0, °С,

$$t_Ж = \frac{Q_H}{V_{CO_2} \cdot c_{pCO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} + V_{N_2} \cdot c_{pN_2}},$$

где $Q_н$ - низшая теплота сгорания газа, кДж/м^3;

V_{CO2}, V_{H2O}, V_{N2} - объемное содержание, %, соответственно диоксида углерода, водяных паров, азота;

C_{pCO2}, C_{pH2O}, C_{pN2} - средняя объемная теплоемкость соответственно диоксида углерода, водяных паров, азота, кДж / (м^3°С).

$t_ж$ = 35633 / (1,04 · 2,410 + 2,036 · 1,946 + 8,223 · 1,484) = 1909°С

б) калориметрическая температура $t_к$ - температура, которая определяется без учета диссоциации водяных паров и диоксида углерода, но с учетом фактической начальной температуры газа и воздуха, °С

$$t_K = \frac{Q_H + V_T \alpha\, c_{pB} t_B + t_Г \sum V_Г c_{pГ}}{V_{CO_2} \cdot c_{pCO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} + V_{N_2} \cdot c_{pN_2} + V_{O_2} \cdot c_{pO_2}},$$

где V_T, V_{H2O}, V_{N2}, V_{O2}, $V_Г$ - объемное содержание, м^3, соответственно воздуха, диоксида углерода, водяных паров, азота, кислорода, компонентов газовой смеси;

C_{pB}, C_{pCO2}, C_{pH2O}, C_{pN2}, C_{O2}, $C_{pГ}$ - средняя объемная теплоемкость, кДж/(м^3 °С), соответственно воздуха, диоксида углерода, водяных паров, азота, кислорода, компонентов газовой смеси;

$t_в$ и $t_г$ - соответственно температура газа и воздуха, $t_в$ = 20°С, $t_г$ = 20°С.

$t_к$ = (35633 + 31,27 + 278,434) / (1,04 · 2,392 + 2,036 · 1,943 + 8,223 × × 1,482 + 0,007 · 1,562) = 1928°С

в) Теоретическая температура горения, °С, определена по формуле

$$t_T = \frac{Q_H - Q_{XH} + V_Д c_{pB} t_B + t_Г \sum V_Г c_{pГ}}{V_{CO_2} \cdot c_{pCO_2} + V_{H_2O} \cdot c_{pH_2O} + V_{N_2} \cdot c_{pN_2} + V_{O_2} \cdot c_{pO_2}},$$

где $Q_{хн}$ - химическая неполнота сгорания, включая потери теплоты от диссоциации газов, $Q_{хн}$ = 1817,64 кДж/м^3;

$V_Д$ - действительный расход воздуха, м^3/м^3

$t_в$ = (35633 – 1828,7 + 31,27 + 278,434) / (8,223 · 1,476 + 0,007 · 1,556 + + 1,04 · 2,395 + 2,036 · 1,926) = 1815°С

г) Действительная (расчетная) температура продуктов сгорания $t_д$ - максимальная температура, которая достигается в реальных условиях в наиболее нагретой точке факела, °С,

$$t_Д = t_T \cdot \eta,$$

$$t_Д = 1815 \cdot 0,75 = 1361°С$$

где η - пирометрический коэффициент, η = 0,75

Действительная температура горения всегда меньше теоретической и зависит от целого комплекса факторов, обусловливающих отвод теплоты из зоны горения: интенсивности теплоотдачи от факела излучением, потерь теплоты в окружающую среду, а также организации процессов смешения

топлива с воздухом, определяющих растянутость процесса горения. Из этого следует, что точное определение действительной температуры горения возможно только в процессе теплового расчета конкретных тепловых агрегатов служащих для сжигания топлива, например, по тепловому балансу котельных агрегатов и промышленных печей.

7 Температуры воспламенения и самовоспламенения

Понятия температур воспламенения и самовоспламенения очень важны в технике сжигания топлива. В то же время нюансы, отличающие эти два понятия в теории горения, для технических специалистов могут выглядеть несколько расплывчатыми, что приводит к смешению и неправильному применению понятий. Поэтому данному вопросу необходимо уделить особое внимание.

