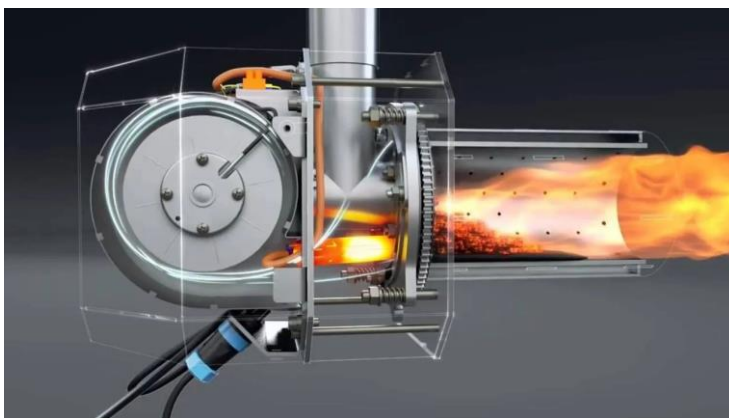


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова

Б.М. Гришко, П.А. Трубаев

# ПРАКТИКУМ

## ПО РАСЧЕТУ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА



Белгород 2020

УДК 662.61(075)  
ББК 31.35  
Г 85

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор Белгородского государственного  
технологического университета В.Г. Шухова П.В. Беседин

Кандидат технических наук, эксперт ООО «Энергоэффективность и  
энергосбережение» О.А. Рязанцев

**Гришко Б.М.**

Г85 Практикум по расчету горения топлива: Учеб. пособие / Б. М.  
Гришко, П. А. Трубаев. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2020. – 70 с.

В издании рассмотрены расчет количество воздуха, необходимого для горения, расчет состава продуктов сгорания, определение характеристик процесса горения по известному составу отходящих газов, расчет температуры горения. В издании содержатся необходимые справочные материалы, приведены примеры расчетов и контрольные задания.

Предназначено в качестве учебного и справочного пособия для студентов направления 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» при изучении дисциплин «Источники энергии теплоэнергетики», «Топливо и его сжигание».

Ил. 4. Табл. 19. Библиогр. назв. 4.

УДК 662.61(075)  
ББК 31.35

© Б.М. Гришко, П.А. Трубаев, 2020  
© БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020



# Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>6</b>
<b>1. Состав топлива, пересчет состава топлива с одной массы на другую .....</b>	<b>10</b>
Основные понятия и расчетные формулы .....	10
Пример 1. Перевод горючей массы топлива на рабочую .....	12
Пример 2. Расчет рабочей массы топлива при заданном составе топлива на горючую массу; зольности - на сухую; влажности - на рабочую .....	13
Пример 3. Расчет состава рабочей массы топлива при изменении влажности топлива .....	14
Пример 4. Расчет плотности природного газа .....	14
<b>Контрольное задание № 1 .....</b>	<b>15</b>
<b>2. Теплота сгорания топлива .....</b>	<b>16</b>
Основные понятия и расчетные формулы .....	16
Пример 5. Расчет теплоты сгорания рабочей массы топлива .....	17
Пример 6. Расчет теплоты сгорания рабочей массы топлива при изменении влажности .....	17
Пример 7. Расчет теплоты сгорания газообразного топлива .....	18
<b>Контрольное задание № 2 .....</b>	<b>19</b>
<b>3. Расчет теоретических объемов воздуха и продуктов сгорания для твердого и жидкого топлива .....</b>	<b>20</b>
Основные расчетные формулы .....	20
Пример 8. Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания по составу твердого топлива .....	21
Пример 9. Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания по составу мазута .....	22
Пример 10. Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания по составу дров .....	23
<b>Контрольное задание № 3 .....</b>	<b>24</b>
<b>4. Расчет теоретических объемов воздуха и продуктов сгорания для газообразного топлива .....</b>	<b>25</b>
Основные расчетные формулы .....	25
Пример 11. Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания по составу природного газа .....	27
<b>Контрольное задание № 4 .....</b>	<b>27</b>
<b>5. Расчет коэффициента избытка воздуха .....</b>	<b>28</b>
Основные расчетные формулы .....	28
Пример 12. Расчет коэффициента избытка воздуха при полном сгорании топлива .....	33
Пример 13. Расчет коэффициента избытка воздуха при наличии недожога .....	34
Пример 14. Расчет коэффициента избытка воздуха по содержанию в продуктах сгорания $O_2$ и $CO$ .....	35
<b>Контрольное задание № 5 .....</b>	<b>35</b>

<b>6. Расчет действительных объемов воздуха и продуктов сгорания .</b>	<b>36</b>
Основные расчетные формулы .....	36
Пример 15. Расчет количество воздуха, необходимого на горение, и объема продуктов сгорания для природного газа .....	38
<b>Контрольное задание № 6.....</b>	<b>40</b>
<b>7. Основное уравнение горения.....</b>	<b>41</b>
Основные понятия и расчетные формулы .....	41
Пример 16. Определение коэффициента избытка воздуха по уравнению газового анализа при неполном сгорании топлива .....	42
Пример 17. Определение коэффициента избытка воздуха по уравнению газового анализа при полном сгорании топлива .....	43
<b>Контрольное задание № 7.....</b>	<b>43</b>
<b>8. Определение коэффициента использования природного газа .....</b>	<b>44</b>
Основные понятия и расчетные формулы .....	44
Пример 18. Расчет коэффициента использования топлива при неполном сгорании топлива .....	47
Пример 19. Расчет коэффициента использования при полном сгорании топлива .....	47
Пример 20. Расчет коэффициента использования по данным полного газового анализа и коэффициенту $h$ .....	48
Пример 21. Расчет коэффициента использования по данным полного газового анализа.....	48
<b>Контрольное задание № 8.....</b>	<b>48</b>
<b>9. Калориметрическая температура горения.</b>	
<b>Жаропроизводительность топлива .....</b>	<b>49</b>
Основные понятия и расчетные формулы .....	49
Пример 22. Расчет калориметрической температуры горения балансовым методом.....	53
Пример 23. Упрощенный расчет жаропроизводительности пропана.....	55
Пример 24. Определение калориметрической теплоты сгорания природного газа упрощенными методами.....	56
<b>Контрольное задание № 9.....</b>	<b>57</b>
<b>10. Определение теоретической температуры горения .....</b>	<b>58</b>
Основные понятия и расчетные формулы .....	58
Пример 25. Расчет теоретической температуры горения метана .....	61
<b>Контрольное задание № 10.....</b>	<b>62</b>
<b>11. Определение расчетной температуры горения.....</b>	<b>63</b>
Основные понятия и расчетные формулы .....	63
<b>Контрольное задание № 11 .....</b>	<b>63</b>
<b>12. Расчет объема продуктов сгорания по их составу .....</b>	<b>64</b>
Основные понятия и расчетные формулы .....	64

Пример 26. Определение объёма продуктов сгорания мазута по содержанию $\text{RO}_2$ и $\text{CO}$ .....	65
Пример 27. Определение объёма продуктов сгорания природного газа по содержанию $\text{RO}_2$ и горючих газов.....	65
<b>Контрольное задание № 12 .....</b>	<b>66</b>
<b>13. Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания при совместном сжигании нескольких видов топлива .....</b>	<b>67</b>
Основные понятия и расчетные формулы .....	67
<b>Контрольное задание № 13 .....</b>	<b>68</b>
<b>Библиографический список .....</b>	<b>69</b>

## Введение

Топливом называют вещество, способное выделять энергию в ходе определённых процессов (химических или ядерных реакций), которую можно использовать для технических целей. Органическое (или химическое) топливо – это горючий материал, который вступая в химическую реакцию с окислителем, выделяет в процессе горения теплоту.

Органическое топливо бывает трех видов:

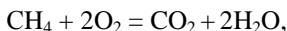
- 1) твердое (бурые и каменные угли, антрацит, торф, древесина, горючие сланцы, кокс, сельскохозяйственные и бытовые отходы и др.);
- 2) жидкое (мазут, дизельное топливо, бензин и др.);
- 3) газообразное (природный газ, генераторный, доменный, коксовый и др. искусственные газы).

### Материальный баланс процесса горения

Основными горючими химическими элементами в топливе является углерод С и водород Н. При их соединении с окислителем, которым в большинстве случаев является кислород, образуются углекислый газ  $\text{CO}_2$  и водяные пары  $\text{H}_2\text{O}$ . Если в топливе присутствует горючая сера, то при сгорании топлива так же образуется двуокись серы  $\text{SO}_2$ . Так как в качестве окислителя используется кислород воздуха, то в состав продуктов сгорания переходит азот, входящий в состав атмосферного воздуха, и азот, содержащийся в топливе.

Если на горение подается столько воздуха, сколько необходимо для полного сгорания топлива без остатка кислорода (теоретический объем воздуха, необходимый для горения), такое соотношение называют стехиометрическим, и теоретический состав продуктов сгорания состоит из  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$  и, при наличии в топливе горючей серы,  $\text{SO}_2$ .

Химическое уравнение горения метана  $\text{CH}_4$ , из которого на 90-98% состоит природный газ, следующее:



то есть для сжигания  $1 \text{ м}^3$  метана требуется  $2 \text{ м}^3$  кислорода, а продукты сгорания содержат  $1 \text{ м}^3 \text{ CO}_2$  и  $2 \text{ м}^3 \text{ H}_2\text{O}$ . Основные компоненты воздуха – 21% кислорода  $\text{O}_2$  и 79% азота  $\text{N}_2$  (по объему). Поэтому  $2 \text{ м}^3$  кислорода содержится в  $2/0,21 = 9,52 \text{ м}^3$  воздуха. Таким образом в продуктах сгорания метана при стехиометрическом соотношении содержится:

$\text{CO}_2$  .....  $1 \text{ м}^3$  (9,5 объемных %);

$\text{H}_2\text{O}$  .....  $2 \text{ м}^3$  (19,0 объемных %);

$\text{N}_2$  .....  $0,79 \cdot 9,52 = 7,52 \text{ м}^3$  (71,5 объемных %).

При определении фактического состава продуктов сгорания с помощью специальных приборов – газоанализаторов определяется состав

сухих газов, их состав при стехиометрическом соотношении объемов топлива и воздуха:

CO<sub>2</sub> ..... 1 м<sup>3</sup> (11,8 объемных %);  
N<sub>2</sub> ..... 7,52 м<sup>3</sup> (88,2 объемных %).

Величина 11,8% – это максимальное содержание углекислого газа CO<sub>2max</sub> при сжигании природного газа, состоящего в основном из метана.

В состав горючей массы твердого и жидкого топлива входят сложные органические соединения, на 50-90% состоящих из углерода С. Так же в горючей части топлива присутствует водород Н, кислород О, азот N и сера S.

На практике для обеспечения полного сгорания топлива объем воздуха, подаваемого на горение (действительный объем воздуха), всегда немного больше теоретического объёма. Лишний кислород, не вступивший в реакцию и присутствующий в продуктах сгорания, называется избыточным. Действительный состав продуктов полного сгорания (рис. 1) состоит из CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub> (при наличии в топливе горючей серы).

Сумму содержания двуокиси углерода и серы обозначают как RO<sub>2</sub>.

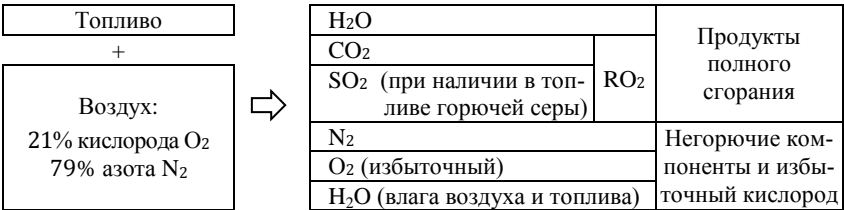


Рис. 1. Процесс горения топлива

Отношение действительного объема воздуха, подаваемого на горение, V<sub>в</sub> к теоретическому объёму, необходимому для полного сгорания топлива в стехиометрическом соотношении V<sub>в</sub><sup>0</sup>, называется коэффициентом избытка воздуха α

$$\alpha = \frac{V_{\text{в}}}{V_{\text{в}}^0}. \tag{1}$$

При увеличении значения α за счет их разбавления избыточным воздухом увеличивается объем продуктов сгорания, что приводит к увеличению потерь теплоты с уходящими газами и снижению теплового КПД топливоиспользующей установки, снижению температуры горения. Обычно при сжигании топлива в высокотемпературных установках поддерживают α = 1,05...1,06 для природного газа и α = 1,2 для твердого пылевидного топлива.



Если топливо сгорает не полностью, то часть углерода окисляется не до углекислого газа  $\text{CO}_2$ , а до оксида углерода (угарного газа)  $\text{CO}$ . По содержанию в продуктах сгорания  $\text{CO}$ , измеряемого с помощью газоанализаторов, определяют степень недожога топлива.

### Температура горения

Температура горения – это температура, до которой нагреваются продукты сгорания. Температуру горения для реальных условий (действительную) можно определить из теплового баланса:

$$Q_{\text{н}}^{\text{p}} + Q_{\text{ф.т}} + Q_{\text{ф.в}} = Q_{\text{п.г}} + Q_{\text{пот}} + Q_{\text{дисс}},$$

где  $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$  – низшая теплота сгорания топлива;  $Q_{\text{ф.т}}$  и  $Q_{\text{ф.в}}$  – физическая теплота (энтальпия) топлива и воздуха, подаваемых на горение;  $Q_{\text{п.г}}$  – энтальпия продуктов сгорания;  $Q_{\text{пот}}$  – потери теплоты в окружающую среду, связанные с недожогом топлива и др.;  $Q_{\text{дисс}}$  – теплота, затрачиваемая на диссоциацию трехатомных газов (разложение на более простые составляющие при высоких температурах, обратимое при охлаждении, для находящихся в продуктах сгорания  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  имеет место при температурах свыше  $1700^\circ\text{C}$ ).

Так как энтальпия продуктов сгорания определяется через их удельную объемную теплоемкость  $c_{\text{п.г}}$ , объем  $V_{\text{п.г}}$  и температуру  $t$

$$Q_{\text{п.г}} = c_{\text{п.г}} V_{\text{п.г}} t,$$

то расчетная (действительная) температура горения может быть определена по выражению:

$$t_{\text{расч}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}} + Q_{\text{ф.т}} + Q_{\text{ф.в}} - Q_{\text{пот}} - Q_{\text{дисс}}}{c_{\text{п.г}} V_{\text{п.г}}}. \quad (2)$$

Для сравнения различных топлив и технических расчетов применяют так же следующие характеристики:

– теоретическая температура горения определяется с учетом диссоциации, но без учета потерь теплоты:

$$t_{\text{теор}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}} + Q_{\text{ф.т}} + Q_{\text{ф.в}} - Q_{\text{дисс}}}{c'_{\text{п.г}} V'_{\text{п.г}}} \approx \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}} - Q_{\text{дисс}}}{c'_{\text{п.г}} V'_{\text{п.г}}}, \quad (3)$$

где  $c'_{\text{п.г}} V'_{\text{п.г}}$  – теплоемкость и объем продуктов сгорания с учетом диссоциации трехатомных газов;

– калориметрическая температура горения рассчитывается без учета потерь теплоты и диссоциации:

$$t_{\text{кал}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}} + Q_{\text{ф.т}} + Q_{\text{ф.в}}}{c_{\text{п.г}} V_{\text{п.г}}}; \quad (4)$$

– максимальная температура горения топлива (жаропроизводительность) определяется при условии стехиометрического сжигания топлива при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1$ , температуре топлива и воздуха, подаваемым на горение, равном  $0^{\circ}\text{C}$  и без учета потерь и диссоциации по формуле:

$$t_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}}}{c_{\text{п.г}} V_{\text{п.г}}^0}. \quad (5)$$

Особенность расчета по выражениям (3)–(6) состоит в том, что удельная теплоемкость  $c_{\text{п.г}}$  и теплота диссоциации  $Q_{\text{дисс}}$  зависит от определяемой температуры горения. Поэтому температуру находят итерационным способом. Сначала задается первое приближение – значение примерное значение температуры, и по ней определяется удельная теплоемкость продуктов сгорания и теплоты диссоциации. Затем рассчитывается температура горения и сравнивается с принятым значением. Если отклонение большое, удельная теплоемкость продуктов сгорания и теплота диссоциации определяется при новой температуре и расчет повторяется. Вычисления прекращаются, когда отличие значений температур на текущем и предыдущем шаге становятся незначительными.

### **Цель расчета горения**

Цель расчетов горения топлива следующая:

- определить необходимое количество воздуха для горения;
- определить состав продуктов сгорания;
- определить характеристики процесса горения по известному составу отходящих газов;
- рассчитать температуру горения.

Известны два метода расчета горения топлива:

I метод – по составу топлива и заданному коэффициенту избытка воздуха. Этот метод используется при проектировании топливоиспользующих установок.

II метод – по данным газового анализа с учетом состава топлива. Метод используется при проведении теплотехнических испытаний для оценки эффективности работы печей и котлов, и работ, проводимых при наладке топливоиспользующих установок.

# 1. СОСТАВ ТОПЛИВА, ПЕРЕСЧЕТ СОСТАВА ТОПЛИВА С ОДНОЙ МАССЫ НА ДРУГУЮ

## Основные понятия и расчетные формулы

Состав твердого и жидкого топлива выражают в процентах по массе, а газообразного – по объему.

**В твердом топливе** различают органическую, горючую, сухую и рабочую массы (рис. 2).

Индекс	Горючая часть						Балласт	
	Углерод С	Кислород О	Водород Н	Азот N	Сера органическая S	Сера пиритная S	Зола А	Влага W
о	Органическая масса							
г	Горючая масса							
с	Сухая масса							
р	Рабочая масса							

**Рис. 2. Масса и состав твердого и жидкого топлив**

*Органическая масса* состоит из углерода, кислорода, водорода, серы и азота, входящих в состав органических соединений:

$$C^o + O^o + H^o + S^o + N^o = 100\%.$$

*Горючая масса*, близкая по составу к органической массе отличается от последней наличием колчеданной, или пиритной, серы, входящей в состав сернистого колчедана ( $F_2S$ ) и других сернистых соединений, окисляемых кислородом в процессе горения топлива:

$$C^r + O^r + H^r + S^r + N^r = 100\%.$$

*Сухая масса* состоит из горючих компонентов и минеральных веществ, образующих при сгорании топлива золу А:

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

Топливо в том виде, в каком оно поступает к потребителю, называется *рабочим*, а вещество, составляющее его, - *рабочей массой*.

*Рабочая масса* состоит из сухой массы и влаги W:

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

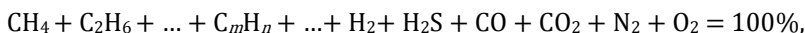
Состав горючей массы топлива в различных местах и в разных районах его месторождения является более постоянным, поэтому эти данные приводятся в справочной литературе. Минеральные примеси и влажность могут быть разными, а влагосодержание может изменяться при транспортировке и хранении топлива. Так как все теплотехнические расчеты производят на основании рабочей массы топлива, а в справочной литературе приводится горючая или сухая масса топлива, то приходится производить пересчет состава топлива с одной массы на другую. Для этого используют коэффициенты пересчета, приведенные в табл. 1.

*Таблица 1*

**Коэффициенты пересчета состава твердого топлива  
с одной массы на другую**

Заданная масса топлива	Искомая масса топлива		
	рабочая	сухая	горючая
рабочая	1	$\frac{100}{100 - W^p}$	$\frac{100}{100 - W^p - A^p}$
сухая	$\frac{100 - W^p}{100}$	1	$\frac{100}{100 - A^c}$
горючая	$\frac{100 - W^p - A^p}{100}$	$\frac{100 - A^p}{100}$	1

**Состав сухого газообразного топлива** выражается в процентном содержании газообразных компонентов по объему:



где  $n$  и  $m$  – количество атомов углерода и водорода, для предельных углеводородов ряда метана  $m = 2n + 2$ .

Плотность, молярная масса и теплота сгорания смеси газов определяется по аддитивному принципу через содержание и свойства компонентов. Например плотность смеси  $\rho$  рассчитывается через плотность компонентов  $\rho_i$  и объёмную долю компонентов  $r_i$ , %:

$$\rho = 0,01 \sum r_i \rho_i. \quad (7)$$

Свойства газов при нормальных условиях приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Свойства газов при нормальных условиях**

Газ	Химическая формула	Молярная масса М, кг/кмоль	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Теплота сгорания, МДж/м <sup>3</sup>	
				высшая $Q_v^p$	низшая $Q_n^p$
Метан	CH <sub>4</sub>	16,04	0,717	39,63	35,82
Этан	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,07	1,342	69,75	63,75
Пропан	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,10	1,967	99,30	91,30
Бутан	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,12	2,598	128	118
Пентан	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72,15	3,219	158,2	146
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,05	1,260	63	59,07
Пропилен	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42,09	1,915	92,1	86,01
Бутилен	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56,10	2,503	121,12	113,2
Пентен	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70,13	3,129	150,8	141
Бензол	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,11	3,485	146,1	140
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26,07	1,173	58	56
Водород	H <sub>2</sub>	2,02	0,09	12,72	10,8
Сероводород	H <sub>2</sub> S	34,08	1,539	25,85	23,65
Оксид углерода	CO	28,01	1,25	12,58	12,64
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	44,01	1,977	–	–
Азот	N <sub>2</sub>	28,01	1,250	–	–
Кислород	O <sub>2</sub>	32,00	1,428	–	–

**Пример 1. Перевод горючей массы топлива на рабочую**

Задан состав каменного угля на горючую массу, %:

$$C^r = 84,0; H^r = 4,5; N^r = 2,0; O^r = 9,0; S^r = 0,5.$$

Влажность и зольность приведены на рабочую массу, %:

$$W^p = 12,0; A^p = 11,4.$$

Перевод осуществляем по формуле:  $C^p = C^r \cdot K$ , где  $K$  – переводной коэффициент (приведен в табл. 1):

$$K = \frac{100 - W^p - A^p}{100} = \frac{100 - 12,0 - 11,4}{100} = 0,766.$$

Таким образом,

$$C^p = 84,0 \cdot 0,766 = 64,34\%; H^p = 3,45\%;$$

$$N^p = 1,53\%; O^p = 6,90\%; S^p = 0,38\%.$$

Проверяем сумму элементного состава рабочей массы топлива:

$$C^p + H^p + O^p + S^p + N^p + A^p + W^p = \\ 64,34 + 3,45 + 6,90 + 0,38 + 1,53 + 11,4 + 12,0 = 100\%.$$

**Пример 2. Расчет рабочей массы топлива при заданном составе топлива на горючую массу; зольности - на сухую; влажности - на рабочую**

Задан состав каменного угля на горючую массу, %:

$$C^r = 80,2; H^r = 3,3; N^r = 2,1; O^r = 14,0; S^r = 0,4.$$

Зольность топлива приведена на сухую массу:  $A^c = 22,12\%$ ; влажность топлива – на рабочую  $W^p = 15,0\%$ .

Переводим зольность топлива приведенную на сухую массу топлива – на рабочую по формуле:

$$A^p = A^c \cdot K_{c-p} = 22,12 \cdot 0,85 = 18,80\%,$$

где  $K_{c-p}$  – переводной коэффициент:

$$K_{c-p} = \frac{100 - W^p}{100} = \frac{100 - 15,0}{100} = 0,85.$$

Перевод каждого элемента топлива с горючей массы на рабочую осуществляем по формуле:

$$C^p = C^r \cdot K_{r-p},$$

где  $K_{r-p}$  – переводной коэффициент (табл. 1):

$$K_{r-p} = \frac{100 - W^p - A^p}{100} = \frac{100 - 15 - 18,8}{100} = 0,662.$$

Таким образом:

$$C^p = 53,09; H^p = 2,18; N^p = 1,39; O^p = 9,27; S^p = 0,27\%.$$

Проверяем сумму элементного состава рабочей массы топлива:

$$C^p + H^p + O^p + S^p + N^p + A^p + W^p = \\ = 53,09 + 2,18 + 9,27 + 0,27 + 1,39 + 18,8 + 15,0 = 100\%.$$

### Пример 3. Расчет состава рабочей массы топлива при изменении влажности топлива

Каменный уголь следующего состава на рабочую массу топлива:

$$C^p = 44,3\%; H^p = 3,0\%; N^p = 0,4\%; O^p = 14,4\%; S^p = 0,2\%;$$

$$A^p = 4,7\%; W^p = 33\%,$$

подсушивают до влажности  $W_2^p = 10\%$ .

Для определения элементного состава подсушенного топлива значение каждого элемента  $C^p$ ,  $O^p$ ,  $H^p$ ,  $S^p$ ,  $N^p$ , и зольности топлива  $A^p$  при начальной влажности умножаем на коэффициент  $K$ :

$$K = \frac{100 - W_2^p}{100 - W^p} = \frac{100 - 10}{100 - 33} = 1,343.$$

Таким образом, получаем:

$$C^p = 59,5; H^p = 4,0; N^p = 0,55; O^p = 19,35; S^p = 0,3; A^p = 6,3\%.$$

Проверяем сумму элементного состава рабочей массы подсушенного топлива до влажности  $W^{p'} = 10\%$ :

$$\begin{aligned} & C^p + H^p + O^p + S^p + N^p + A^p + W^p = \\ & = 59,5 + 4,0 + 19,35 + 0,3 + 0,55 + 6,3 + 10,0 = 100\%. \end{aligned}$$

### Пример 4. Расчет плотности природного газа

Природный газ имеет объёмный состав:

$$CH_4 = 92\%; C_2H_6 = 2\%; C_3H_8 = 1,5\%;$$

$$H_2S = 0,4\%; CO_2 = 2\%; N_2 = 2,1\%.$$

Плотность смеси определяется по аддитивной формуле (плотность компонентов принята согласно табл. 2):

$$\begin{aligned} \rho &= 0,01 \sum r_i \rho_i = 0,01(CH_4 \cdot \rho_{CH_4} + C_2H_6 \cdot \rho_{C_2H_6} + C_3H_8 \cdot \rho_{C_3H_8} + \\ &+ H_2S \cdot \rho_{H_2S} + CO_2 \cdot \rho_{CO_2} + N_2 \cdot \rho_{N_2} = \\ &= 0,01(92 \cdot 0,717 + 2 \cdot 1,342 + 1,5 \cdot 1,967 + 0,4 \cdot 1,539 + \\ &+ 2 \cdot 1,977 + 2,1 \cdot 1,25) = 0,788 \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

## Контрольное задание № 1

Задан состав каменного угля на горючую массу топлива, %:  $C^r$ ,  $O^r$ ,  $H^r$ ,  $S^r$ ,  $N^r$ , зольность приведена на сухую массу  $A^c$ , влажность на рабочую массу  $W_1^p$  (табл 3). Определить состав топлива на рабочую массу топлива при влажности  $W_1^p$ , и подсушенного топлива при влажности  $W_2^p$ .

Таблица 3

### Варианты задания

№	Состав каменного угля, %							
	$C^r$	$H^r$	$N^r$	$O^r$	$S^r$	$A^c$	$W_1^p$	$W_2^p$
1	76,0	5,5	1,6	11,7	5,2	17,5	13,0	5,0
2	80,5	5,4	1,5	8,2	4,4	18,0	7,0	3,0
3	84,0	5,2	1,5	5,7	3,6	19,5	5,0	2,0
4	87,0	4,8	1,5	3,1	3,6	19,0	5,0	2,0
5	88,5	4,5	1,5	2,5	3,0	19,5	4,5	2,0
6	89,5	4,2	1,5	1,4	3,4	18,0	5,0	2,0
7	74,0	5,0	2,0	15,4	3,6	28,0	11,0	4,0
8	85,5	5,3	2,3	5,9	1,0	19,0	5,0	2,0
9	78,4	5,6	1,3	7,7	7,0	27,0	5,0	2,0
10	85,7	5,2	1,1	7,0	1,0	26,0	7,0	3,0
11	84,0	5,1	1,3	8,7	0,9	22,0	8,0	4,0
12	78,5	5,3	1,5	13,3	1,4	40,0	8,0	4,0
13	82,0	5,0	1,5	10,7	0,8	38,0	7,0	3,0
14	77,5	5,2	1,0	14,0	2,3	18,0	15,0	6,0
15	79,0	5,0	1,2	13,6	1,2	14,0	15,0	6,0
16	78,5	6,0	1,6	11,4	2,5	40,0	11,0	4,0
17	76,5	5,7	1,5	14,2	2,1	31,0	13,0	5,0
18	78,5	5,6	2,3	13,2	0,4	9,0	11,0	4,0
19	82,0	5,8	2,6	9,1	0,5	10,0	7,5	3,0
20	84,5	5,5	2,5	6,8	0,7	20,0	5,5	2,0
21	90,5	4,2	2,0	2,8	0,5	13,0	7,0	2,0
22	91,0	4,3	2,0	2,1	0,6	15,0	7,0	2,0
23	78,5	5,5	1,0	14,3	0,7	10,0	12,0	5,0
24	82,0	5,5	1,0	10,8	0,7	14,0	7,0	3,0
25	82,5	5,3	1,4	10,1	0,7	31,0	5,0	2,0
26	85,5	5,2	1,4	7,3	0,6	22,0	6,0	2,0
27	90,0	4,2	1,0	4,1	0,7	24,0	5,0	2,0
28	84,0	5,2	1,5	5,7	3,6	18	15,0	5,0
29	87,0	4,8	1,5	3,1	3,6	18	15,0	5,0
30	76,0	5,5	1,6	11,7	5,2	17,5	13,0	5,0



## 2. ТЕПЛОТА СГОРАНИЯ ТОПЛИВА

### Основные понятия и расчетные формулы

Основной характеристикой органического топлива является его теплота сгорания, то есть количество теплоты, выделяющейся при полном сгорании единицы топлива (1 м<sup>3</sup> газообразного топлива или 1 кг твердого и жидкого топлива). Различают высшую и низшую теплоту сгорания.

*Высшая теплота сгорания* показывает, какое количество теплоты выделяется при полном сгорании единицы топлива при нормальных условиях включая теплоту конденсации водяных паров, содержащихся в продуктах сгорания (после сгорания происходит конденсация водяных паров в воду).

*Низшая теплота сгорания* показывает количество выделившейся теплоты без учета теплоты конденсации водяных паров (H<sub>2</sub>O в продуктах сгорания находится в виде водяных паров).

Если известен состав газового топлива, то его теплоту сгорания можно определить по аддитивной формуле с использованием содержания компонентов в об.% и теплоты сгорания компонентов (табл. 2):

– низшую теплоту сгорания, кДж/м<sup>3</sup>:

$$\begin{aligned} Q_{\text{н}}^{\text{p}} = & 10 \cdot (35,82 \cdot \text{CH}_4 + 63,75 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 91,30 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 118 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + \\ & + 146 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 59,07 \cdot \text{C}_2\text{H}_4 + 86,01 \cdot \text{C}_3\text{H}_6 + 113,2 \cdot \text{C}_4\text{H}_8 + \\ & + 141 \cdot \text{C}_5\text{H}_{10} + 140 \cdot \text{C}_6\text{H}_6 + 56 \cdot \text{C}_3\text{H}_2 + 10,8 \cdot \text{H}_2 + 23,65 \cdot \text{H}_2\text{S} + \\ & + 12,64 \cdot \text{CO}); \end{aligned} \quad (8)$$

– высшую теплоту сгорания, кДж/м<sup>3</sup>:

$$\begin{aligned} Q_{\text{в}}^{\text{p}} = & 10 \cdot (39,63 \cdot \text{CH}_4 + 69,75 \cdot \text{C}_2\text{H}_6 + 99,30 \cdot \text{C}_3\text{H}_8 + 128 \cdot \text{C}_4\text{H}_{10} + \\ & + 158,2 \cdot \text{C}_5\text{H}_{12} + 63 \cdot \text{C}_2\text{H}_4 + 92,1 \cdot \text{C}_3\text{H}_6 + 121,12 \cdot \text{C}_4\text{H}_8 + \\ & + 150,8 \cdot \text{C}_5\text{H}_{10} + 146,1 \cdot \text{C}_6\text{H}_6 + 58 \cdot \text{C}_3\text{H}_2 + 12,72 \cdot \text{H}_2 + \\ & + 25,85 \cdot \text{H}_2\text{S} + 12,58 \cdot \text{CO}). \end{aligned} \quad (9)$$

Если приведен состав твердого или жидкого топлива, то его теплоту сгорания, кДж/кг, можно определить по формуле предложенной Д.И. Менделеевым:

– низшую теплоту сгорания, кДж/кг:

$$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 339C^{\text{p}} + 1030H^{\text{p}} - 109(O^{\text{p}} - S^{\text{p}}) - 25,1W^{\text{p}}; \quad (10)$$

– высшую теплоту сгорания, кДж/кг:

$$Q_{\text{в}}^{\text{p}} = Q_{\text{н}}^{\text{p}} + 25,1(9\text{H}^{\text{p}} + W^{\text{p}}) = 339\text{C}^{\text{p}} + 1256\text{H}^{\text{p}} - 109(\text{O}^{\text{p}} - \text{S}^{\text{p}}). \quad (11)$$

При изменении влажности рабочего топлива от начальной  $W_1^{\text{p}}$  до конечной  $W_2^{\text{p}}$  для расчета теплоты сгорания используется зависимость:

$$Q_{\text{н2}}^{\text{p}} = (Q_{\text{н1}}^{\text{p}} + 25,1W_1^{\text{p}}) \frac{100 - W_2^{\text{p}}}{100 - W_1^{\text{p}}} - 25,1W_2^{\text{p}}. \quad (12)$$

Если задан состав топлива на горючую массу, то для определения низшей теплоты сгорания используется формула, кДж/кг:

$$Q_{\text{н}}^{\text{r}} = 339\text{C}^{\text{r}} + 1030\text{H}^{\text{r}} - 109(\text{O}^{\text{r}} - \text{S}^{\text{r}}), \quad (13)$$

и для пересчета на рабочую теплоту сгорания, кДж/кг:

$$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = Q_{\text{н}}^{\text{r}} \frac{100 - W^{\text{p}} - A^{\text{p}}}{100} - 25,1W_2^{\text{p}}. \quad (14)$$

### **Пример 5. Расчет теплоты сгорания рабочей массы топлива**

Задан состав мазута на рабочую массу, %:

$$\text{C}^{\text{p}} = 83,0; \text{H}^{\text{p}} = 10,4; \text{N}^{\text{p}} = 0,4; \text{O}^{\text{p}} = 0,3; \text{S}^{\text{p}} = 2,8; A^{\text{p}} = 0,1, W^{\text{p}} = 3.$$

Низшая теплота сгорания на рабочую массу топлива:

$$\begin{aligned} Q_{\text{н}}^{\text{p}} &= 339\text{C}^{\text{p}} + 1030\text{H}^{\text{p}} - 109(\text{O}^{\text{p}} - \text{S}^{\text{p}}) - 25,1W^{\text{p}} = \\ &= 339 \cdot 83,0 + 1030 \cdot 10,4 - 109(0,3 - 2,8) - 25,1 \cdot 3 = 39050 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

### **Пример 6. Расчет теплоты сгорания рабочей массы топлива при изменении влажности**

Для мазута, состав которого приведен в примере 4, при увеличении влажности до 6%, низшая теплота сгорания на рабочую массу может быть определена по формуле:

$$\begin{aligned} Q_{\text{н2}}^{\text{p}} &= (Q_{\text{н1}}^{\text{p}} + 25,1W_1^{\text{p}}) \frac{100 - W_2^{\text{p}}}{100 - W_1^{\text{p}}} - 25,1W_2^{\text{p}}; \\ Q_{\text{н2}}^{\text{p}} &= (39050 + 25,1 \cdot 3) \frac{100 - 6}{100 - 3} - 25,1 \cdot 6 = 37\,760 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

Второй способ определения теплоты сгорания: необходимо перевести состав рабочей массы топлива при изменении влажности и по формуле Д.И. Менделеева рассчитать низшую теплоту сгорания (пример 4). Переводной коэффициент  $K$ :

$$K = \frac{100 - W_k^p}{100 - W_H^p} = \frac{100 - 6}{100 - 3} = 0,969.$$

Умножив значение каждого элемента и зольности топлива при начальной влажности на переводной коэффициент, получим состав мазута на рабочую массу при влажности  $W^p = 6\%$ :

$$C^p = 80,43\%; H^p = 10,08\%; N^p = 0,39\%;$$

$$O^p = 0,29\%; S^p = 2,71\%; A^p = 0,1\%.$$

Низшая теплота сгорания мазута на рабочую массу:

$$\begin{aligned} Q_H^p &= 339C^p + 1030H^p - 109(O^p - S^p) - 25,1W^p = \\ &= 339 \cdot 80,43 + 1030 \cdot 10,08 - 109(0,29 - 2,71) - 25,1 \cdot 6 = \\ &= 37\,760 \text{ кДж/кг}. \end{aligned}$$

### **Пример 7. Расчет теплоты сгорания газообразного топлива**

Объемное содержание сухой массы природного газа составляет:

$$CH_4 = 94,0\%; C_2H_6 = 2,8\%; C_3H_8 = 0,4\%;$$

$$C_4H_{10} = 0,3\%; C_5H_{12} = 0,1\%; N_2 = 2,0\%; CO_2 = 0,4\%.$$

Низшая теплотворная способность природного газа

$$\begin{aligned} Q_H^p &= 358CH_4 + 640C_2H_6 + 930C_3H_8 + 1200C_4H_{10} + 1460C_5H_{12} = \\ &= 358 \cdot 94 + 640 \cdot 2,8 + 930 \cdot 0,4 + 1200 \cdot 0,3 + 1460 \cdot 0,1 = 36180 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Высшая теплотворная способность природного газа

$$\begin{aligned} Q_B^p &= 398CH_4 + 700C_2H_6 + 1000C_3H_8 + 1300C_4H_{10} + 1580C_5H_{12} = \\ &= 398 \cdot 94 + 700 \cdot 2,8 + 1000 \cdot 0,4 + 1300 \cdot 0,3 + 1580 \cdot 0,1 = \\ &= 40300 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

## Контрольное задание № 2

Определить низшую теплоту сгорания  $Q_n^p$  каменного угля, состав которого дан в табл. 3, при начальной влажности  $W_1^p$  и конечной влажности  $W_2^p$  подсушенного топлива. Сравнить полученные значения теплоты сгорания топлива.