Первый и наиболее важный для понимания существа вопроса факт: *любое топливо сгорает в газообразном состоянии*. Газ уже находится в таком состоянии, поэтому воспламенение газообразного топлива происходит мгновенно, тогда как жидкое и твердое топлива необходимо сначала нагреть источником открытого пламени до начала активного испарения горючего вещества.

Воспламенение жидкого топлива сильно разнится по времени: летучие жидкости (бензин, спирт, эфир) воспламеняются так же быстро, как и газы, а мазут и масла требуют достаточно продолжительного воздействия пламени. Твердое топливо в нормальных условиях всегда требует достаточно продолжительного предварительного подогрева до начала горения.

Вторым важным моментом является необходимость четко отличать энергию, необходимую для вышеописанного *предварительного испарения горючего вещества* и энергию *активации самой реакции горения*, приводящую к инициированию цепного механизма в виде образования необходимого количества радикалов.

Температура воспламенения − это минимальная температура вещества, при которой оно выделяет горючие пары и газы с такой скоростью, что при *воздействии на них источника зажигания* наблюдается воспламенение. Обратим внимание, что источник зажигания в этом случае только сообщает энергию активации уже выделяющимся парам горючего вещества. Это может быть искра или кратковременное воздействие пламени на зону над поверхностью вещества. Если воспламенения при этом не происходит, то

температура воспламенения еще не достигнута. Длительное воздействие пламени, характерное для зажигания твердого топлива, также означает, что температура воспламенения еще не достигнута, и мы сообщаем горючему веществу энергию, необходимую именно для доведения его до этой температуры.

Температура самовоспламенения − это наименьшая температура горючего вещества, при нагреве до которой происходит резкое увеличение скорости экзотермических реакций, приводящее в возникновению пламенного горения. Эта температура требуется непосредственно для достижения энергии активации реакции горения. Таким образом, это минимальная температура, до которой должна быть нагрета *уже образовавшаяся горючая смесь*, чтобы начался *самопроизвольный процесс горения*, не требующий источника зажигания и дальнейшего подвода теплоты извне.

Нетрудно убедиться, что в случае рассматриваемых задач сжигания газообразного топлива, понятия температур воспламенения и самовоспламенения практически совпадают. Этот вид топлива уже находится в газообразном состоянии (что соответствует температуре воспламенения), и любое инициирующее воздействие (искра, раскаленное тело, открытое пламя) сразу вызывает воспламенение. Использование понятия «температура самовоспламенения» является более точным.

Температура самовоспламенения прежде всего является характеристикой самого газа. Но в то же время ее величина зависит от многих факторов: содержания газа в смеси с воздухом, формы и размеров сосуда, в котором происходит нагрев смеси, каталитического воздействия материала стенок сосуда, скорости и способа подогрева смеси, давления под которым находится газ и т.п.

Поэтому определяется температура самовоспламенения экспериментально: методом впуска предварительно подготовленной холодной газовоздушной смеси в нагретый сосуд, или методом смешения в сосуде предварительно нагретых до одинаковой температуры потоков газа и воздуха.

Значения температуры самовоспламенения различных газов, определенные методом впуска холодной смеси при атмосферном давлении в нагретый сосуд, представлены графически на рисунке 7.1.