Определить низшую  $Q_n^c$  и высшую  $Q_v^c$  теплоту сгорания природного газа, состав которого приведен в табл. 4, сравнить значения.

Таблица 4

### Варианты задания

№	Состав природного газа, %							
	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>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
1	98,7	0,35	0,12	0,06	–	0,1	0,67	–
2	85,0	4,4	2,4	1,8	1,3	0,1	5,0	–
3	98,5	0,5	0,1	–	–	–	0,9	–
4	94,0	1,8	0,4	0,1	0,1	0,1	3,5	–
5	95,1	2,3	0,7	0,4	0,8	0,2	0,5	–
6	81,7	5,0	2,0	1,2	0,6	0,4	8,5	0,6
7	98,3	0,3	0,12	0,15	–	0,1	1,03	–
8	93,5	4,0	1,0	0,5	0,5	0,1	0,4	–
9	89,6	4,1	0,7	0,1	1,3	3,8	0,4	–
10	90,9	5,2	1,3	0,2	1,5	–	0,9	–
11	78,3	6,4	1,7	–	–	0,6	12,8	–
12	85,0	3,3	1,2	0,5	–	0,1	9,9	–
13	91,5	3,3	1,4	–	1,6	0,2	2,0	–
14	94,6	0,5	0,3	0,2	–	1,1	3,3	–
15	92,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,5	5,9	–
16	90,0	4,5	0,9	0,3	1,1	0,2	3,0	–
17	93,8	2,9	1,0	0,6	–	–	1,7	–
18	96,4	1,5	0,1	0,1	0,1	1,8	–	–
19	90,4	2,7	0,9	0,2	0,6	–	5,2	–
20	94,8	0,8	0,2	0,1	0,6	–	3,5	–
21	88,5	–	0,9	0,2	0,4	–	10,0	–
22	93,5	2,6	1,4	1,5	0,5	0,4	0,1	–
23	94,2	3,5	1,1	0,8	–	0,2	0,2	–
24	95,1	1,7	0,3	0,1	0,1	0,2	2,5	–
25	90,7	3	0,6	0,2	1,2	3,7	0,6	–
26	95,7	0,4	0,2	0,1	0,2	0,8	2,6	–
27	93,7	0,5	0,2	0,1	0,3	0,4	4,8	–
28	91,1	3,9	0,8	0,2	1	0,1	2,9	–
29	89,6	2,2	0,8	0,1	0,3	0,2	6,8	–
30	90,2	2,5	1,3	2,4	0,2	0,8	2,6	–

### 3. РАСЧЕТ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕМОВ ВОЗДУХА И ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ДЛЯ ТВЕРДОГО И ЖИДКОГО ТОПЛИВА

#### Основные расчетные формулы

Объем воздуха  $V_B^o$ , теоретически необходимый для сгорания 1 кг твердого или жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_B^o = \frac{1}{30} (2,67C^p + S^p + 8H^p - O^p). \quad (15)$$

Суммарный объем продуктов сгорания  $V_E^o$ , образующийся при полном сгорании топлива в стехиометрическом объеме воздуха, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{п.г}^o = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}, \quad (16)$$

где:

– объем двуокиси углерода

$$V_{CO_2} = 0,0187C^p; \quad (17)$$

– объем двуокиси серы

$$V_{SO_2} = 0,007S^p; \quad (18)$$

– объем водяного пара при сжигании топлива в абсолютно сухом воздухе

$$V_{H_2O} = 0,111H^p + 0,0124W^p; \quad (19)$$

или объем водяного пара при сжигании топлива во влажном воздухе (1% влаги по массе)

$$V_{H_2O} = 0,111H^p + 0,0124W^p + 0,016V_B^o; \quad (20)$$

– объем азота

$$V_{N_2} = 0,79V_B^o + 0,008N^p. \quad (21)$$

Основное количество азота, являющегося главным компонентом продуктов сгорания, поступает из воздуха. Количество азота, переходя-

шее в продукты сгорания из топлива, составляет всего лишь около 1% суммарного количества азота, содержащегося в продуктах сгорания. Поэтому в расчетах, не претендующих на особую точность, слагаемое  $0,008N^p$  в формуле можно опустить.

Действительный объем воздуха  $V_B^d$ , подаваемый для сжигания 1 кг твердого или жидкого топлива,  $m^3/kg$ :

$$V_B^d = \alpha V_B^o, \quad (22)$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха (см. главу 5).

В случае, если неизвестен состав топлива, то по его низшей теплоте сгорания или влажности на рабочую массу можно ориентировочно определить теоретический расход воздуха и суммарный объем продуктов сгорания, используя эмпирические зависимости (табл. 5).

*Таблица 5*

**Эмпирические зависимости для определения теоретического расхода воздуха и продуктов сгорания органического топлива,  $m^3/kg$**

Топливо	Расход воздуха $V_B^o$	Объем продуктов сгорания $V_{п.г}^o$
Дрова	$4,66(1 - 0,01W^p)$	$5,3 - 0,0455 W^p$
Уголь	$0,241Q_H^p + 0,5$	$0,213Q_H^p + 1,65$
Жидкое топливо	$0,203Q_H^p + 2$	$0,265Q_H^p$
Низкокалорийный газ	$0,209Q_H^p$	$0,173Q_H^p + 1$
Высококалорийный газ	$0,26Q_H^p - 0,25$	$0,272Q_H^p + 0,25$
Природный газ	$0,259Q_H^p + 0,13$	$0,277Q_H^p + 0,58$

**Примечание:** В приведенные зависимости значения низшей теплоты сгорания на рабочую массу топлива  $Q_H^p$  необходимо подставлять в МДж/кг для твердого и жидкого топлива и в МДж/ $m^3$  для газообразного.

### **Пример 8. Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания по составу твердого топлива**

Задан состав рабочей массы твердого топлива:

$$C^p = 59,5\%; H^p = 4,0\%; N^p = 0,55\%; O^p = 19,35\%; S^p = 0,3\%;$$

$$A^p = 6,3\%; W^p = 10\%.$$

Объем воздуха  $V_B^0$ , теоретически необходимый для сгорания 1 кг твердого топлива

$$V_B^0 = (2,67C^p + S^p + 8H^p - O^p) / 30 = \\ = (2,67 \cdot 59,5 + 0,3 + 8 \cdot 4 - 19,35) / 30 = 5,73 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем двуокиси углерода

$$V_{CO_2} = 0,0187C^p = 0,0187 \cdot 59,5 = 1,11 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем двуокиси серы

$$V_{SO_2} = 0,007S^p = 0,007 \cdot 0,3 = 0,002 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем водяного пара, при сжигании топлива в абсолютно сухом воздухе;

$$V_{H_2O} = 0,111H^p + 0,0124W^p = 0,111 \cdot 4 + 0,0124 \cdot 10 = 0,57 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем азота

$$V_{N_2} = 0,79V_B^0 + 0,008N^p = 0,79 \cdot 5,73 + 0,008 \cdot 0,55 = 4,53 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Суммарный объем продуктов сгорания  $V_{п.г}^0$ , образующийся при полном сгорании топлива в стехиометрическом объеме воздуха

$$V_{п.г}^0 = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} = 1,11 + 0,002 + 0,57 + 4,53 = 6,21 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

### **Пример 9. Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания по составу мазута**

Задан состав топочного мазута на горючую массу, %:

$$C^r = 88,3; H^r = 10,4; N^r = 0,4; O^r = 0,4; S^r = 0,5.$$

Влажность и зольность приведены на рабочую массу, %:

$$W^p = 3,0; A^p = 0,3.$$

Низшая теплота сгорания на рабочую массу

$$Q_n^p = 39 \text{ МДж/кг}.$$

Перевод с горючей массы на рабочую осуществляем по формуле:  $C^p = C^r \cdot K$ , где  $K$  – переводной коэффициент (табл. 1):

$$K = \frac{100 - W^p - A^p}{100} = \frac{100 - 3 - 0,3}{100} = 0,967.$$

Таким образом

$$\begin{aligned}C^p &= 85,39\%; \quad H^p = 10,05\%; \quad N^p = 0,39\%; \quad O^p = 0,39\%; \quad S^p = 0,49\%; \\A^p &= 0,29\%; \quad W^p = 3,0\%.\end{aligned}$$

Проверяем сумму элементного состава рабочей массы топлива:

$$\begin{aligned}C^p + H^p + O^p + S^p + N^p + A^p + W^p &= \\&= 85,39 + 10,05 + 0,39 + 0,49 + 0,39 + 0,29 + 3,0 = 100\%.\end{aligned}$$

Объем воздуха  $V_B^o$ , теоретически необходимый для сгорания 1 кг топочного мазута

$$\begin{aligned}V_B^o &= (2,67C^p + S^p + 8H^p - O^p)/30 = \\&= (2,67 \cdot 85,39 + 0,49 + 8 \cdot 10,05 - 0,39)/30 = 10,28 \text{ м}^3/\text{кг}\end{aligned}$$

Объемы продуктов сгорания:

$$V_{CO_2} = 0,0187C^p = 0,0187 \cdot 85,39 = 1,60 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$V_{SO_2} = 0,007S^p = 0,007 \cdot 0,49 = 0,003 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$V_{H_2O} = 0,111H^p + 0,0124W^p = 0,111 \cdot 10,05 + 0,0124 \cdot 3 = 1,15 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$V_{N_2} = 0,79V_B^o + 0,008N^p = 0,79 \cdot 10,28 + 0,008 \cdot 0,39 = 8,12 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Суммарный объем продуктов сгорания  $V_E^o$ , образующийся при полном сгорании топлива в стехиометрическом объеме воздуха,

$$V_{п.г}^o = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} = 1,60 + 0,003 + 1,15 + 8,12 = 10,87 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Используя эмпирические зависимости (табл. 5) определяем:  
– теоретически необходимый расход воздуха

$$V_B^o = 0,203Q_H^p + 2 = 0,203 \cdot 39 + 2 = 9,917 \text{ м}^3/\text{кг};$$

– суммарный объем продуктов сгорания

$$V_{п.г}^o = 0,265 \cdot 39 = 10,34 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

## **Пример 10. Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания по составу дров**

Состав рабочей массы дров с влажностью 30%:



$$C^p = 35,4\%; H^p = 4,2\%; N^p = 0,4\%; O^p = 29,3\%; A^p = 0,7\%; W^p = 30\%.$$

Объем воздуха  $V_B^o$ , необходимый для сгорания 1 кг дров

$$V_B^o = (2,67C^p + 8H^p - O^p)/30 = (2,67 \cdot 35,4 + 8 \cdot 4,2 - 29,3)/30 = 3,3 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем двуокиси углерода

$$V_{CO_2} = 0,0187C^p = 0,0187 \cdot 35,4 = 0,66 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем водяного пара

$$V_{H_2O} = 0,111H^p + 0,0124W^p = 0,111 \cdot 4,2 + 0,0124 \cdot 30 = 0,84 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Объем азота

$$V_{N_2} = 0,79V_B^o + 0,008N^p = 0,79 \cdot 3,3 + 0,008 \cdot 0,4 = 2,61 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Суммарный объем продуктов сгорания  $V_E^o$ , образующийся при полном сгорании дров в стехиометрическом объеме воздуха

$$V_{п.г.}^o = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} = 0,66 + 0,84 + 2,61 = 4,11 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Используя эмпирические зависимости (табл. 5) определяем:

– теоретически необходимый расход воздуха  $V_B^o$ , для сгорания 1 кг дров

$$V_B^o = 4,66(1 - 0,01W^p) = 4,66(1 - 0,01 \cdot 30) = 3,26 \text{ м}^3/\text{кг};$$

– суммарный объем продуктов сгорания  $V_{п.г.}^o$ , образующейся при полном сгорании дров

$$V_{п.г.}^o = 5,3 - 0,0455W^p = 5,3 - 0,0455 \cdot 30 = 3,94 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

### Контрольное задание № 3

Определить объем воздуха  $V_B^o$ , теоретически необходимый для сгорания 1 кг каменного угля и выход суммарного объема продуктов сгорания каменного угля  $V_E^o$ , состав которого рассчитан в контрольном задании № 1, при начальной влажности  $W_1^p$  и конечной влажности  $W_2^p$  подсушенного топлива.

Сравнить полученные значения объемов воздуха и продуктов сгорания топлива при начальной влажности  $W_1^p$  и конечной влажности  $W_2^p$  топлива, а также результаты, полученные расчетом по составу топлива, с результатами расчета, полученными по эмпирическим зависимостям.

## 4. РАСЧЕТ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕМОВ ВОЗДУХА И ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ДЛЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

### Основные расчетные формулы

Объем окислителя, необходимого для полного сгорания газообразного топлива и объем образующихся продуктов сгорания, подсчитывают на основе уравнения горения компонентов, входящих в состав газообразного топлива. Уравнения горения, объемы кислорода и воздуха, необходимые для полного сгорания 1 м<sup>3</sup> горючих газов, и объемы продуктов сгорания (CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O), образующиеся при сжигании газов, приведены в табл. 6 (далее в разделе в выражениях используются только наиболее распространенные горючие газы).

Таблица 6

**Объемы воздуха и продуктов сгорания**

Химическая реакция горения	Объемы, м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup> газа			
	O <sub>2</sub>	Воздуха	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
CH <sub>4</sub> + 2O <sub>2</sub> = CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	2	9,52	1	2
2C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> + 7O <sub>2</sub> = 4CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	3,5	16,67	2	3
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + 5O <sub>2</sub> = 3CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> O	5	23,81	3	4
2C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> + 13O <sub>2</sub> = 8CO <sub>2</sub> + 10H <sub>2</sub> O	6,5	30,95	4	5
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> + 8O <sub>2</sub> = 5CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	8	38,10	5	6
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> + 3O <sub>2</sub> = 2CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	3	14,29	2	2
2C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> + 9O <sub>2</sub> = 6CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	4,5	21,43	3	3
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> + 6O <sub>2</sub> = 4CO <sub>2</sub> + 4H <sub>2</sub> O	6	28,57	4	4
2C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> + 15O <sub>2</sub> = 10CO <sub>2</sub> + 10H <sub>2</sub> O	7,5	35,71	5	5
2C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> + 15O <sub>2</sub> = 12CO <sub>2</sub> + 6H <sub>2</sub> O	7,5	35,71	6	3
2C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> + 7O <sub>2</sub> = 6CO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	3,5	16,67	3	1
2H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> = 2H <sub>2</sub> O	0,5	2,38	–	1
2H <sub>2</sub> S + 3O <sub>2</sub> = 2SO <sub>2</sub> + 2H <sub>2</sub> O	1,5	7,14	1*	1
2CO + O <sub>2</sub> = 2CO <sub>2</sub>	0,5	2,38	1	–

\* Объем SO<sub>2</sub>

Объем воздуха  $V_B^0$ , теоретически необходимый для сгорания 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа:

$$V_B^0 = 0,0476 (0,5CO + 0,5H_2 + 2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + \\ + 6,5C_4H_{10} + 8C_5H_{12} + 1,5H_2S - O_2). \quad (23)$$

При сжигании топлива с теоретическим количеством окислителя образуется соответственно и теоретическое количество продуктов полного сгорания  $V_{\varepsilon}^0$ , состоящих из следующих компонентов, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа:

$$V_{п.г}^0 = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}. \quad (24)$$

Объем продуктов сгорания за вычетом объема водяных паров называется объемом сухих газов

$$V_{с.г} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{N_2} = V_{п.г}^0 - V_{H_2O}. \quad (25)$$

Выход сухих трехатомных газов, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа

$$V_{CO_2} = 0,01(CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + \\ + 4 C_4H_{10} + 5 C_5H_{12}); \quad (26)$$

$$V_{SO_2} = 0,01 H_2S, \quad (27)$$

где CO<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> и т.д. – объемное процентное содержание соответствующих углерод- и серосодержащих газов в газовом топливе. В практике теплотехнических расчетов объем сухих трехатомных продуктов сгорания  $V_{RO_2}$  определяется совместно, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа

$$V_{RO_2} = V_{CO_2} + V_{SO_2}. \quad (28)$$

Выход азота складывается из азота воздуха и азота содержащегося в газовом топливе, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа

$$V_{N_2} = 0,79V_B^0 + 0,01N_2. \quad (29)$$

Выход водяных паров при сжигании газового топлива в абсолютно сухом воздухе, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа

$$V_{H_2O} = 0,01(H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + \\ + 6C_5H_{12} + H_2S), \quad (30)$$

а с учетом содержания в 1 м<sup>3</sup> газового топлива  $d$  грамм влаги и содержания в воздухе 1% влаги по массе, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа

$$V_{H_2O} = 0,01(H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + \\ + 6 C_5H_{12} + H_2S + 0,125d + 1,6V_B^0). \quad (31)$$

## Пример 11. Расчет объемов воздуха и продуктов сгорания по составу природного газа

Дан объёмный состав сухого природного газа:

$$\text{CH}_4 = 94,0\%; \text{C}_2\text{H}_6 = 2,8\%; \text{C}_3\text{H}_8 = 0,4\%; \text{C}_4\text{H}_{10} = 0,3\%;$$

$$\text{C}_5\text{H}_{12} = 0,1\%; \text{N}_2 = 2,0\% \text{ CO}_2 = 0,4\%.$$

Низшая теплота сгорания

$$Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 36,27 \text{ МДж/м}^3.$$

Теоретически необходимый расход воздуха  $V_{\text{B}}^{\circ}$  для полного сгорания:

$$V_{\text{B}}^{\circ} = 0,0476 (0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 3,5\text{C}_2\text{H}_6 + 5\text{C}_3\text{H}_8 + \\ + 6,5\text{C}_4\text{H}_{10} + 8\text{C}_5\text{H}_{12} + 1,5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2) = 9,64 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа}.$$

Выход продуктов сгорания:

$$V_{\text{CO}_2} = 0,01(\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + 3\text{C}_3\text{H}_8 + 4\text{C}_4\text{H}_{10} + 5\text{C}_5\text{H}_{12}) = \\ = 0,01 (0,4 + 0 + 94 + 2 \cdot 2,8 + 3 \cdot 0,4 + 4 \cdot 0,3 + 5 \cdot 0,1) = 1,03 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа}.$$

$$V_{\text{N}_2} = 0,79V_{\text{B}}^{\circ} + 0,01\text{N}_2 = 0,79 \cdot 9,64 + 0,01 \cdot 2 = 7,64 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа}.$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01(2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_6 + 4\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{C}_4\text{H}_{10} + 6\text{C}_5\text{H}_{12}) = \\ = 0,01(2 \cdot 94 + 3 \cdot 2,8 + 4 \cdot 0,4 + 5 \cdot 0,3 + 6 \cdot 0,1) = 2,00 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа}.$$

Суммарный объем продуктов полного сгорания

$$V_{\text{п.г}}^{\circ} = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} = 1,03 + 2 + 7,64 = 10,67 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа}.$$

Используя эмпирические зависимости (табл. 5) определяем:

– теоретически необходимый расход воздуха для сгорания 1 м<sup>3</sup> природного газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_{\text{B}}^{\circ} = 0,259 Q_{\text{H}}^{\text{P}} + 0,13 = 0,259 \cdot 36,27 + 0,13 = 9,52 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа}.$$

– суммарный объем продуктов сгорания, образующийся при полном сгорании 1 м<sup>3</sup> природного газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>

$$V_{\text{п.г}}^{\circ} = 0,277 Q_{\text{H}}^{\text{P}} + 0,58 = 0,277 \cdot 36,27 + 0,58 = 10,63 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ газа}.$$

## Контрольное задание № 4

Определить объем воздуха  $V_{\text{B}}^{\circ}$ , теоретически необходимый для сгорания 1 м<sup>3</sup> природного газа и выход суммарного объема продуктов сгорания природного газа  $V_{\text{г}}^{\circ}$ , состав которого приведен в табл. 4. Сравнить полученные данные с результатами, полученными по эмпирическим зависимостям.

## 5. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

### Основные расчетные формулы

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  показывает отношение поступившего в топливоиспользующую установку воздуха  $V_B$  к объему воздуха  $V_B^0$ , необходимому для полного сгорания топлива в соответствии со стехиометрическим соотношением

$$\alpha = \frac{V_B}{V_B^0} = \frac{V_B^0 + V_B^{\text{изб}}}{V_B^0}, \quad (32)$$

где  $V_B^{\text{изб}}$  – избыточное количество воздуха, содержащийся в котором кислород не вступает в реакцию горения.

#### Влияние $\alpha$ на эффективность использования топлива

Недостаточное количество воздуха ( $\alpha < 1$ ) приводит к химическому недожогу топлива, когда в продуктах сгорания присутствуют горючие газы: окись углерода  $\text{CO}'$ ; водород  $\text{H}'_2$  метан  $\text{CH}'_4$  и сажа (углерод  $\text{C}'$ ). Из-за недостаточного смешения топлива с воздухом химический недожог может быть при значениях коэффициента избытка воздуха, равном 1 или превышающему это значение на небольшую величину. Поэтому для исключения химического недожога топлива сжигаются со следующими коэффициентами избытка воздуха:

газообразное.....	1,05 – 1,2;
жидкое .....	1,15 – 1,25;
твердое пылевидное .....	1,2 – 1,25;
твердое кусковое.....	1,3 – 2,0.

Наличие избыточного воздуха требует затрат энергии на его нагрев. Поэтому увеличение значения  $\alpha$  приводит к увеличению расхода топлива для обеспечения необходимой температуры горения, или к снижению температуры горения, если расход топлива не изменяется. При значительном увеличении  $\alpha$  возможно существенное снижение температуры горения и так же появление химического недожога.

#### Определение $\alpha$ в действующих топливоиспользующих установках

При проведении теплотехнических испытаний (оценке эффективности работы печей и котлов) или их наладке, необходим расчет  $\alpha$  по известному составу отходящих газов, определяемому с помощью газового анализа. При этом в газоанализаторах исследуется предварительно осушенные продукты сгорания. Принцип определения  $\alpha$  заключается в том, что при его изменении в отходящих газах изменяется концентрация  $\text{CO}'_2$ ,  $\text{O}'_2$  и  $\text{N}'_2$ .

В зависимости от вида топлива и информации о составе газов используют несколько способов расчета  $\alpha$ :

- «азотную» формулу, которая использует значения содержания в отходящих газах  $N'_2$  и  $O'_2$  (сложность ее использования заключается в том, что для расчета содержания  $N'_2$  по выражению  $N'_2 = 100 - CO'_2 - O'_2$  необходимо определение содержания  $CO'_2$ , что требует применения специализированных дорогих газоанализаторов);

- «кислородную» формулу, для которой необходимо информация только о содержании  $O'_2$  (содержание кислорода определяется во всех моделях газоаналитического оборудования), но которое позволяет получать лишь приблизительное значение  $\alpha$ , точность метода высокая для топлив, в которых незначительное количество негорючих компонентов;

- упрощенный метод М.Б. Равича, применяемый при сжигании топлива с воздухом, обогащенным кислородом, или с чистым кислородом;

- упрощенный метод с использованием углекислотной формулы, позволяющей определять  $\alpha$  для любого вида топлива, при этом необходимо точное определение значения  $RO'_{2\max}$ , то есть должна быть информация о составе топлива.

#### **«Азотная» формула для расчета $\alpha$**

Так как азот в реакции горения не участвует, то при полном сгорании топлива коэффициент избытка воздуха можно рассчитать по отношению азота  $N'_2$ , содержащегося в сухих продуктах сгорания, к количеству азота, поступающего с теоретическим количеством воздуха  $N'^o_2$ . В воздухе содержание кислорода и азота описывается пропорцией  $N_2:O_2 = 79:21 = 3,76$ . Поэтому, зная количество избыточного кислорода в продуктах полного сгорания  $O'_2$ , можно по нему определить количество избыточного азота  $N'^{изб}_2$ , содержащегося в избыточном воздухе.

$$N'^{изб}_2 = N'_2 - N'^o_2 = 3,76O'_2.$$

Следовательно,

$$\alpha = \frac{N'_2}{N'^o_2} = \frac{N'_2}{N'_2 - N'^{изб}_2} = \frac{N'_2}{N'_2 - 3,76O'_2}.$$

Эту формулу, называемую «азотной», применяют в различных модификациях:

$$\alpha = \frac{1}{1 - 3,76 \frac{O'_2}{N'_2}}, \quad \text{или} \quad \alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O'_2}{N'_2}}, \quad (33)$$

где  $O'_2$  и  $N'_2$  – содержание кислорода и азота в продуктах сгорания, объёмные % или м<sup>3</sup>.

Для расчета коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  при неполном сгорании топлива необходимо вычесть из общего содержания кислорода в сухих продуктах сгорания количество кислорода, эквивалентное его расходу на окисление горючих компонентов

$$\alpha = \frac{N'_2}{N'_2 - 3,76(O'_2 - 0,5CO' - 0,5H'_2 - 2CH'_4)}. \quad (34)$$

где  $N'_2$ ,  $O'_2$ ,  $CO'$ ,  $H'_2$ ,  $CH'_4$  – содержание в сухих продуктах сгорания газов, объёмные % или  $m^3$ .

«Азотная» формула может применяться только для топлив, в составе которых незначительное (менее 3%) содержание азота.

#### **«Кислородная» формула расчета $\alpha$**

Если принять, что содержание азота в сухих продуктах сгорания равно содержанию азота в воздухе (то есть топливо не содержит балласта, углекислоты и азота), коэффициент избытка воздуха может быть рассчитан по кислородной формуле:

$$\alpha = \frac{21}{(21 - O'_2)}, \quad (35)$$

где  $O'_2$  – содержание кислорода в сухих продуктах сгорания, %.

#### **Расчет $\alpha$ по упрощённому методу М.Б. Равича**

Выше приведенные формулы применимы лишь при сжигании топлива в воздухе, не обогащенном кислородом. Если воздух, подаваемый на горение, обогащён кислородом, в формулах для расчета необходимо заменить соотношение объемного содержания кислорода и азота (21% и 79%) на соответствующее содержание кислорода и азота в дутье.

Возможно применение простой методики расчета коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , при сжигании топлива в кислороде и в воздухе, обогащенном кислородом, без определения содержания кислорода в дутье.

Коэффициент избытка кислорода или воздуха при полном сгорании топлива равен

$$\alpha = \frac{O'_2 + O_2^{\text{необх}}}{O_2^{\text{необх}}},$$

где  $O_2^{\text{необх}}$  – количество кислорода, израсходованного на горение топлива, определяемое по объёму образовавшихся продуктов сгорания

$$O_2^{\text{необх}} = RO'_2 + 0,5H_2O'.$$

Подставляя  $O_2^{\text{необх}}$  в выше приведенную формулу, получаем

$$\alpha = \frac{O'_2 + RO'_2 + 0,5H_2O'}{RO'_2 + 0,5H_2O'}.$$

Для удобства расчета  $\alpha$  по составу сухих продуктов сгорания формуле придают следующий вид

$$\alpha = \frac{O'_2 + nRO'_2}{nRO'_2}, \quad (36)$$

где  $n$  – коэффициент, показывающий отношение объема кислорода, израсходованного на горение топлива с образованием  $RO_2$  и  $H_2O$ , к объему  $RO_2$  в продуктах сгорания

$$n = \frac{RO'_2 + 0,5H_2O'}{RO'_2}.$$

Например, для полного сжигания 1 м<sup>3</sup> метана необходимо 2 м<sup>3</sup> кислорода (9,52 м<sup>3</sup> воздуха) и в результате получается 1 м<sup>3</sup> CO<sub>2</sub> и 2 м<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O. В этом случае коэффициент  $n = (1 + 0,5 \cdot 2)/1 = 2$ . Значения коэффициента  $n$  для некоторых видов топлив приведен в табл. 7

Таблица 7

**Значения коэффициента  $n$  для некоторых видов топлива**

Наименование	$n$	Наименование	$n$
Горючие газы:		Сжиженный газ	1,65
метан CH <sub>4</sub>	2,0	Мазут малосернистый	1,35
пропан C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,67	Мазут сернистый	1,40
бутан C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,625	Кокс	1,05
окись углерода CO	0,5	Антрацит	1,05
Природный газ	2,0	Торф	1,09
Доменный газ	0,41	Дрова	1,03

При неполном сгорании топлива коэффициент избытка воздуха или кислорода рассчитывают по формуле

$$\alpha = \frac{O'_2 - (0,5CO' + 0,5H'_2 + 2CH'_4) + n(CO'_2 + CO' + CH'_4)}{n(CO'_2 + CO' + CH'_4)}. \quad (37)$$

Приведенные формулы могут использоваться и при расчете  $\alpha$  при горении топлива в воздухе без обогащения кислородом.

#### **Упрощенный метод расчета $\alpha$ по углекислотной формуле**

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  возможно рассчитать по коэффициенту  $h$  разбавления сухих продуктов сгорания. При полном сгорании топлива он имеет вид

$$h = \frac{RO'_{2\max}}{RO'_2},$$



при неполном

$$h = \frac{RO'_{2\max}}{RO'_2 + CO' + CH'_4},$$

где  $RO'_{2\max}$  – максимально возможное содержание трехатомных газов ( $CO'_2$  и  $SO'_2$ ) в сухих продуктах сгорания (при  $\alpha = 1$ ),  $RO'_2$ ,  $CO'$ ,  $CH'_4$  – действительное содержание газов в сухих продуктах сгорания.

Значение  $RO'_{2\max}$  определяется по расчету горения топлива с учетом того, что сухие продукты сгорания при  $\alpha = 1$  состоят из  $N_2$  и  $RO_2$ :

$$RO'_{2\max} = \frac{V_{RO_2}}{V_{RO_2} + V_{N_2}} 100\% = \frac{V_{RO_2}}{V_{RO_2} + 0,79V_B^0}.$$

Для газообразного топлива объемы  $V_{RO_2}$  и  $V_B^0$  определяются по уравнениям (17), (18), (14). Для твердого и жидкого топлива они могут быть определены по уравнениям (8), (9), (6) и значение  $RO'_{2\max}$  будет иметь вид:

$$RO'_{2\max} = \frac{0,0187C^p + 0,007S^p}{0,045C^p + 0,033S^p + 0,2107H^p - 0,026O^p} 100\%.$$

Так же коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания  $h$  может быть определен по объему  $V_{c.g}^0$  сухих продуктов сгорания при  $\alpha = 1$  и объёму  $V_B^{изб}$  избыточного воздуха:

$$h = \frac{V_{c.g}^0 + V_B^{изб}}{V_{c.g}^0}.$$

Выразим объем избыточного воздуха из этого уравнения и уравнения (23):

$$V_B^{изб} = (h - 1)V_{c.g}^0 \quad \text{и} \quad V_B^{изб} = (\alpha - 1)V_B^0.$$

Приравнивая правые части, получаем

$$(\alpha - 1) = (h - 1) \frac{V_{c.g}^0}{V_B^0}.$$

Обозначив через  $Y$  отношение теоретического объема сухих газов к теоретическому объёму воздуха

$$Y = \frac{V_{c.g}^0}{V_B^0},$$

получим выражения для расчета коэффициента избытка воздуха

$$\alpha = 1 + (h - 1)Y. \quad (38)$$

Значения величины  $Y$  и  $RO_{2\max}$  для некоторых видов топлива приведены в табл. 8.

Таблица 8

**Значения величины  $Y$  и  $RO_{2\max}$  для некоторых видов топлив**

Топливо	Влажность топлива, %	$Y$	$RO_{2\max}$ , %
Углерод	0	1,00	100
Антрацит	5	0,99	20,2
Бурый уголь	5	0,98	19,5
Каменный уголь	5	0,98	18,7
Кокс	5	0,99	20,7
Торф	40	0,99	19,5
Дрова	40	1,00	20,5
Бензин	0	0,93	14,8
Дизельное топливо	0	0,94	15,4
Мазут	3	0,95	16,0
Генераторный газ (из угля)	0	1,5	20,0
Доменный газ	0	1,7	25,0
Коксовый газ	0	0,90	10,5
Сжиженный газ	0	0,92	14,0
Природный газ	0	0,90	11,8

**Пример 12. Расчет коэффициента избытка воздуха при полном сгорании топлива**

При сжигании природного газа продукты полного сгорания содержат 10%  $CO'_2$ . Рассчитаем коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ .

1. «Азотная» формула.

Определяем наличие кислорода  $O_2$  в сухих продуктах сгорания при содержании в них 10%  $CO_2$

$$O_2 = \frac{21(CO'_{2\max} - CO'_2)}{CO'_{2\max}} = \frac{21(11,8 - 10)}{11,8} = 3,2\%.$$

Рассчитываем содержание азота в сухих продуктах полного сгорания

$$N_2 = 100 - (CO'_2 + O'_2) = 100 - (10 + 3,2) = 86,8\%.$$

Рассчитываем коэффициент избытка воздуха  $\alpha$

$$\alpha = \frac{N'_2}{N'_2 - 3,76O'_2} = \frac{86,8}{86,8 - 3,76 \cdot 3,2} = 1,16.$$

2. «Кислородная» формула.

Определяем наличие кислорода  $O_2$  в сухих продуктах сгорания при содержании в них 10%  $CO_2$

$$O'_2 = \frac{21(CO'_{2\max} - CO'_2)}{CO'_{2\max}} = \frac{21(11,8 - 10)}{11,8} = 3,2\%.$$

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$

$$\alpha = \frac{21}{21 - O'_2} = \frac{21}{21 - 3,2} = 1,18.$$

3. Упрощенный метод М.Б. Равича.

Определяем наличие кислорода  $O'_2$  в сухих продуктах сгорания при содержании в них 10%  $CO'_2$

$$O_2 = \frac{21(CO'_{2\max} - CO'_2)}{CO'_{2\max}} = \frac{21(11,8 - 10)}{11,8} = 3,2\%.$$

Рассчитываем коэффициент избытка воздуха  $\alpha$

$$\alpha = \frac{nCO'_2 + O'_2}{nCO'_2} = \frac{2 \cdot 10 + 3,2}{2 \cdot 10} = 1,16.$$

4. По коэффициенту разбавления сухих продуктов сгорания  $h$ .

Рассчитываем коэффициент разбавления  $h$  по формуле для полного сгорания

$$h = \frac{RO'_{2\max}}{RO'_2} = \frac{11,8}{10} = 1,18.$$

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$

$$\alpha = 1 + (h - 1)Y = 1 + (1,18 - 1) \cdot 0,9 = 1,16.$$

Наиболее точные значения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , определенные по «кислородной» формуле получаются при сжигании топлива со значением  $RO_{2\max}$  близким к 21.

### **Пример 13. Расчет коэффициента избытка воздуха при наличии недожога**

При сжигании природного газа продукты сгорания содержат:

$$CO'_2 = 9,0\%, O'_2 = 3\%, CO' = 1,43\%.$$

Рассчитаем коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  по «азотной» формуле:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{N'_2}{N_2 - 3,76(O'_2 - 0,5CO' - 0,5H'_2 - 2CH'_4)} = \\ &= \frac{86,57}{86,57 - 3,76(3 - 0,5 \cdot 1,43)} = 1,11, \end{aligned}$$

где содержание азота  $N'_2$  в сухих продуктах сгорания:

$$N_2 = 100 - CO'_2 - O'_2 - CO' = 100 - 9 - 3 - 1,43 = 86,57\%.$$

При неполном сгорании топлива коэффициент избытка воздуха можно рассчитать без определения содержания кислорода в дутье по упрощенной формуле М.Б. Равича

$$\alpha = \frac{O'_2 - (0,5CO' + 0,5H'_2 + 2CH'_4) + n(CO'_2 + CO' + CH'_4)}{n(CO'_2 + CO' + CH'_4)} =$$

$$= \frac{3 - (0,5 \cdot 1,43) + 2(9,0 + 1,43)}{2(9,0 + 1,43)} = 1,11.$$

Значение величины  $n$  для природного газа определено по табл. 6.

### Пример 14. Расчет коэффициента избытка воздуха по содержанию в продуктах сгорания $O_2$ и $CO$

При сжигании природного газа продукты сгорания содержат 3,2%  $O_2$ ;

Рассчитаем коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  по кислородной формуле

$$\alpha = \frac{21}{(21 - O'_2)} = \frac{21}{(21 - 5)} = 1,18.$$

### Контрольное задание № 5

Определить коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , если известно содержание  $CO'_2$ , % в сухих продуктах сгорания, при полном сжигании природного газа (табл. 9).

Таблица 9

Содержание  $CO'_2$  в сухих продуктах сгорания  
при полном сжигании природного газа

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$CO'_2$ , %	11,4	11,2	11,0	10,8	10,6	10,4	10,2	10,0	9,8	9,6
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$CO'_2$ , %	9,4	9,2	9,0	8,8	8,6	8,4	8,2	8,0	7,8	7,6
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$CO'_2$ , %	7,4	7,2	7,0	6,8	6,6	6,4	6,2	6,0	5,8	5,6

## 6. РАСЧЕТ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕМОВ ВОЗДУХА И ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ

### Основные расчетные формулы

В разделе приводятся пригодные для практического использования выражения для расчета объемов воздуха, необходимого для горения, и объема продуктов сгорания при сжигании топлива с коэффициентом избытка воздуха  $\alpha \geq 1$ .