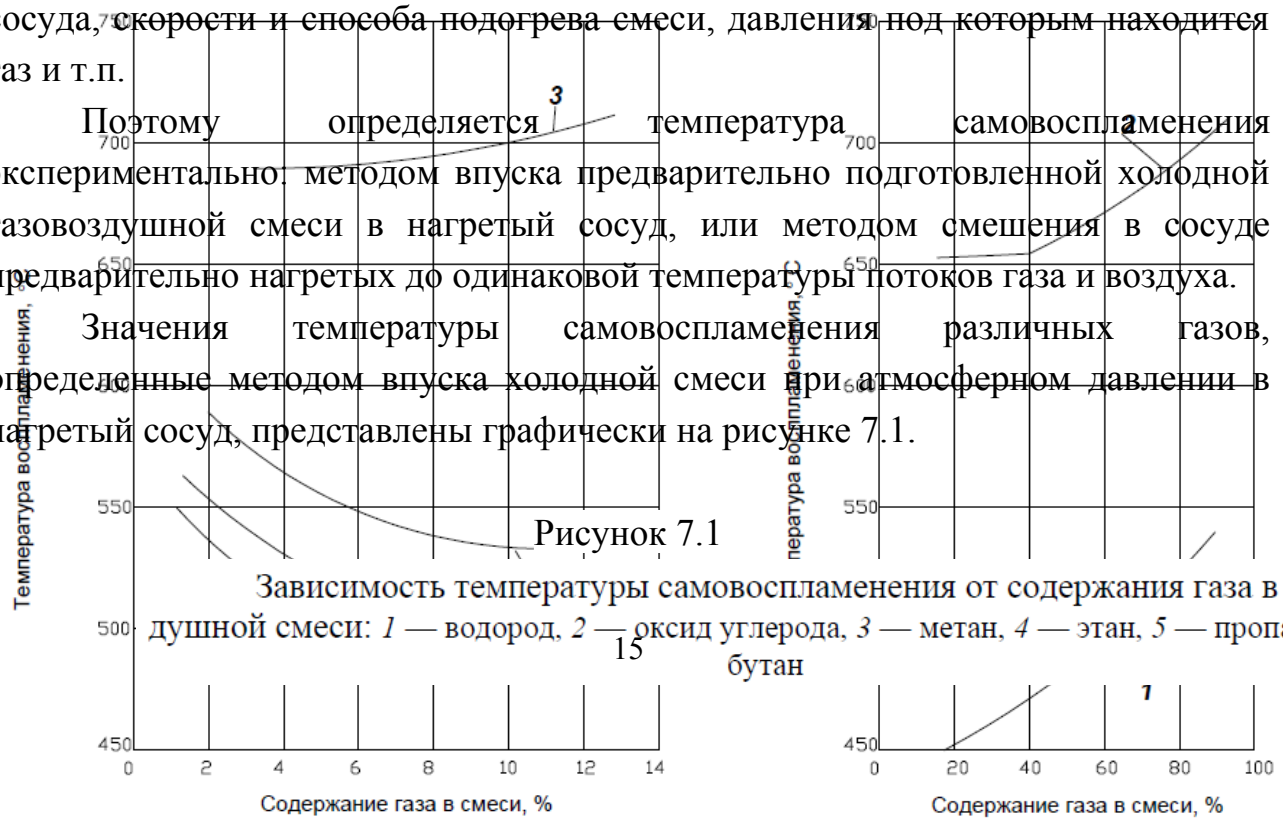

Рисунок 7.1

Зависимость температуры самовоспламенения от содержания газа в газовоздушной смеси: *1* — водород, *2* — оксид углерода, *3* — метан, *4* — этан, *5* — пропан, *6* — бутан

Графические зависимости показывают, что наибольшую температуру самовоспламенения имеют оксид углерода (более 650ºС) и метан (от 680ºС и выше, в зависимости от концентрации). Проще всего достигнуть самовоспламенения *n*-бутана (менее 500ºС при содержании в смеси 6 %) и водорода (несколько выше 450ºС при содержании в смеси 20%).

При этом повышение содержания водорода, оксида углерода и метана в составе газовоздушной смеси приводит к увеличению температуры самовоспламенения, тогда как рост содержания этана и других более тяжелых углеводородов − к ее снижению.

Температура самовоспламенения газов в смеси с кислородом, как правило, несколько ниже, чем в воздухе. Наличие балласта (негорючих компонентов, не принимающих участия в горении, таких как диоксид углерода и азот) увеличивает температуру самовоспламенения. Присутствие в сложных газах компонентов с низкой температурой воспламенения снижает температуру самовоспламенения всей газовой смеси.

В практике сжигания топлива нет необходимости доводить весь объем смеси до температуры самовоспламенения. Зажигание производится в одной точке при помощи внешнего высокотемпературного источника (так называемый запальник). Таким образом, *зажигание топлива* в технике отличается от лабораторного самовоспламенения. Смесь подогревается до достаточно высокой температуры в очень ограниченном объеме вблизи запальника. После этого горение самопроизвольно распространяется на весь объем смеси, благодаря тепловому эффекту реакций горения.