#### Расчет действительных объемов воздуха и продуктов сгорания по составу твердого и жидкого топлива

Исходные данные:

а) состав топлива (рабочая масса), %:  $C^p, O^p, H^p, S^p, N^p, A^p, W^p$  (сумма должна составлять 100%);

б) коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ ;

в) влагосодержание воздуха  $d_b$ , г/кг сухого воздуха (может быть принята равной 10 г/кг, что соответствует содержанию влаги 1% по массе);

г) количество пара  $G_n$ , в водимого для распыления жидкого топлива, кг/кг.

Теоретический объем сухого воздуха  $V_B^0$ , необходимый для сгорания 1 кг твердого или жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$V_B^0 = 0,0889 (C^p + 0,375 S^p + 0,265 H^p - 0,0333O^p). \quad (39)$$

Действительный объем влажного воздуха  $V_B^d$ , необходимый для сгорания 1 кг твердого или жидкого топлива, м<sup>3</sup>/кг:

$$0,0016 \cdot \alpha = \alpha (1 + 0,0016 d_b) V_B^0. \quad (40)$$

Суммарный объем продуктов сгорания  $V_{п.г}$ , образующийся при сгорании топлива, м<sup>3</sup>/кг

$$V_{п.г} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}, \quad (41)$$

где:

$$V_{CO_2} = 0,0187 C^p; \quad (42)$$

$$V_{SO_2} = 0,007 S^p; \quad (43)$$

$$V_{H_2O} = 0,111 H^p + 0,0124 W^p + 0,0016 \alpha d_b V_B^0 + 1,24 G_n; \quad (44)$$

$$V_{N_2} = 0,79 \alpha V_B^0 + 0,008 N^p. \quad (45)$$

$$V_{O_2} = (\alpha - 1) V_B^0. \quad (46)$$

### Расчет действительных объемов воздуха и продуктов сгорания по составу газообразного топлива

Исходные данные:

а) состав топлива, объемные %:  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_3H_8$ ,  $C_4H_{10}$ ,  $C_5H_{12}$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_3H_6$ ,  $C_4H_8$ ,  $C_5H_{10}$ ,  $C_6H_6$ ,  $C_3H_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$  (сумма должна составлять 100%);

б) коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ ;

в) влагосодержание воздуха  $d_B$ , г/кг сухого воздуха (может быть принята равной 10 г/кг);

г) влагосодержание природного газа  $d_r$ , г/м<sup>3</sup> или кг/1000 м<sup>3</sup> сухого газа.

Теоретический объем сухого воздуха  $V_B^0$ , необходимый для сгорания 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа:

$$\begin{aligned} V_B^0 = & 0,0476 (2CH_4 + 3,5C_2H_6 + 5C_3H_8 + 6,5C_4H_{10} + 8C_5H_{12} + \\ & + 3C_2H_4 + 4,5C_3H_6 + 6C_4H_8 + 7,5C_5H_{10} + 7,5C_6H_6 + 3,5 C_3H_2 + \\ & + 0,5H_2 + 1,5H_2S + 0,5CO - O_2). \end{aligned} \quad (47)$$

Действительный объем влажного воздуха  $V_B^A$ , необходимый для сгорания 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа:

$$V_B^A = \alpha (1 + 0,0016 d_B) V_B^0. \quad (48)$$

Суммарный объем продуктов сгорания  $V_{п.г}$ , образующийся при сгорании топлива, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> газа:

$$V_{п.г} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V_{O_2}. \quad (49)$$

где:

$$\begin{aligned} V_{CO_2} = & 0,01(CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4 C_4H_{10} + 5 C_5H_{12} + \\ & + 2C_2H_4 + 3C_3H_6 + 4C_4H_8 + 5C_5H_{10} + 6C_6H_6 + 3C_3H_2 + \\ & + CO + CO_2); \end{aligned} \quad (50)$$

$$V_{SO_2} = 0,01 H_2S, \quad (51)$$

$$V_{H_2O} = 0,01(2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12} + \\ + 2C_2H_4 + 3C_3H_6 + 4C_4H_8 + 5C_5H_{10} + 3C_6H_6 + C_3H_2 + \\ H_2 + H_2S + 0,125d_T + 0,16\alpha d_B V_B^0).$$

$$V_{N_2} = 0,79 \alpha V_B^0 + 0,01N_2. \quad (53)$$

$$V_{O_2} = 0,21(\alpha - 1)V_B^0. \quad (54)$$

**Пример 15. Расчет количество воздуха, необходимого на горение, и объема продуктов сгорания для твердого топлива**

*Дано:*

а) состав бурого угля Челябинского месторождения (горючая масса):

Элементарный состав	C <sub>г</sub>	O <sub>г</sub>	H <sub>г</sub>	S <sub>г</sub>	N <sub>г</sub>	Всего
Содержание, %	71,5	18,9	5,2	2,7	1,7	100

рабочая зольность  $A_p = 29,5\%$ ;

рабочая влажность  $W_p = 15,0\%$ ;

б) коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,25$ ;

в) влагосодержание воздуха  $d_b = 10$  г/кг;

г) количество пара, вводимого для распыления жидкого топлива,  $G_{п} = 0,05$  кг/кг.

*Расчет.*

1. Производим пересчет на рабочую массу:

$$C_p = C_g \frac{100 - W^p - A^p}{100} = 71,5 \frac{100 - 15,0 - 29,5}{100} = 71,5 \cdot 0,555 = \\ = 39,68\%;$$

$$O_p = 18,9 \cdot 0,555 = 10,49\%;$$

$$H_p = 5,2 \cdot 0,555 = 2,89\%;$$

$$S_p = 2,7 \cdot 0,555 = 1,50\%;$$

$$N_p = 1,7 \cdot 0,555 = 0,94\%.$$

2. Теоретический объем сухого воздуха  $V_B^0$ , необходимый для сгорания 1 кг твердого или жидкого топлива:

$$V_B^0 = 0,0899 (39,68 + 0,375 \cdot 1,50 + 0,265 \cdot 2,89 - 0,033 \cdot 10,49) = 3,590 \text{ м}^3/\text{кг}$$

3. Действительный объем влажного воздуха  $V_B^A$ , необходимый для сгорания 1 кг твердого или жидкого топлива

$$V_B^A = 1,25 \cdot (1 + 0,016 \cdot 10) \cdot 3,590 = 4,559 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

4. Суммарный объем продуктов сгорания  $V_{п.г}$ , образующийся при сгорании топлива

$$V_{п.г} = 0,742 + 0,011 + 0,641 + 3,552 + 0,188 = 5,134 \text{ м}^3/\text{кг},$$

где

$$V_{CO_2} = 0,0187 \cdot 39,68 = 0,742 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{SO_2} = 0,007 \cdot 1,50 = 0,011 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{H_2O} = 0,111 \cdot 2,89 + 0,0124 \cdot 15,0 + 0,0016 \cdot 1,25 \cdot 10 \cdot 3,59 + 1,24 \cdot 0,05 = 0,641 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot 1,25 \cdot 3,590 + 0,008 \cdot 0,94 = 3,552 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$V_{O_2} = 0,21 \cdot (1,25 - 1) \cdot 3,590 = 0,188 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

### **Пример 16. Расчет количество воздуха, необходимого на горение, и объема продуктов сгорания для природного газа**

*Дано:*

а) состав природного газа газопровода «Саратов–Москва»:

Газ	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>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
Содержание, %	90,29	2,8	1,1	0,75	0,34	0,32	4,0	0,2

б) коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,05$ ;

в) влагосодержание воздуха  $d_b = 10 \text{ г/кг}$ .

г) влагосодержание природного газа  $d_r = 5 \text{ кг/1000 м}^3$ .

*Расчет.*

1. Теоретический объем сухого воздуха:

$$V_B^o = 0,0476 (2 \cdot 90,29 + 3,5 \cdot 2,8 + 5 \cdot 1,1 + 6,5 \cdot 0,75 + 8 \cdot 0,34 - 0,2) = 9,676 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

2. Действительный объем влажного воздуха:

$$V_B^A = 1,05 (1 + 0,0016 \cdot 10) 9,676 = 10,32 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Объем продуктов сгорания:

$$3. V_{CO_2} = 0,01(90,29 + 2 \cdot 2,8 + 3 \cdot 1,1 + 4 \cdot 0,75 + 5 \cdot 0,34 + 0,32) = 1,042 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{H_2O} = 0,01(2 \cdot 90,29 + 3 \cdot 2,8 + 4 \cdot 1,1 + 5 \cdot 0,75 + 6 \cdot 0,34 + 0,125 \cdot 5 +$$



$$+ 0,16 \cdot 1,05 \cdot 10 \cdot 9,676) = 2,161 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{N_2} = 0,79 \cdot 1,05 \cdot 9,676 + 0,01 \cdot 4 = 8,066 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

$$V_{O_2} = 0,21(1,05 - 1) \cdot 9,676 = 0,102 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

4. Суммарный объем сухих продуктов сгорания

$$V_{с.г} = V_{CO_2} + V_{N_2} + V_{O_2} = 1,042 + 8,066 + 0,102 = 9,210 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

5. Процентный объемный состав сухих продуктов сгорания:

$$CO_2 = 1,042/9,210 \cdot 100\% = 11,3\%;$$

$$N_2 = 8,066/9,210 \cdot 100\% = 87,6\%;$$

$$O_2 = 0,102/9,210 \cdot 100\% = 1,1\%.$$

6. Суммарный объем влажных продуктов сгорания:

$$V_{п.г} = V_{с.г} + V_{H_2O} = 9,210 + 2,161 = 11,371 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

7. Процентный объемный состав влажных продуктов сгорания:

$$CO_2 = 1,042/11,371 \cdot 100\% = 9,2\%; H_2O = 19,0\%; N_2 = 70,9\%; O_2 = 0,9\%.$$

8. Низшая теплота сгорания:

$$Q_H^p = 10 \cdot (35,82 \cdot 90,29 + 63,75 \cdot 2,8 + 91,30 \cdot 1,1 + 118 \cdot 0,75 + 146 \cdot 0,34) = 36\,512 \text{ кДж/м}^3.$$

## Контрольное задание № 6

Определить процентный состав сухих и влажных продуктов сгорания для твердого топлива (табл. 3) и газообразного топлива (табл. 4) согласно данным табл. 10.

Таблица 10

**Коэффициент избытка воздуха**  
**для твердого топлива  $\alpha_t$  и природного газа  $\alpha_g$ ,**  
**влажностное содержание воздуха  $d_v$ , г/кг, и природного газа  $d_g$ , г/м<sup>3</sup>**

Вариант	$\alpha_t$	$\alpha_g$	$d_v$	$d_g$	Вариант	$\alpha_t$	$\alpha_g$	$d_v$	$d_g$	Вариант	$\alpha_t$	$\alpha_g$	$d_v$	$d_g$
1	1,25	1,04	5	1	11	1,25	1,04	15	3	21	1,25	1,04	5	6
2	1,24	1,05	6	2	12	1,24	1,05	14	4	22	1,24	1,05	6	7
3	1,23	1,06	7	3	13	1,23	1,06	13	5	23	1,23	1,06	7	8
4	1,22	1,07	8	4	14	1,22	1,07	12	4	24	1,22	1,07	8	9
5	1,21	1,08	9	5	15	1,21	1,08	11	3	25	1,21	1,08	9	10
6	1,20	1,04	10	4	16	1,20	1,04	10	2	26	1,20	1,04	10	9
7	1,19	1,05	11	3	17	1,19	1,05	9	1	27	1,19	1,05	11	8
8	1,18	1,06	12	2	18	1,18	1,06	8	2	28	1,18	1,06	12	7
9	1,17	1,07	13	1	19	1,17	1,07	7	3	29	1,17	1,07	13	6
10	1,16	1,08	14	2	20	1,16	1,08	6	4	30	1,16	1,08	14	5

## 7. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ ГОРЕНИЯ

### Основные понятия и расчетные формулы

Основное уравнение горения (уравнение газового анализа) получено на основе баланса кислорода в продуктах сгорания Д.М. Хзмаляном при сжигании органического топлива в атмосферном воздухе

$$21 = RO'_2 + O'_2 + \beta RO'_2 + (0,605 + \beta)CO'. \quad (55)$$

где  $RO'_2$ ,  $O'_2$ ,  $CO'$  – объемное содержание соответствующего компонента в сухих продуктах сгорания выраженное в процентах (данные газового анализа);  $\beta$  – топливная характеристика.

Топливная характеристика  $\beta$  зависит только от элементарного химического состава топлива и для твердого топлива имеет вид

$$\beta = 2,35 \frac{H^p - 0,126O^p}{C^p - 0,375S^p}, \quad (56)$$

где  $H^p$ ,  $O^p$ ,  $C^p$ ,  $S^p$  – процентное содержание соответствующего элемента на рабочую массу топлива.

Коэффициент  $\beta$  показывает отношение расхода кислорода воздуха на окисление свободного водорода топлива (т. е. водорода топлива, за исключением его части, связанной с кислородом топлива, равной  $0,01(H^p - 0,126O^p)$ , к расходу кислорода на образование трехатомных газов.

В случае полного сгорания топлива основное уравнение горения принимает вид

$$21 = O'_2 + (1 + \beta)RO'_2. \quad (57)$$

По известному процентному содержанию  $O_2$  в продуктах сгорания и коэффициенту  $\beta$  можно определить процентное содержание трехатомных газов

$$RO'_2 = \frac{21 - O'_2}{1 + \beta}. \quad (58)$$

Из этого уравнения следует, что в сухих продуктах сгорания определенному значению  $RO'_2$  соответствует определенная величина  $O'_2$ . В случае несоответствия этих величин результаты получены с ошибкой и газовый анализ следует повторить или возможно присутствие в анализируемом газе продуктов неполного сгорания.

Уравнение газового анализа позволяет определить содержание  $CO'$  в продуктах сгорания топлива

$$CO' = \frac{21 - \beta RO'_2 - (RO'_2 + O'_2)}{0,605 + \beta}. \quad (59)$$

Содержание  $O_2$  в продуктах полного сгорания топлива определяется при известном содержании трехатомных газов

$$O'_2 = 21 - (1 + \beta)RO'_2.$$

При полном сжигании топлива в теоретическом необходимом объеме воздуха (коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1$ ) содержание кислорода в продуктах сгорания равно нулю и основное уравнение горения принимает вид

$$21 = (1 + \beta)RO'_2.$$

В этом случае значение  $RO_2$  в продуктах сгорания топлива будет максимальным и определяется по формуле

$$RO_{2\max} = \frac{21}{1 + \beta}.$$

Значения  $RO_{2\max}$  для некоторых топлив приведены в табл. 7

### **Пример 17. Определение коэффициента избытка воздуха по уравнению газового анализа при неполном сгорании топлива**

Газовым анализом установлено, что в продуктах сгорания природного газа содержится  $CO'_2 = 9,0\%$ ,  $O'_2 = 3\%$ . Определить процентное содержание  $CO'$  в продуктах сгорания природного газа и коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ .

Значение коэффициента  $\beta$  для природного газа

$$\beta = \frac{21}{RO'_{2\max}} - 1 = \frac{21}{11,8} - 1 = 0,78.$$

Содержание  $CO$  в продуктах сгорания определяем из уравнения газового анализа

$$CO' = \frac{21 - \beta RO'_2 - (RO'_2 + O'_2)}{0,605 + \beta} = \frac{21 - 0,78 \cdot 9 - (9 + 3)}{0,605 + 0,78} = 1,44.$$

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  рассчитываем по «азотной» формуле для неполного сгорания

$$\alpha = \frac{N'_2}{N'_2 - 3,76(O'_2 - 0,5CO')} = \frac{86,56}{86,56 - 3,76(3 - 0,5 \cdot 1,44)} = 1,11,$$

где содержание азота  $N'_2$  в сухих продуктах сгорания:

$$N'_2 = 100 - CO'_2 - O'_2 - CO' = 100 - 9 - 3 - 1,44 = 86,56.$$

### Пример 18. Определение коэффициента избытка воздуха по уравнению газового анализа при полном сгорании топлива

Газовым анализом установлено, что в продуктах сгорания природного газа содержится  $CO'_2 = 9,0\%$ ,  $O'_2 = 5\%$ . Определить процентное содержание CO в продуктах сгорания природного газа и коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ .

Содержание CO в продуктах сгорания определяем из уравнения газового анализа

$$CO' = \frac{21 - \beta RO'_2 - (RO'_2 + O'_2)}{0,605 + \beta} = \frac{21 - 0,78 \cdot 9 - (9 + 5)}{0,605 + 0,78} = 0.$$

Коэффициент избытка воздуха  $\alpha$  рассчитываем по «азотной» формуле для полного сгорания

$$\alpha = \frac{N'_2}{N'_2 - 3,76O'_2} = \frac{86}{86 - 3,76 \cdot 5} = 1,28,$$

где содержание азота  $N'_2$ , % в сухих продуктах сгорания:

$$N'_2 = 100 - CO'_2 - O'_2 = 100 - 9 - 5 = 86\%.$$

### Контрольное задание № 7

Определить процентное содержание CO в продуктах сгорания природного газа и коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , если известно содержание  $CO_2$  и  $O_2$  в сухих продуктах сгорания (табл. 11).

Таблица 11

Содержание  $CO_2$ , % и  $O_2$ , %  
в сухих продуктах сгорания природного газа

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$CO_2$ , %	7,0	7,4	9,8	7,6	7,8	8,2	8,4	8,8	9,0	9,2
$O_2$ , %	8,2	7,8	7,0	6,3	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0
Вариант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$CO_2$ , %	9,6	9,8	10,0	7,0	7,4	8,8	7,6	7,8	8,2	8,4
$O_2$ , %	3,5	3,0	2,5	8,0	7,5	5,3	6,8	6,3	6,2	5,3
Вариант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$CO_2$ , %	8,8	9,0	9,2	9,6	9,8	10,0	9,6	8,6	9,2	9,0
$O_2$ , %	5,2	4,0	3,8	3,2	2,6	2,3	3,3	5,1	3,8	3,5

## 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА

### Основные понятия и расчетные формулы

Коэффициент использования природного газа имеет вид:

$$\text{к. и. т.} = 100 - (q_2 + q_3), \%, \quad (60)$$

где  $q_2$  – потери теплоты с уходящими газами, %;  $q_3$  – потери теплоты вследствие химической неполноты горения, %.

Потери теплоты с уходящими газами можно рассчитать по формуле

$$q_2 = \frac{Q_2 \cdot 100}{B_T \cdot Q_H^c} = \frac{[V_{y.g.} c_{y.g.} t_{y.g.} - (V_B c_B t_B + B_T c_T t_T)] \cdot 100}{B_T \cdot Q_H^c}, \%,$$

где  $Q_2$  – потери теплоты с уходящими газами;  $B_T$  – количество сжигаемого топлива;  $Q_H^c$  – низшая теплотворная способность топлива;  $V_{y.g.}$  и  $V_B$  – объемы уходящих газов и воздуха;  $t_{y.g.}$  и  $t_T$  – температуры уходящих газов и воздуха;  $c_{y.g.}$ ,  $c_B$  и  $c_T$  – средняя объемная удельная теплоемкость уходящих газов, воздуха и топлива.

На практике потери теплоты с уходящими газами рассчитывают на основе жаропроизводительности топлива:

$$q_2 = \frac{t_{y.g.} - t_B}{t_{\max}} [C^* + (h - 1)BK] 100\%,$$

где  $C^*$  – постоянная величина, зависящая только от температуры продуктов сгорания и жаропроизводительности сжигаемого топлива;  $h$  – коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания воздухом;  $B$  – отношение объемов сухих и влажных продуктов сгорания;  $(h - 1)B$  – содержание воздуха в  $\text{м}^3$  на  $1 \text{ м}^3$  неразбавленных воздухом влажных продуктов полного сгорания;  $K$  – отношение средней теплоемкости воздуха в интервале температур от 0 до  $t_{y.g.}$  к теплоемкости неразбавленных воздухом продуктов полного сгорания в интервале температур от 0 до  $t_{\max}$ .

Формула справедлива для всех видов топлива и для совместного сжигания различных видов топлива. Объединяя постоянные величины в коэффициент  $Z$ , получаем простую формулу для расчета:

$$q_2 = 0,01Z(t_{y.g.} - t_B), \%. \quad (61)$$

Значения величины  $Z$  для различных температур продуктов сгорания в зависимости от степени разбавления их воздухом (то есть от содержания в продуктах сгорания суммы  $\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ ) приведены в табл. 12.

Таблица 12

**Значения величины  $Z$  для природного газа**

Содержание в продуктах сгорания $\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4$	Температурный интервал продуктов сгорания, °C					
	0...250	250...350	350...500	500...700	700...900	900...1100
11,8	4,13	4,16	4,28	4,37	4,47	4,57
11,7	4,15	4,21	4,31	4,40	4,50	4,60
11,6	4,18	4,25	4,33	4,43	4,53	4,63
11,5	4,21	4,28	4,37	4,47	4,57	4,67
11,4	4,24	4,30	4,40	4,50	4,60	4,70
11,3	4,26	4,32	4,43	4,53	4,63	4,73
11,2	4,28	4,34	4,46	4,56	4,66	4,76
11,1	4,30	4,37	4,48	4,58	4,68	4,78
11,0	4,35	4,40	4,50	4,60	4,70	4,80
10,9	4,40	4,43	4,53	4,63	4,73	4,83
10,8	4,43	4,47	4,57	4,67	4,77	4,87
10,7	4,45	4,50	4,60	4,70	4,80	4,90
10,6	4,48	4,53	4,65	4,75	4,85	4,95
10,5	4,50	4,56	4,67	4,78	4,88	4,98
10,4	4,53	4,60	4,70	4,80	4,90	5,00
10,3	4,57	4,63	4,75	4,85	4,95	5,05
10,2	4,60	4,65	4,78	4,88	4,98	5,08
10,1	4,63	4,70	4,80	4,90	5,00	5,10
10,0	4,67	4,75	4,85	4,95	5,05	5,15
9,9	4,70	4,80	4,90	5,00	5,10	5,20
9,8	4,75	4,83	4,93	5,03	5,13	5,23
9,7	4,80	4,87	4,97	5,07	5,17	5,27
9,6	4,84	4,90	5,00	5,10	5,20	5,30
9,5	4,88	4,95	5,05	5,15	5,25	5,35
9,4	4,93	5,00	5,10	5,20	5,30	5,40
9,3	4,97	5,05	5,15	5,25	5,35	5,45
9,2	5,02	5,07	5,20	5,30	5,40	5,50
9,1	5,07	5,10	5,25	5,35	5,50	5,60
9,0	5,10	5,15	5,30	5,40	5,55	5,65
8,9	5,13	5,22	5,33	5,45	5,60	5,70
8,8	5,17	5,26	5,35	5,50	5,65	5,75
8,7	5,22	5,30	5,40	5,55	5,70	5,80
8,6	5,27	5,35	5,45	5,60	5,75	5,85
8,5	5,30	5,40	5,50	5,65	5,80	5,90
8,4	5,35	5,45	5,55	5,70	5,85	5,95
8,3	5,40	5,50	5,60	5,75	5,90	6,00
8,2	5,45	5,55	5,65	5,80	5,95	6,05
8,1	5,50	5,60	5,70	5,85	6,00	6,10
8,0	5,57	5,67	5,77	5,90	6,05	6,20

Потери теплоты вследствие химической неполноты горения в процентах к теплоте сгорания топлива определяют по формуле

$$q_3 = \frac{Q_3 \cdot 100}{B_T \cdot Q_H^c} = \frac{V_{c.g.}(30,2CO + 25,8H_2 + 85,5CH_4)}{B_T \cdot Q_H^c}, \%,$$

где CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> – содержание окиси углерода, водорода и метана в сухих продуктах неполного сгорания, % по объему; Q<sub>H</sub><sup>c</sup> – низшая теплотворная способность топлива в ккал/м<sup>3</sup>.

Путем деления числителя и знаменателя дроби на теоретический объем сухих продуктов сгорания V<sub>c.g.</sub><sup>0</sup>, формула принимает вид

$$q_3 = \frac{(30,2CO + 25,8H_2 + 85,5CH_4) \cdot h}{P} 100\%,$$

где *h* – коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания воздухом; *P* – максимальное теплосодержание сухих продуктов сгорания данного вида топлива (практически постоянная – обобщенная константа).

При сжигании природного, нефтепромыслового, нефтезаводского, сжиженного и смешанного городского газов значение величины *P* около 4200 кДж/м<sup>3</sup> (1000 ккал/м<sup>3</sup>) формула для расчета потерь теплоты вследствие химической неполноты горения приобретает следующий вид

$$q_3 = (3CO + 2,5H_2 + 8,5CH_4)h\%. \quad (62)$$

Заменяя коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания *h* выражением CO<sub>2max</sub>/(CO<sub>2</sub> + CO + CH<sub>4</sub>) и подставляя взамен CO<sub>2max</sub> его значение для природного газа, равное 11,8%, получаем формулу

$$q_3 = \frac{35CO + 30H_2 + 100CH_4}{CO_2 + CO + CH_4} \%. \quad (63)$$

Потери теплоты вследствие химической неполноты горения нефтепромыслового газа

$$q_3 = \frac{40CO + 30H_2 + 100CH_4}{CO_2 + CO + CH_4} \%.$$

Потери теплоты вследствие химической неполноты горения сжиженного газа

$$q_3 = \frac{42CO + 35H_2 + 120CH_4}{CO_2 + CO + CH_4} \%.$$

Для определения потерь теплоты вследствие химической неполноты сгорания *q*<sub>3</sub> нефтезаводских газов можно применить ту же формулу, что и для сжиженных газов.

### Пример 19. Расчет коэффициента использования топлива при неполном сгорании

Газовым анализом установлено, что в продуктах сгорания природного газа содержится  $\text{CO}_2 = 9,0\%$ ,  $\text{O}_2 = 3\%$ . Определить коэффициент использования топлива, если температура уходящих газов  $t_{y.g.} = 170^\circ\text{C}$ , а температура воздуха подаваемого на горение  $t_b = 20^\circ\text{C}$ .

Определяем содержание  $\text{CO}$  в продуктах сгорания, используя основное уравнение газового анализа

$$\text{CO} = \frac{21 - \beta \text{RO}_2 - (\text{RO}_2 + \text{O}_2)}{0,605 + \beta} = \frac{21 - 0,78 \cdot 9 - (9 + 3)}{0,605 + 0,78} = 1,44\%.$$

Содержание в продуктах сгорания углеродсодержащих газов  $\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 = 9,0 + 1,44 = 10,44\%$ . Потери теплоты с уходящими газами при сжигании природного газа (величина  $Z$  определена по табл. 12)

$$q_2 = 0,01Z(t_{y.g.} - t_b) = 0,01 \cdot 4,9(170 - 20) = 7,35\%.$$

Потери теплоты вследствие химической неполноты горения

$$q_3 = \frac{35\text{CO} + 30\text{H}_2 + 100\text{CH}_4}{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4} = \frac{35 \cdot 1,44}{9,0 + 1,44} = 4,83\%.$$

Коэффициент использования природного газа

$$\text{К. и. т.} = 100 - (q_2 + q_3) = 100 - (7,35 + 4,83) = 87,82\%.$$

### Пример 20. Расчет коэффициента использования топлива при полном сгорании

Газовым анализом установлено, что в продуктах сгорания природного газа содержится  $\text{CO}_2 = 9,0\%$ ,  $\text{O}_2 = 5\%$ . Определить коэффициент использования топлива, если температура уходящих газов  $t_{y.g.} = 170^\circ\text{C}$ , а температура воздуха, подаваемого на горение,  $t_b = 20^\circ\text{C}$ .

Определяем содержание  $\text{CO}$  в продуктах сгорания, используя основное уравнение газового анализа

$$\text{CO} = \frac{21 - \beta \text{RO}_2 - (\text{RO}_2 + \text{O}_2)}{0,605 + \beta} = \frac{21 - 0,78 \cdot 9 - (9 + 5)}{0,605 + 0,78} = 0\%.$$

Содержание в продуктах сгорания углеродсодержащих газов  $\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 = 9,0\%$ . Потери теплоты с уходящими газами при сжигании природного газа (величина  $Z$  определена по табл. 12)

$$q_2 = 0,01Z(t_{y.g.} - t_b) = 0,01 \cdot 5,1(170 - 20) = 7,65\%.$$

Потери теплоты вследствие химической неполноты горения отсутствуют. Коэффициент использования природного газа

$$\text{К. и. т.} = 100 - (q_2 + q_3) = 100 - (7,65 + 0) = 92,35\%.$$



### **Пример 21. Расчет коэффициента использования топлива по данным газового анализа и коэффициенту $h$**

При сжигании природного газа получены продукты сгорания следующего состава:  $\text{CO}_2 = 9,2\%$ ;  $\text{O}_2 = 2,4\%$ ;  $\text{CO} = 1,6\%$ ;  $\text{H}_2 = 1,1$ ;  $\text{CH}_4 = 0,5\%$ . Температура уходящих газов  $t_{y.g.} = 190^\circ\text{C}$ , а температура воздуха, подаваемого на горение,  $t_b = 20^\circ\text{C}$ .

Содержание в продуктах сгорания углеродсодержащих газов

$$\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4 = 9,2 + 1,6 + 0,5 = 11,3\%.$$

Потери теплоты с уходящими газами (величина  $Z$ , табл. 12):

$$q_2 = 0,01Z(t_{y.g.} - t_b) = 0,01 \cdot 4,26(190 - 20) = 7,24\%.$$

Коэффициент разбавления сухих продуктов сгорания  $h$

$$h = \text{RO}_{2\max}/(\text{RO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4) = 11,8/(9,2 + 1,6 + 0,5) = 1,04.$$

Потери теплоты вследствие химической неполноты горения, формула (62)

$$q_3 = (3\text{CO} + 2,5\text{H}_2 + 8,5\text{CH}_4)h = (3 \cdot 1,6 + 2,5 \cdot 1,1 + 8,5 \cdot 0,5)1,04 = 12,32\%$$

Коэффициент использования природного газа

$$\text{К. и. т.} = 100 - (q_2 + q_3) = 100 - (7,24 + 12,32) = 80,44\%.$$

### **Пример 22. Расчет коэффициента использования топлива по данным полного газового анализа**

Состав продуктов сгорания природного газа по данным газового анализа:  $\text{CO}_2 = 8,5\%$ ;  $\text{O}_2 = 5,5\%$ ;  $\text{CO} = 0,3\%$ ;  $\text{H}_2 = 0,2$ ;  $\text{CH}_4 = 0,1\%$ . Температура уходящих газов  $t_{y.g.} = 200^\circ\text{C}$ , температура воздуха, подаваемого на горение,  $t_b = 20^\circ\text{C}$ .

Потери теплоты с уходящими газами

$$q_2 = 0,01Z(t_{y.g.} - t_b) = 0,01 \cdot 5,13(200 - 20) = 9,2\%.$$

Потери теплоты вследствие химической неполноты горения, формула (63)

$$q_3 = \frac{35\text{CO} + 30\text{H}_2 + 100\text{CH}_4}{\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{CH}_4} = \frac{35 \cdot 0,3 + 30 \cdot 0,2 + 100 \cdot 0,1}{8,5 + 0,3 + 0,1} = 3,0\%.$$

Коэффициент использования природного газа

$$\text{К. и. т.} = 100 - (q_2 + q_3) = 100 - (9,2 + 3) = 87,8\%.$$

### **Контрольное задание № 8**

Определить коэффициент использования природного газа при температуре уходящих газов:  $t_1 = 150^\circ\text{C}$ ;  $t_2 = 250^\circ\text{C}$ ;  $t_3 = 350^\circ\text{C}$ , если известно содержание  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в сухих продуктах сгорания (табл. 11).

## 9. КАЛОРИМЕТРИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРА ГОРЕНИЯ. ЖАРОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТОПЛИВА

### Основные понятия и расчетные формулы

#### Определение калориметрической температуры горения балансовым методом

Калориметрическую температуру горения определяют в соответствии с уравнением теплового баланса по уравнению

$$t_{\text{кал}} = \frac{Q_p^H + c_T t_T + V_B c_B t_B}{c_{\text{п.г}} V_{\text{п.г}}}, \quad ^\circ\text{C}, \quad (64)$$

где  $Q_p^H$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>;  $c_T$  – средняя удельная теплоемкость топлива на интервале температур от 0 до  $t_T$ , кДж/(кг·К) или кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $V_B$  – объем воздуха, поступающего для сжигания 1 кг твердого или жидкого топлива и 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива, м<sup>3</sup>;  $c_B$  – средняя удельная теплоемкость воздуха на интервале температур от 0 до  $t_B$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_B$  – температура воздуха, подаваемого на горение топлива, °C;  $V_{\text{п.г}}$  – объем продуктов сгорания 1 кг твердого и жидкого или 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива, м<sup>3</sup>;  $c_{\text{п.г}}$  – средняя удельная теплоемкость продуктов сгорания на интервале температур от 0 до  $t_{\text{кал}}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К).

Выражение  $C_{\text{п.г}} = c_{\text{п.г}} V_{\text{п.г}}$ , кДж/К, представляет собой теплоемкость продуктов сгорания. Она может быть определена тремя способами:

а) по суммарному действительному объему  $V_{\text{п.г}}$ , м<sup>3</sup>, и удельной теплоемкости  $c_{\text{п.г}}$  продуктов сгорания, определенной как средневзвешенное значение с учетом объемов компонентов:

$$c_{\text{п.г}} = \frac{c_{\text{CO}_2} V_{\text{CO}_2} + c_{\text{SO}_2} V_{\text{SO}_2} + c_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{N}_2} V_{\text{N}_2} + c_{\text{O}_2} V_{\text{O}_2}}{V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2}},$$

где  $c_{\text{CO}_2}$ ,  $c_{\text{SO}_2}$ ,  $c_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $c_{\text{N}_2}$ ,  $c_{\text{O}_2}$  – удельная объемная теплоемкость газов, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $V_{\text{CO}_2}$ ,  $V_{\text{SO}_2}$ ,  $V_{\text{H}_2\text{O}}$ ,  $V_{\text{N}_2}$ ,  $V_{\text{O}_2}$  – действительный объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>;

б) по суммарному теоретическому объему и удельной теплоемкости продуктов сгорания и теплоемкости и объему избыточного воздуха:

$$c_{\text{п.г}} V_{\text{п.г}} = c_{\text{п.г}}^o V_{\text{п.г}}^o + (\alpha - 1) c_B V_B^o,$$

$$c_{\text{п.г}}^o = \frac{c_{\text{CO}_2}^o V_{\text{CO}_2}^o + c_{\text{SO}_2}^o V_{\text{SO}_2}^o + c_{\text{H}_2\text{O}}^o V_{\text{H}_2\text{O}}^o + c_{\text{N}_2}^o V_{\text{N}_2}^o}{V_{\text{CO}_2}^o + V_{\text{SO}_2}^o + V_{\text{H}_2\text{O}}^o + V_{\text{N}_2}^o},$$

где  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $c_v$  – удельная объемная теплоемкость воздуха,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;  $V_B^o$  – теоретический объем воздуха, необходимый для сгорания топлива,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{CO}_2}^o, V_{\text{SO}_2}^o, V_{\text{H}_2\text{O}}^o, V_{\text{N}_2}^o$  – теоретический объем продуктов сгорания,  $\text{м}^3$ ;

в) по удельной теплоемкости газов и действительному объему продуктов сгорания:

$$c_{\text{п.г}} V_{\text{п.г}} = c_{\text{CO}_2} V_{\text{CO}_2} + c_{\text{SO}_2} V_{\text{SO}_2} + c_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{N}_2} V_{\text{N}_2} + c_{\text{O}_2} V_{\text{O}_2}.$$

Поскольку теплоемкость продуктов сгорания и избыточного воздуха, нагретых до  $t_{\text{кал}}$ , зависит от калориметрической температуры горения (табл. 13), расчет ведут по методу последовательных приближений.

Таблица 13

**Средняя удельная объемная теплоемкость,  $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ , при постоянном давлении газов и воздуха в интервале температур от 0 до  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$**

Температура $t, ^{\circ}\text{C}$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{SO}_2$	Сухой воздух
0	1,603	1,295	1,306	1,494	1,735	1,297
100	1,704	1,296	1,317	1,505	1,815	1,300
200	1,791	1,299	1,335	1,521	1,889	1,307
300	1,867	1,308	1,356	1,541	1,956	1,316
400	1,934	1,316	1,377	1,564	2,019	1,328
500	1,993	1,328	1,398	1,588	2,070	1,341
600	2,046	1,340	1,417	1,614	2,116	1,355
700	2,094	1,354	1,434	1,639	2,153	1,369
800	2,136	1,367	1,450	1,666	2,182	1,383
900	2,175	1,379	1,465	1,693	2,216	1,396
1000	2,209	1,392	1,478	1,721	2,237	1,408
1100	2,241	1,403	1,489	1,748	2,202	1,420
1200	2,269	1,414	1,501	1,774	2,279	1,431
1300	2,296	1,425	1,511	1,800	2,300	1,443
1400	2,320	1,435	1,521	1,826	2,321	1,453
1500	2,342	1,444	1,530	1,851	2,343	1,462
1600	2,356	1,453	1,538	1,876	2,363	1,471
1700	2,374	1,461	1,546	1,890	2,384	1,479
1800	2,392	1,469	1,554	1,921	–	1,487
1900	2,407	1,476	1,562	1,942	–	1,494
2000	2,422	1,483	1,569	1,963	–	1,501
2100	2,436	1,496	1,576	1,982	–	1,507
2200	2,448	1,502	1,583	2,001	–	1,514
2300	2,460	1,507	1,590	2,019	–	1,519
2400	2,471	1,513	1,596	2,037	–	1,525

Температуру нагрева воздуха  $t_b$ , необходимую для достижения заданной калориметрической температуры горения, можно определить по формуле

$$t_b = \frac{t_{\text{кал}} \sum c_{\text{п.г}} i V_{\text{п.г}} i - Q_{\text{н}}^{\text{п}} - c_{\text{т}} t_{\text{т}}}{V_{\text{б}}^{\text{д}} c_{\text{б}}}, ^\circ\text{C}.$$

### Жаропроизводительность топлива

При сжигании топлива в стехиометрическом объеме не нагретого воздуха ( $\alpha = 1$ ;  $t_b = t_{\text{т}} = 0^\circ\text{C}$ ) калориметрическая температура горения зависит только от свойств топлива и является важнейшей его теплотехнической характеристикой – жаропроизводительностью ( $t_{\text{max}}$ ).