Однако при таком способе зажигания воспламенение сопровождается интенсивным теплоотводом к холодной смеси и окружающим поверхностям. Поэтому в очаге зажигания требуется обеспечить значительно более высокую температуру, по сравнению с теоретической температурой воспламенения.

Технически и конструктивно зажигание обеспечивается запальником (электроразрядник, раскаленная спираль, специальная небольшая горелка), находящимся поблизости от места вылета газа или газовоздушной смеси (в зависимости от конструкции горелки) в топочное устройство или в открытое пространство (как в случае бытовых газовых плит). После воспламенения запальник удаляется или выключается, а устойчивое горение поддерживается за

счет очень сложного процесса, который определяется терминами распространения и стабилизации пламени.

8 Горение в неподвижной среде

8.1 Нормальная скорость распространения пламени

Чтобы характеристики газов, имеющие принципиальное значение для эффективности и безопасности сжигания топлива, можно было сравнивать независимо от условий эксперимента, было введено понятие нормальной скорости распространения пламени в газовоздушной смеси.

Нормальной скоростью распространения пламени называется скорость относительно холодной, еще не воспламенившейся смеси, с которой фронт пламени перемещается в направлении, перпендикулярном к его поверхности.

Действительный фронт пламени можно заменить (рисунок 8.1) плоскостью, равной поперечному сечению канала диаметром r, м, перпендикулярному к его оси (в действительности фронт пламени существенно искривлен). Если равномерная скорость пламени составляет $u_р$, м/с, то нормальную скорость распространения пламени $u_н$, м/с, можно определить по выражению

$$u_{\text{н}} = u_{\text{р}} \frac{\pi r^2}{S}, \qquad (8.1)$$

в котором S − фактическая площадь поверхности искривленного фронта пламени, м^2 , определяемая методом фотографирования и последующих геометрических расчетов.

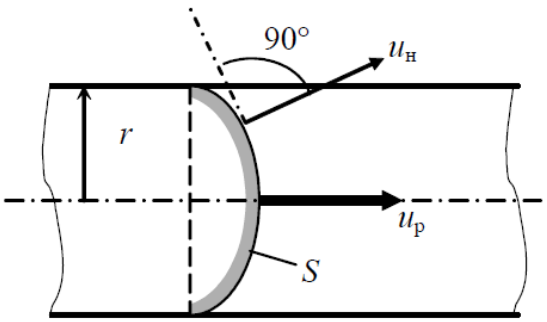

Рисунок 8.1 – К понятию нормальной скорости распространения пламени

Поскольку поверхность искривленного фронта пламени всегда больше геометрической поверхности поперечного сечения канала, нормальная скорость

всегда меньше, чем равномерная скорость распространения пламени. Например, для метана в трубке диаметром 5 см равномерная скорость распространения пламени может в 3…6 раз превышать нормальную скорость. Нормальная скорость является, прежде всего, характеристикой горючего газа. Значения нормальной скорости распространения пламени для чистых газов в смеси с воздухом приведены в таблице 8.1. В таблице приведено также содержание газа, соответствующее максимальной скорости, и аналогичные характеристики для стехиометрического состава смеси. Скорость распространения пламени в смеси с кислородом всегда значительно выше. Например, для метан-кислородной смеси − 3,3 м/с (в смеси с воздухом только 0,37 м/с), а для пропан-кислородной − 3,6 м/с (с воздухом − 0,38 м/с).