Максимальная температура горения топлива (жаропроизводительность) определяют по формуле:

$$t_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{V_{\text{п.г}}^0 c_{\text{п.г}}^0} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}{c_{\text{CO}_2} V_{\text{CO}_2} + c_{\text{SO}_2} V_{\text{SO}_2} + c_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{N}_2} V_{\text{N}_2}},$$

где  $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$  – низшая теплота сгорания, кДж/кг твердого или жидкого топлива или кДж/м<sup>3</sup> газообразного;  $V_{\text{п.г}}^0$  – объем продуктов полного сгорания топлива в теоретически необходимом для горения объеме воздуха;  $c_{\text{п.г}}^0$  – средневзвешенная объемная теплоемкость продуктов сгорания при постоянном давлении в интервале температур от 0 до  $t_{\text{max}}$  (табл. 13).

Расчет жаропроизводительности ведут по методу последовательных приближений, определяя каждый раз средневзвешенную теплоемкость продуктов сгорания. Возможно с достаточной для технических расчетов точностью определить  $t_{\text{max}}$  по упрощенному методу, подставляя в знаменатель значение средней теплоемкости  $c_{\text{п.г}}^0$  продуктов сгорания от 0 до  $t_{\text{max}}$ , равное:

1,675 кДж/(м<sup>3</sup>К) – для продуктов сгорания газообразного топлива;

1,679 кДж/(м<sup>3</sup>К) – для продуктов сгорания жидкого топлива;

1,696 кДж/(м<sup>3</sup>К) – для продуктов сгорания твердого топлива.

### Определение калориметрической температуры горения упрощенными методами

Калориметрическую температуру горения можно приближенно считать на основе жаропроизводительности топлива по формуле

$$t_{\text{кал}} = t_{\text{max}} \frac{c_{0-t_{\text{max}}}}{c_{\text{п.г}} + (h-1)Bc_{\text{б}}^{изб}} + t_{\text{б}} KM, ^\circ\text{C},$$

где  $B$  – отношение объемов сухих и влажных продуктов сгорания (для природного газа  $B = 0,8$ );  $K$  – отношение теплоемкости воздуха в интервале температур от 0 до  $t_b$  к теплоемкости неразбавленного воздухом продуктов сгорания в интервале температур от 0 до  $t_{\text{max}}$  (значения при-

ведены в табл. 14);  $M$  – отношение объемов воздуха и продуктов сгорания,  $M = V_{\text{в}}^0 / V_{\text{г}}^0$  (для природного газа  $M = 0,9$ ).

Таблица 14

**Отношение средней теплоемкости продуктов сгорания ( $C_{\text{пр.сг}}$ ) и воздуха  $K$  на интервале температур от 0 до  $t$  к теплоемкости продуктов сгорания на интервале температур от 0 до  $t_{\text{max}}$**

Температура продуктов сгорания	$C_{\text{пр.сг}}$	$K$	Температура продуктов сгорания	$C_{\text{пр.сг}}$	$K$
100	0,82	0,77	1200	0,94	0,86
200	0,83	0,78	1300	0,95	0,87
300	0,84	0,79	1400	0,96	0,88
400	0,86	0,80	1500	0,97	0,89
500	0,87	0,81	1600	0,975	0,89
600	0,88	0,82	1700	0,980	0,89
700	0,89	0,83	1800	0,985	0,90
800	0,90	0,83	1900	0,990	0,90
900	0,91	0,84	2000	0,995	0,90
1000	0,92	0,85	2100	1,000	–
1100	0,93	0,86			

При полном сгорании топлива в воздухе при температуре  $t_{\text{в}} = 0^\circ\text{C}$ , формула для расчета калориметрической температуры горения:

$$t_{\text{кал}} = t_{\text{max}} \frac{C_{0-t_{\text{max}}}}{C_{\text{пр.сг}} + (h-1)BC_{\text{в}}^{\text{изб}}}, ^\circ\text{C}.$$

В этом случае калориметрическая температура горения топлива зависит только от коэффициента разбавления сухих продуктов сгорания избыточным воздухом. В табл. 15 приведены характеристики продуктов полного сгорания природного газа.

Таблица 15

**Характеристики продуктов полного сгорания природного газа**

Содержание в продуктах сгорания, %			Коэффициент разбавления, $h$	Коэффициент избытка воз- духа, $\alpha$	Калориметрическая температура горе- ния, $t_{\text{кал}}$ , $^\circ\text{C}$
$\text{CO}_2$	$\text{O}_2$	$\text{N}_2$			
11,8	0,0	88,2	1,00	1,00	2010
11,6	0,4	88,0	1,02	1,02	1990
11,4	0,7	87,9	1,03	1,03	1960
11,2	1,1	87,7	1,05	1,05	1940
11,0	1,4	87,6	1,07	1,06	1920
10,8	1,8	87,4	1,09	1,08	1900
10,6	2,1	87,3	1,11	1,10	1880
10,4	2,5	87,1	1,13	1,12	1850
10,2	2,8	87,0	1,15	1,14	1820

Содержание в продуктах сгорания, %			Коэффициент разбавления, $h$	Коэффициент избытка воздуха, $\alpha$	Калориметрическая температура горения, $t_{\text{кал}}$ , °C
CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>			
10,0	3,2	86,8	1,18	1,16	1800
9,8	3,6	86,6	1,20	1,18	1780
9,6	3,9	86,5	1,23	1,20	1760
9,4	4,2	86,4	1,25	1,22	1730
9,2	4,6	86,2	1,28	1,25	1700
9,0	5,0	86,0	1,31	1,28	1670
8,8	5,3	85,9	1,34	1,30	1650
8,6	5,7	85,7	1,37	1,33	1620
8,4	6,1	85,5	1,40	1,36	1600
8,2	6,4	85,4	1,44	1,40	1570
8,0	6,8	85,2	1,47	1,43	1540
7,8	7,1	85,1	1,51	1,46	1510
7,6	7,5	84,9	1,55	1,50	1470
7,4	7,8	84,8	1,59	1,53	1440
7,2	8,2	84,6	1,64	1,57	1410
7,0	8,5	84,5	1,68	1,61	1330
6,8	8,9	84,3	1,73	1,66	1350
6,6	9,2	84,2	1,79	1,71	1320
6,4	9,6	84,0	1,85	1,76	1290
6,2	10,0	83,8	1,90	1,82	1260
6,0	10,3	83,7	1,96	1,87	1230
5,8	10,7	83,5	2,03	1,94	1200
5,6	11,0	83,4	2,11	2,00	1170
5,4	11,4	83,2	2,18	2,07	1140
5,2	11,8	83,0	2,26	2,15	1100
5,0	12,1	82,9	2,36	2,22	1070
4,8	12,5	82,7	2,46	2,31	1040
4,6	12,8	82,6	2,56	2,41	1000
4,4	13,2	82,4	2,68	2,51	960
4,2	13,5	82,3	2,81	2,62	930
4,0	13,9	82,1	2,94	2,75	900

### Пример 23. Расчет калориметрической температуры горения балансовым методом

По составу газов, определенному в примере 14, рассчитать калориметрическую температуру горения при температуре воздуха, подаваемого на горение,  $t_{\text{в}} = 350^\circ\text{C}$  и температуре топлива  $t_{\text{т}} = 20^\circ\text{C}$ .

Действительное количество воздуха, необходимое для сгорания:

$$V_{\text{в}} = 10,32 \text{ м}^3$$

Объемы продуктов горения:

$$V_{\text{CO}_2} = 1,042 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 2,161 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{N}_2} = 8,066 \text{ м}^3;$$

$$V_{\text{O}_2} = 0,484 \text{ м}^3.$$

Теплота сгорания:

$$Q_{\text{H}}^{\text{p}} = 36\,512 \text{ кДж/м}^3.$$

Для расчета используем формулу

$$t_{\text{кал}} = \frac{Q_{\text{p}}^{\text{H}} + c_{\text{T}} t_{\text{T}} + V_{\text{B}} c_{\text{B}} t_{\text{B}}}{c_{\text{CO}_2} V_{\text{CO}_2} + c_{\text{H}_2\text{O}} V_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{N}_2} V_{\text{N}_2} + c_{\text{O}_2} V_{\text{O}_2}}, ^\circ\text{C},$$

Удельная теплоемкость воздуха на интервале от 0 до 400°C:

$$c_{\text{B}} = 1,316 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{K)}.$$

Теплоемкость природного газа

$$c_{\text{T}} = 1,6 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{K)}.$$

Принимаем  $t_{\text{кал}} = 2000^\circ\text{C}$ . При этой температуре удельные теплоемкости газов, кДж/(м<sup>3</sup>·K)

$$c_{\text{CO}_2} = 2,422;$$

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = 1,963;$$

$$c_{\text{N}_2} = 1,483;$$

$$c_{\text{O}_2} = 1,569.$$

$$t_{\text{кал}} = \frac{36\,512 + 1,6 \cdot 20 + 10,32 \cdot 1,316 \cdot 300}{2,422 \cdot 1,042 + 1,963 \cdot 2,161 + 1,483 \cdot 8,066 + 1,569 \cdot 0,484} = 2084 ^\circ\text{C}.$$

При  $t = 2100^\circ\text{C}$  (ближайшая к 2084°C) удельные теплоемкости газов

$$c_{\text{CO}_2} = 2,436;$$

$$c_{\text{H}_2\text{O}} = 1,982;$$

$$c_{\text{N}_2} = 1,496;$$

$$c_{\text{O}_2} = 1,576.$$

$$t_{\text{кал}} = \frac{36\,512 + 1,6 \cdot 20 + 10,32 \cdot 1,316 \cdot 300}{2,436 \cdot 1,042 + 1,982 \cdot 2,161 + 1,496 \cdot 8,066 + 1,576 \cdot 0,484} = 2067 ^\circ\text{C}.$$

Расчет заканчиваем, так как ближайшая температура к 2067°C – 2100°C, которая была принята для определения удельной теплоемкости

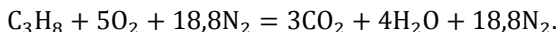
## Пример 24. Упрощенный расчет жаропроизводительности пропана

Определить жаропроизводительность  $t_{\max}$  пропана по упрощенному методу и графическим методом линейной интерполяции.

1. Упрощенный расчет  $t_{\max}$  пропана.

Низшая теплота сгорания пропана  $Q_H = 91\,270$  кДж/м<sup>3</sup>.

Уравнение горения пропана



Суммарный теоретический объем продуктов полного сгорания  $V_{\varepsilon}^0 = 25,8$  м<sup>3</sup>.

Жаропроизводительность пропана

$$t_{\max} = \frac{Q_H^p}{V_{\varepsilon}^0 C_{0-t_{\max}}} = \frac{91270}{25,8 \cdot 1,675} = 2112^\circ\text{C}.$$

2. Графический метод линейной интерполяции.

Задаемся температурой сгорания 2100°C, определяем по табл. 13 средние теплоемкости газов на интервале температур от 0 до 2100 °C:

$$C_{CO_2} = 2,436 \text{ кДж/(м}^3\text{K)};$$

$$C_{H_2O} = 1,982 \text{ кДж/(м}^3\text{K)};$$

$$C_{N_2} = 1,496 \text{ кДж/(м}^3\text{K)},$$

и рассчитываем, какой теплотой сгорания обладал бы пропан, если бы при его сгорании в стехиометрическом объеме воздуха развивалась температура 2100°C.

$$\begin{aligned} Q_{2100}^{C_3H_8} &= (V_{CO_2} C_{CO_2} + V_{H_2O} \cdot C_{H_2O} + V_{N_2} C_{N_2}) t_1 = \\ &= (3 \cdot 2,436 + 4 \cdot 1,982 + 18,8 \cdot 1,496) \cdot 2100 = 90770 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

Найденная величина ниже теплоты сгорания пропана  $Q_H$ , следовательно жаропроизводительность пропана  $t_{\max} > 2100$  °C.

Рассчитываем, какой теплотой сгорания обладал бы пропан, если бы при его сгорании в стехиометрическом объеме воздуха развивалась температура 2200 °C.

$$\begin{aligned} Q_{2200}^{C_3H_8} &= (V_{CO_2} C_{CO_2} + V_{H_2O} C_{H_2O} + V_{N_2} C_{N_2}) t_2 = \\ &= (3 \cdot 2,448 + 4 \cdot 2,001 + 18,8 \cdot 1,502) \cdot 2200 = 95590 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

В произвольном масштабе на оси абсцисс откладывают значения температур  $t_1$  и  $t_2$ , а на оси ординат – соответствующие указанным темпе-



ратурам теплоты сгорания топлива  $Q_1$  и  $Q_2$ . Точки  $(t_1, Q_1)$  и  $(t_2, Q_2)$  соединяют прямой. Значение  $t_{\max}$  определяется затем как абсцисса точки на прямой, ордината которой равна  $Q_H$  (рис. 3).

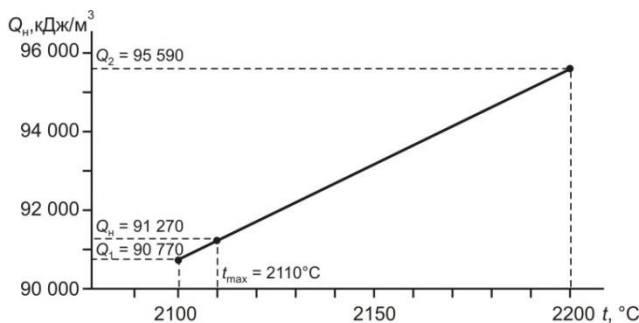


Рис. 3. Графический метод линейной интерполяции

Жаропроизводительность пропана  $t_{\max} = 2110$  °C.

### Пример 25. Определение calorиметрической теплоты сгорания природного газа упрощенными методами

Определить calorиметрическую температуру горения природного газа, если состав сухих продуктов сгорания:  $\text{CO}_2 = 11,2\%$ ,  $\text{O}_2 = 1,1\%$ , температура природного газа  $0^\circ\text{C}$ , воздуха  $300^\circ\text{C}$ ,  $t_{\max} = 2010^\circ\text{C}$ .

Определяем содержание CO в продуктах сгорания используя основное уравнение газового анализа

$$\text{CO} = \frac{21 - \beta \text{RO}_2 - (\text{RO}_2 + \text{O}_2)}{0,605 + \beta} = \frac{21 - 0,78 \cdot 11,2 - (11,2 + 1,1)}{0,605 + 0,78} = 0\%.$$

По табл. 14 видно, что содержание двуокиси углерода соответствует содержанию кислорода в продуктах полного сгорания и коэффициент разбавления  $h = 1,05$ ; табличное значение calorиметрической температуры горения  $t_{\text{кал}} = 2040^\circ\text{C}$ .

При полном сгорании топлива в воздухе при температуре  $t_B = 0^\circ\text{C}$ , calorиметрическую температуру горения рассчитываем на основе жаропроизводительности топлива:

$$\begin{aligned} t_{\text{кал}} &= t_{\max} \frac{C_{0-t_{\max}}}{C_{\text{пр.сг}} + (h - 1)BC_{\text{изб}}} = \\ &= 2010 \frac{1,675}{1,675 + (1,05 - 1) \cdot 0,8 \cdot 1,507} = 2040, ^\circ\text{C}, \end{aligned}$$

где  $B$  – отношение объемов сухих и влажных продуктов сгорания (для природного газа отношение равно 0,8);  $C_{\text{в}}^{\text{изб}}$  определена по табл. 15.

При сжигании топлива в подогретом воздухе калориметрическую температуру горения приближенно подсчитываем по формуле

$$t_{\text{кал}} = t_{\text{max}} \frac{C_{0-t_{\text{max}}}}{C_{\text{пр.сг}} + (h - 1)BC_{\text{в}}^{\text{изб}}} + t_{\text{в}}KM =$$

$$= 2010 \frac{1,675}{1,675 + (1,05 - 1) \cdot 0,8 \cdot 1,507} + 300 \cdot 0,79 \cdot 0,9 \cong 2150 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Величина  $K = 0,79$  определена по табл. 13.  $M$  – отношение объемов воздуха и продуктов сгорания  $V_{\text{в}}^0/V_{\text{г}}^0$ , для природного газа равно 0,9).

## Контрольное задание № 9

Определить калориметрическую температуру горения природного газа, если температура топлива  $0^{\circ}\text{C}$ ; температура воздуха, подаваемого на горение,  $150^{\circ}\text{C}$ ; коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,05$ . Состав топлива приведен в табл. 16.

Таблица 16

**Средний состав некоторых природных газов**

№ варианта	Состав природного газа, %						
	$\text{CH}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6$	$\text{C}_3\text{H}_8$	$\text{C}_4\text{H}_{10}$	$\text{C}_5\text{H}_{12}$	$\text{CO}_2$	$\text{N}_2$
1	98,7	0,35	0,12	0,06	–	0,1	0,67
2	85,0	4,4	2,4	1,8	1,3	0,1	5,0
3	98,5	0,5	0,1	–	–	–	0,9
4	94,0	1,8	0,4	0,1	0,1	0,1	3,5
5	95,1	2,3	0,7	0,4	0,8	0,2	0,5
6	81,8	5,1	2,1	1,3	0,7	0,4	8,5
7	98,3	0,3	0,12	0,15	–	0,1	1,03
8	93,5	4,0	1,0	0,5	0,5	0,1	0,4
9	89,6	4,1	0,7	0,1	1,3	3,8	0,4
10	90,9	5,2	1,3	0,2	1,5	–	0,9
11	78,3	6,4	1,7	–	–	0,60,1	12,8
12	85,0	3,3	1,2	0,5	–	0,2	9,9
13	91,5	3,3	1,4	–	1,6	1,1	2,0
14	94,6	0,5	0,3	0,2	–	0,5	3,3
15	92,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,2	5,9
16	90,0	4,5	0,9	0,3	1,1	–	3,0
17	93,8	2,9	1,0	0,6	–	1,8	1,7
18	96,4	1,5	0,1	0,1	0,1	–	–
19	90,4	2,7	0,9	0,2	0,6	–	5,2
20	94,8	0,8	0,2	0,1	0,6	–	3,5
21	88,5	–	0,9	0,2	0,4	–	10,0
22	93,5	2,6	1,4	2,5	–	–	–

## 10. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ

### Основные понятия и расчетные формулы

Теоретическая температура горения  $t_{\text{теор}}$  отличается от жаропроизводительности  $t_{\text{мах}}$  на величину теплоты диссоциации продуктов сгорания. При температуре выше  $1700^{\circ}\text{C}$   $\text{CO}_2$  диссоциирует (распадается) с образованием  $\text{CO}$  и  $\text{O}_2$ , а  $\text{H}_2\text{O}$  – с образованием  $\text{H}_2$  и  $\text{O}_2$ . При температуре выше  $2100^{\circ}\text{C}$  необходимо так же учитывать диссоциацию продуктов сгорания с образованием гидроксидов и атомарных газов. Расчет теоретической температуры горения осложняется зависимостью величины диссоциации от двух параметров – температуры и объема продуктов сгорания.