Таблица 8.1− Значения максимальной нормальной скорости распространения пламени в газовоздушных смесях при t =20ºС и р =101325 Па

Газ	Содержание газа в газовоздушной смеси, % об.		Максимальная нормальная скорость распространения пламени, м/с	
	Стехиометрическая смесь	Смесь с максимальной скоростью распространения пламени	Для стехиометрической смеси	Для смеси с максимальной скоростью распространения пламени
Водород	29,5	42,0	1,6	2,67
Оксид углерода				0,4[illegible]
Метан				0,3[illegible]
Этан				0,40
Пропан				0,38
n-бутан	3,14	3,3	0,30	0,37
Эт[illegible]				[illegible]
Пр[illegible]				[illegible]
Бу[illegible]				[illegible],43
Ан[illegible]				[illegible],35

Для сложных газообразных топлив содержание газа в смеси C^{max}, % об., соответствующее максимальной скорости распространения пламени, определяется по правилу аддитивности. По этому же принципу определяется значение максимальной нормальной скорости распространения пламени $u_н^{max}$, м/с, для газа, состоящего из нескольких компонентов.

$$C^{\max} = \frac{r_1 + r_2 + \cdots + r_n}{\frac{r_1}{C_1^{\max}} + \frac{r_2}{C_2^{\max}} + \cdots + \frac{r_n}{C_n^{\max}}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} r_i}{\sum_{i=1}^{n} \frac{r_i}{C_i^{\max}}}, \quad (8.2)$$

$$u_н^{\max} = C^{\max} \frac{\frac{r_1}{C_1^{\max}} u_{н1} + \frac{r_2}{C_2^{\max}} u_{н2} + \cdots + \frac{r_n}{C_n^{\max}} u_{нn}}{r_1 + r_2 + \cdots + r_n} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{r_i}{C_i^{\max}} u_{нi}}{\sum_{i=1}^{n} r_i}, \quad (8.3)$$

где r_i − содержание отдельных компонентов, % об., в составе газообразного топлива, при этом $\sum_{i=1}^{n} r_i$ =100%; C_i^{max} − содержание отдельных компонентов с сложном газе, % об., соответствующее максимальному значению нормальной скорости распространения пламени (по табл. 8.1); $u_{нi}$ − максимальное

значение нормальной скорости распространения пламени, м/с, для отдельных горючих компонентов сложного газа в смеси с воздухом (по табл. 8.1).

Выражения (8.2) и (8.3) строго справедливы в случае, если все компоненты, входящие в состав сложного газа, имеют одинаковую химическую природу (сюда относятся природные и сжиженные газы любого состава). Для смесей природных и искусственных газов они дают только приближенный результат.

Непригодны они также для газов, содержащих значительные количества балластных примесей (азота и двуокиси углерода), которые снижают скорость распространения пламени. Для забалластированных газов, при известном содержании N_2 и CO_2, % об., нормальную скорость распространения пламени $u_н^б$, м/с, следует скорректировать по выражению

$$u_н^б = u_н^{max}\left(1 - 0{,}01N_2 - 0{,}012CO_2\right). \qquad (8.4)$$

Значительное влияние на скорость распространения пламени оказывает предварительный подогрев газовоздушной смеси. По экспериментальным данным значение нормальной скорости $u_н^{T2}$ при абсолютной температуре смеси T_2 можно приблизительно определено по квадратичной зависимости

$$u_н^{T_2} = u_н^{293}\left(\frac{T_2}{293}\right)^2, \qquad (8.5)$$

в которой значение нормальной скорости распространения пламени $u_н^{293}$ для температуры 20ºС принимается по таблице 8.1.

Поскольку при предварительном подогреве смеси ее плотность уменьшается обратно пропорционально абсолютное температуре, а скорость распространения пламени в соответствии с (8.5) растет пропорционально ее квадрату, то так называемая массовая скорость потока ($u_н\rho$) растет пропорционально абсолютное температуре. Это обстоятельство необходимо учитывать при расчете газовых горелок, работающих на гомогенной смеси, особенно в тех случаях, когда огневые каналы расположены в нагретой кладке, где на них воздействует излучение топки, шамотной горки, раскаленных газов и т.п.

П р и м е р:

Определить максимальную нормальную скорость распространения пламени для сложного газа в смеси с воздухом. Состав газа, % об.: CH_4 = 85,0; C_2H_6 = 5,0; CO_2 = 3,0; N_2 = 7,0.

Решение

1. Горючая часть газа составляет:

100 – (3 + 7) = 90 % об.

2. Состав горючей части газа без учета балласта:

$$CH_4 = \frac{85}{90}100 = 94{,}4\ ;\ C_2H_6 = \frac{5}{90}100 = 5{,}6\ .$$

3. Содержание горючей части в смеси с воздухом, имеющей максимальную скорость распространения пламени определим по выражению (8.2), используя данные табл. 8.1:

$$C^{\max} = \frac{94{,}4 + 5{,}6}{\frac{94{,}4}{10{,}5} + \frac{5{,}6}{6{,}3}} \cong 10\ \ \%.$$

4. Максимальную нормальную скорость распространения пламени для смеси горючей части газа с воздухом определим по выражению (8.3), используя данные табл. 8.1:

$$u_{\text{н}}^{\max} = 10\frac{\frac{94}{10{,}5}3{,}7 + \frac{5{,}6}{6{,}3}0{,}4}{94{,}4 + 5{,}6} = 0{,}375\ \ \text{м/с}.$$

5. Максимальную нормальную скорость распространения пламени в газовоздушной смеси с учетом содержания балластных примесей определим по выражению (8.4):

$$u_{\text{н}}^{\text{б}} = 0{,}375\left(1 - 0{,}01\cdot 7 - 0{,}012\cdot 3\right) = 0{,}34\ \ \text{м/с}.$$

9 Устойчивость горения

<u>Под устойчивостью горения</u> понимают постоянство местонахождения пламени относительно огневых отверстий горелки, обеспечиваемое равенством

нормальной скорости распространения пламени и противоположно направленной нормальной составляющей скорости потока газовоздушной смеси.

При ламинарном истечении наиболее устойчивой является часть пламени, примыкающая к кромкам огневых отверстий, так как в краевых слоях потока скорости истечения смеси, уменьшенной торможением о стенки огневых каналов, соответствует пониженная за счет охлаждения теми же стенками скорость распространения пламени. Благодаря этому у основания факела создается огневой зажигательный поясок, стабилизирующий процесс горения в определенном диапазоне расхода смеси.

С увеличением расхода смеси ламинарный режим переходит в турбулентный, зажигательный поясок «размывается», устойчивость горения нарушается и пламя отрывается от горелки. Наоборот, с уменьшением расхода скорость распространения пламени в пристенной зоне потока может превысить скорость истечения смеси и пламя втягивается внутрь горелки. *Первое явление называют отрывом, второе − проскоком или обратным ударом пламени.*

При полном отрыве пламя гаснет, а при частичном − занимает относительно устойчивое положение на некотором расстоянии от горелки. Отрыв пламени в любом виде недопустим, так как при полном отрыве несгоревший газ, а при частичном − продукты незавершенного горения могут образовать в окружающей атмосфере или топке взрывоопасные или токсичные смеси. Отрыв пламени возможен при увеличении давления газа перед горелкой сверх допустимых пределов, чрезмерном увеличении разрежения в топке, обеднении газовоздушной смеси воздухом, сопровождающемся уменьшением скорости распространения пламени, и по другим причинам. Отрыв пламени зависит от диаметров огневых отверстий и содержания первичного воздуха в смеси.

С увеличением диаметров огневых отверстий увеличивается скорость истечения смеси, при которой происходит отрыв пламени. Увеличение содержания первичного воздуха в смеси (т.е. воздуха, поступающего в горелку) приводит к снижению скорости отрыва пламени.

Проскок пламени происходит, когда скорость истечения газовоздушной смеси становится меньше скорости распространения пламени (у инжекционных горелок, например, при уменьшении давления газа ниже расчетного предела). В этом случае пламя может погаснуть, обычно с хлопком, или переместиться в смеситель горелки, перегревая его и препятствуя притоку первичного воздуха.

Проскок пламени недопустим, так как приводит к истечению из горелки несгоревшего газа или продуктов незавершенного горения, а также перегреву горелки.

Таким образом, пределы устойчивой работы горелок ограничиваются скоростями отрыва и проскока пламени.

10 Принципы стабилизации пламени

В соответствии с общим принципом расширения диапазона устойчивого горения любых горючих газовоздушных смесей скорость потока принимается в несколько раз больше скорости отрыва пламени, чтобы гарантировать отсутствие опасности проскока пламени на любых нагрузках. Однако такие высокие скорости вылета требуют применения специальной *искусственной стабилизации пламени*, предотвращающей его отрыв. Наиболее распространенные способы стабилизации пламени в технике иллюстрирует рисунок 10.1.

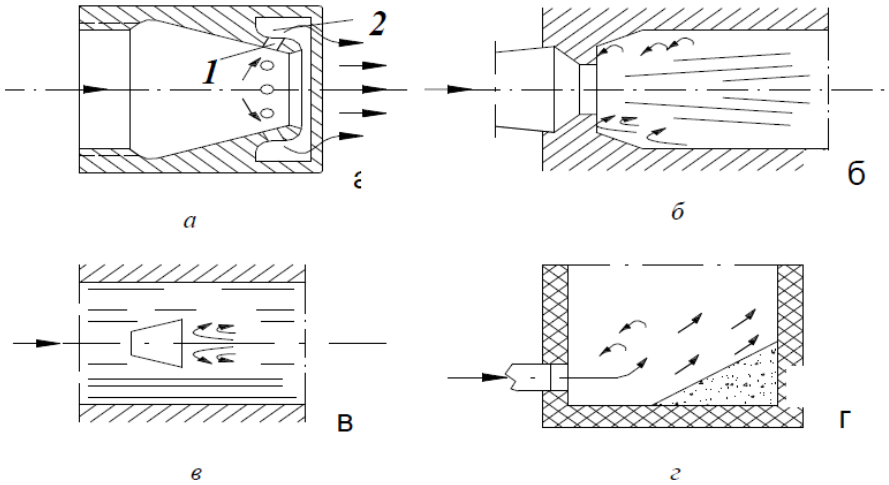

Рисунок 10.1 − Схемы стабилизаторов горения в отношении отрыва пламени: *а* − кольцевой стабилизатор; *б* − стабилизирующий туннель; *в* − центральный конический стабилизатор; *г* − шамотная горка

В стабилизаторе, показанном на рис. 10.1, *а*, часть газовоздушной смеси (5…10 % ее общего расхода) через отверстия *1* отводятся в кольцевой канал 2, окружающий головку инжекционной горелки. Благодаря соответствующему подбору геометрических размеров вокруг главного факела образуется спокойное устойчивое кольцевое пламя. Например, для природных и сжиженных газов этот диаметр составляет 2…3 мм.

Еще более надежную стабилизацию в отношении отрыва пламени обеспечивают туннели из огнеупорных материалов (рис. 10.1, *б*). Это могут быть керамические туннели заводского изготовления. Стабилизирующее действие туннеля основано на рециркуляции части потока образовавшихся раскаленных продуктов сгорания к корню факела в месте возникновения области разрежения при резком расширении струи.

В тех случаях, когда установка кольцевых стабилизаторов и расширяющихся туннелей невозможна или нежелательна, применяются стабилизаторы в виде плохообтекаемых тел (трапециевидные, конусные, U-образные), размещаемые в центральной части потока горящей смеси (рис.10.1, *в*). Их стабилизирующее действие, как и в случае туннелей, заключается в рециркуляции раскаленных продуктов сгорания к месту истечения газовоздушной смеси (к корню факела).

В некоторых случаях стабилизацию горения в топке устройства обеспечивают наиболее дешевым способом − в виде шамотной горки (наброски), размещаемой в топке в непосредственной близости от амбразуры горелки (рис. 10.1, *г*). Этот способ характерен для камерных топок, работающих без отвода теплоты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брюханов О. Н., Жила В. А., Плужников А. И. Газоснабжение: изд. Академия, 2008 – 448 с.

2. Газовые топлива и их компоненты. Свойства, получение, применение, экология: справочник / В.Н. Бакулин, Е.М. Брещенко, Н.Ф. Дубовкин, О.Н. Фаворский. - М.: Издательский дом МЭИ, 2009. - 614 с.

3. Газоснабжение. Горение газов : учеб. пособие / Г.П. Комина, А.Л. Шкаровский, Е.Е. Мариненко ; Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т. − Волгоград : ВолгГАСУ, 2010. − 124 с.