При температурах до  $2100^{\circ}\text{C}$  теоретическая температура горения  $t_{\text{теор}}$  может быть рассчитана по формуле

$$t_{\text{теор}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{p}} - Q_{\text{дисс}}}{V \cdot c},$$

где  $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$  – низшая теплота сгорания топлива,  $\text{кДж/кг}$  или  $\text{кДж/м}^3$ ;  $Q_{\text{дисс}}$  – теплота диссоциации продуктов сгорания, образующихся при сгорании  $1 \text{ кг}$  или  $1 \text{ м}^3$  топлива,  $\text{кДж/кг}$  или  $\text{кДж/м}^3$ ;  $V$  – объем продуктов сгорания,  $\text{м}^3/\text{кг}$  или  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $c$  – средневзвешенная теплоемкость продуктов сгорания от  $0$  до  $t_{\text{теор}}$ ,  $\text{кДж}/(\text{м}^3\text{K})$ .

Значения теплоемкости продуктов сгорания приведены в табл. 13.

Теплота диссоциации трехатомных газов определяется как:

$$Q_{\text{дисс}} = Q_{\text{дисс}}^{\text{CO}_2} + Q_{\text{дисс}}^{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{CO}_2} \cdot \alpha Q_{\text{CO}} + V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \beta Q_{\text{H}_2},$$

где  $V_{\text{CO}_2}$  и  $V_{\text{H}_2\text{O}}$  – количество двуокиси углерода и водяных паров в продуктах сгорания,  $\text{м}^3$ ;  $\alpha$  – степень диссоциации двуокиси углерода;  $\beta$  – степень диссоциации водяного пара;  $Q_{\text{CO}}$  и  $Q_{\text{H}_2}$  – низшая теплота сгорания двуокиси углерода и водяных паров,  $\text{кДж/м}^3$ .

Степень диссоциации двуокиси углерода и водяного пара при разных температурах и парциальных давлениях приведены в табл. 17, 18.

При сжигании топлива в кислороде или в воздухе обогащенном кислородом различие между теоретической температурой горения и жаропроизводительностью, которая определяется без учета диссоциации, имеет существенное различие, как это видно из графика (рис. 4).

Таблица 17

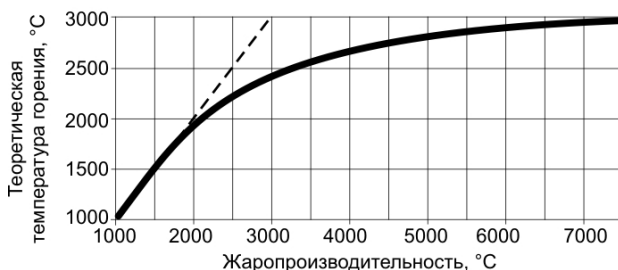
Степень диссоциации двуокиси углерода  $\alpha$ , %

$t, ^\circ\text{C}$	Парциальное давление двуокиси углерода, кПа																
	8	9	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80
500	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
1600	1,6	1,55	1,5	1,45	1,4	1,35	1,3	1,3	1,2	1,1	1,0	0,95	0,9	0,85	0,83	0,79	0,75
1700	3,0	2,9	2,8	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,0	1,9	1,8	1,75	1,7	1,65	1,6	1,5	1,4
1800	5,0	4,8	4,6	4,4	4,2	4,0	3,8	3,7	3,5	3,3	3,1	3,0	2,9	2,75	2,6	2,5	2,4
1900	8,1	7,8	7,6	7,2	6,8	6,5	6,3	6,1	5,6	5,3	5,1	4,9	4,7	4,5	4,3	4,1	3,9
2000	13,4	12,9	12,5	11,8	11,2	10,8	10,4	10,0	9,4	8,8	8,4	8,0	7,7	7,4	7,1	6,8	6,5
2100	19,6	18,9	18,3	17,3	16,6	15,9	15,3	14,9	13,9	13,1	12,5	12,0	11,5	11,2	10,5	10,1	9,7
2200	29,2	28,3	27,5	26,1	25,0	24,1	23,3	22,6	21,2	20,1	19,2	18,5	17,9	17,3	16,4	15,6	15,0
2300	37,9	36,9	35,9	34,3	32,9	31,8	30,9	30,0	28,2	26,9	25,7	24,8	24,0	23,2	22,1	21,1	20,3
2400	48,8	47,6	46,5	44,6	43,1	41,8	40,6	39,6	37,5	35,8	34,5	33,3	32,3	31,4	29,9	28,7	27,7
2500	59,3	58,0	56,9	55,0	53,4	52,0	50,7	49,7	47,3	45,4	43,9	42,6	41,4	40,4	38,7	37,2	36,0
2600	68,9	67,8	66,7	64,9	63,4	62,0	60,8	59,7	57,4	55,5	53,8	52,4	51,2	50,1	48,2	46,6	45,3
2700	77,6	76,6	75,7	74,1	72,8	71,6	70,5	69,4	67,3	65,5	63,9	62,6	61,3	60,3	58,4	56,8	55,4
2800	84,4	83,7	83,0	81,7	80,6	79,6	78,7	77,9	76,1	74,5	73,2	71,9	70,8	69,9	68,1	66,6	65,3
2900	89,4	88,8	88,3	87,4	86,5	85,8	85,1	84,5	83,0	81,8	80,7	79,7	78,8	78,0	76,5	75,2	74,0
3000	93,1	92,7	92,3	91,7	91,1	90,6	90,1	89,6	88,5	87,6	86,8	86,0	85,4	84,7	83,6	82,5	81,7

Таблица 18

Степень диссоциации водяного пара  $\beta$ , %

$t, ^\circ\text{C}$	Парциальное давление водяного пара, кПа																
	8	9	10	12	14	16	18	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80
1600	0,65	0,63	0,60	0,58	0,56	0,54	0,52	0,50	0,48	0,46	0,44	0,42	0,40	0,38	0,35	0,32	0,30
1700	1,16	1,12	1,08	1,02	0,95	0,90	0,85	0,80	0,76	0,73	0,70	0,67	0,64	0,62	0,60	0,57	0,54
1800	1,90	1,85	1,80	1,70	1,60	1,53	1,46	1,40	1,30	1,25	1,20	1,15	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90
1900	3,25	3,10	3,00	2,85	2,70	2,60	2,50	2,40	2,20	2,10	2,00	1,90	1,80	1,70	1,63	1,56	1,50
2000	4,60	4,45	4,30	4,00	3,80	3,55	3,50	3,40	3,15	2,95	2,80	2,65	2,57	2,50	2,40	2,30	2,20
2100	6,80	6,55	6,35	6,00	5,70	5,45	5,25	5,10	4,80	4,55	4,30	4,10	3,90	3,70	3,55	3,40	3,25
2200	9,90	9,60	9,30	8,80	8,35	7,95	7,65	7,40	6,90	6,50	6,25	5,90	5,65	5,40	5,10	4,90	4,70
2300	13,7	13,3	12,9	12,2	11,6	11,1	10,7	10,4	9,60	9,10	8,70	8,40	8,00	7,70	7,30	6,90	6,70
2400	18,4	17,7	17,2	16,3	15,6	15,0	14,4	13,9	13,0	12,2	11,4	11,2	10,8	10,4	9,90	9,40	9,00
2500	23,5	22,7	22,1	20,9	20,0	19,3	18,6	18,0	16,8	15,9	15,2	14,6	14,1	13,7	12,9	12,3	11,7
2600	31,0	30,1	29,2	27,8	26,7	25,7	24,8	24,1	22,6	21,5	20,5	19,7	19,1	18,5	17,5	16,7	16,0
2700	37,9	36,9	35,9	34,2	33,0	31,8	30,8	29,9	28,2	26,8	25,7	24,8	24,0	23,3	22,1	21,1	20,3
2800	47,3	46,1	45,0	43,2	41,6	40,4	39,3	38,3	36,2	34,6	33,3	32,2	31,1	30,2	28,8	27,6	26,6
2900	55,5	54,3	53,2	51,3	49,7	48,3	47,1	46,0	43,7	41,9	40,5	39,2	38,1	37,1	35,4	34,1	32,9
3000	63,8	62,6	61,6	59,6	58,0	56,6	55,4	54,3	51,9	50,0	48,4	47,0	45,8	44,7	42,9	41,4	40,1



**Рис. 4. Соотношение жаропроизводительности и теоретической температуры горения**

С допустимой для технических расчетов точностью для определения теоретической температуры горения при сжигании топлива в воздухе ( $t_{\max}$  до 2100°C), можно использовать зависимость:

$$t_{\text{теор}} = 0,94 \cdot t_{\max}.$$

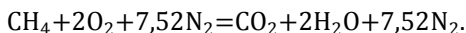
При  $t_{\max}$  порядка 2200°C теоретическую температуру горения можно определить по формуле

$$t_{\text{теор}} = 0,93 \cdot t_{\max}.$$

## **Пример 26. Расчет теоретической температуры горения метана**

Рассчитать теоретическую температуру горения метана.

Уравнение горения метана



Низшая теплота сгорания:

$$Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 35\,830 \text{ кДж/м}^3.$$

Суммарный теоретический объем продуктов полного сгорания

$$V_{\text{п.г.}}^0 = 10,52 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Состав продуктов сгорания:

$\text{CO}_2$  – 9,5%;

$\text{H}_2\text{O}$  – 19%;

$\text{N}_2$  – 71,5%.

Задаем температуру горения 1950°C. Степень диссоциации  $\text{CO}_2$  при парциальном давлении 9,5 кПа равна  $\alpha = 0,102$  (табл. 17), степень диссоциации  $\text{H}_2\text{O}$  при парциальном давлении 19 кПа –  $\beta = 0,0295$  (табл. 18).

Теплота диссоциации  $\text{CO}_2$ :

$$Q_{\text{дисс}}^{\text{CO}_2} = V_{\text{CO}_2} \cdot \alpha Q_{\text{CO}} = 1 \cdot 0,102 \cdot 12690 = 1290 \text{ кДж/м}^3.$$

Теплота диссоциации  $\text{H}_2\text{O}$ :

$$Q_{\text{дисс}}^{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \beta Q_{\text{H}_2} = 2 \cdot 0,0295 \cdot 10800 = 640 \text{ кДж/м}^3.$$

Суммарная теплота диссоциации:

$$Q_{\text{дисс}} = Q_{\text{дисс}}^{\text{CO}_2} + Q_{\text{дисс}}^{\text{H}_2\text{O}} = 1290 + 640 = 1930 \text{ кДж/м}^3$$

Теплоемкость продуктов сгорания от 0 до  $t_{\text{теор}}$ :

$$\begin{aligned} c &= c_{\text{CO}_2} \cdot r_{\text{CO}_2} + c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot r_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{N}_2} \cdot r_{\text{N}_2} = \\ &= 2,429 \cdot 0,095 + 1,952 \cdot 0,19 + 1,479 \cdot 0,715 = 1,659 \text{ кДж/(м}^3\text{K)}. \end{aligned}$$

Теоретическая температура горения метана:

$$t_{\text{теор}} = \frac{Q_{\text{н}} - Q_{\text{дисс}}}{V \cdot c} = \frac{35830 - 1930}{10,52 \cdot 1,659} = 1943 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Теоретическая температура горения метана по литературным данным составляет  $1947^\circ\text{C}$ .

## Контрольное задание № 10

Определить теоретическую температуру горения природного газа, состав которого приведен в табл. 16.

## 11. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ГОРЕНИЯ

### Основные понятия и расчетные формулы

При определении расчетной температуры горения, учитывается подогрев топлива и воздуха подаваемого на горение и содержание в продуктах сгорания избыточного воздуха, аналогично расчета калориметрической температуры горения, но также необходимо учитывать теплоту диссоциации продуктов сгорания. Формула для определения расчетной температуры горения имеет вид

$$t_{\text{расч}} = \frac{Q_n^p - Q_{\text{дисс}} + c_T t_T + V_B c_B t_B}{V_{\text{пр.сг}} c_{\text{пр.сг}} + V_B^{\text{изб}} c_B^{\text{изб}}} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

где  $Q_n^p$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>;  $Q_{\text{дисс}}$  – суммарная теплота диссоциации, кДж/кг или кДж/м<sup>3</sup>;  $c_T$  – средняя теплоемкость топлива от 0 до  $t_T$ , кДж/(кг·К) или кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $V_B$  – объем воздуха, поступающего для сжигания 1 кг твердого или жидкого топлива и 1 м<sup>3</sup> газового топлива, м<sup>3</sup>;  $c_B$  – средняя теплоемкость воздуха от 0 до  $t_B$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_B$  – температура воздуха, подаваемого на горение топлива, °С;  $V_{\text{пр.сг}}$  – объем продуктов сгорания 1 кг или 1 м<sup>3</sup> газового топлива, м<sup>3</sup>;  $c_{\text{пр.сг}}$  и  $c_B^{\text{изб}}$  – средневзвешенные теплоемкости продуктов сгорания и избыточного воздуха от 0 до  $t_{\text{расч}}$ , кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $V_B^{\text{изб}}$  – объем избыточного воздуха, содержащегося в продуктах сгорания, м<sup>3</sup>.

Расчет  $t_{\text{расч}}$  ведут по методу последовательных приближений. Значения теплоемкостей приведены в табл. 13.

Расчетную температуру горения можно определить также на основе калориметрической температуры горения с введением поправочного коэффициента  $\varphi$ .

$$t_{\text{расч}} = \varphi t_{\text{кал}}.$$

Для природного и сжиженного газов коэффициент  $\varphi \cong 0,95$  при  $t_{\text{кал}}$  от 2000 до 2100°С и коэффициент  $\varphi \cong 0,96$  при  $t_{\text{кал}}$  от 1900 до 2000°С.

### Контрольное задание № 11

Определить расчетную температуру горения природного газа, если температура топлива 0°С; температура воздуха подаваемого на горение - 150°С; коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,05$ . Состав топлива приведен в табл. 16.



## 12. РАСЧЕТ ОБЪЕМА ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПО ИХ СОСТАВУ

### Основные понятия и расчетные формулы

При проведении теплотехнических испытаний проводят анализ уходящих газов, посредством которого определяют состав сухих продуктов сгорания. На основе этих данных и данных о составе топлива рассчитывают объем сухих и влажных продуктов сгорания, значения которых используют для расчета потерь теплоты с уходящими газами и вследствие неполноты сгорания, для установления эффективности использования топлива и других целей.

При сгорании твердого или жидкого топлива используется понятие «условный углерод»  $K^p$  – сумма углерода и горючей серы, эквивалентной углероду по расходу кислорода на горение

$$K^p = C^p + 0,375S^p.$$

При сгорании 1 кг твердого или жидкого топлива образуется  $0,01 \cdot 1,87K^p$  м<sup>3</sup> газов, и объем сухих продуктов сгорания равен

$$V_{с.г} = 1,87 \frac{K^p}{RO_2 + CO + CH_4} \text{ м}^3/\text{кг}.$$

где  $RO_2, CO, CH_4$  – содержание газов в сухих продуктах сгорания, %, определяемые по данным газового анализа.

С учетом потерь топлива вследствие провала и уноса

$$V_{с.г} = 1,87 \frac{K^p}{RO_2 + CO + CH_4} \cdot \frac{100 - q_4}{100} \text{ м}^3/\text{кг},$$

где  $q_4$  – потери теплоты в результате провала не сгоревшего топлива через колосники, уноса дымовыми газами и т.д.

По рассчитанному объему сухих газов  $V_{с.г}$ , образующийся при сгорании 1 кг топлива, и объему водяного пара

$$V_{H_2O} = 0,111H^p + 0,0124W^p$$

определяются суммарный объем продуктов сгорания

$$V_{п.г} = V_{с.г} + V_{H_2O}.$$

При сжигании газообразного топлива объем сухих продуктов сгорания  $V_{с.г}$  можно рассчитать по балансу углерода в сжигаемом газе и образующихся продуктах сгорания, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>:

$$V_{с.г} = \frac{CO_2 + CO + CH_4 + 2C_2H_6 + 3C_3H_8 + 4C_4H_{10} + 5C_5H_{12}}{CO_2 + CO' + CH_4'}$$

где в числителе приведен состав углеродсодержащих компонентов в газовом топливе, а в знаменателе – в продуктах сгорания, %.

Объем водяного пара  $V_{H_2O}$  образующийся при полном сгорании газообразного топлива рассчитывают по формуле

$$V_{H_2O} = 0,01(H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_6 + 4C_3H_8 + 5C_4H_{10} + 6C_5H_{12} + H_2S),$$

а при неполном сгорании газа и содержании в продуктах сгорания  $H_2$  и  $CH_4$  по формуле

$$V_{H_2O}'' = V_{H_2O} - 0,01V_{c.r.}(H_2 + 2CH_4).$$

Суммарный объем продуктов полного сгорания

$$V_{п.г} = V_{c.r.} + V_{H_2O}.$$

Суммарный объем продуктов неполного сгорания

$$V_{п.г} = V_{c.r.} + V_{H_2O}''.$$

### **Пример 27. Определение объёма продуктов сгорания мазута по содержанию $RO_2$ и $CO$**

Определить объем продуктов сгорания мазута  $V_{\varepsilon}$  при содержании в сухих продуктах сгорания 12,2%  $RO_2$  и 0,2%  $CO$ . Состав мазута:  $C^p = 85\%$ ,  $H^p = 10,5\%$ ,  $N^p = 0,5\%$ ,  $S^p = 1\%$ ,  $W^p = 3\%$ .

Рассчитываем содержание в топливе «условного углерода»

$$K^p = C^p + 0,375S^p = 85 + 0,375 \cdot 1 = 85,375.$$

Находим объем сухих газов

$$V_{c.r.} = 1,87 \frac{K^p}{RO_2 + CO + CH_4} = 1,87 \frac{85,375}{12,2 + 0,2} = 12,875 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Рассчитываем объем водяных паров

$$V_{H_2O} = 0,111H^p + 0,0124W^p = 0,111 \cdot 10,5 + 0,0124 \cdot 3 = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

Суммарный объем продуктов сгорания

$$V_{п.г} = V_{c.r.} + V_{H_2O} = 12,875 + 1,2 = 14,075 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

### **Пример 28. Определение объёма продуктов сгорания природного газа по содержанию $RO_2$ и горючих газов**

В продуктах сгорания природного газа содержится:

$$CO'_2 = 8\%; CO' = 0,2\%; H'_2 = 0,2\%; CH'_4 = 0,1\%.$$

Состав природного газа:

$$\text{CH}_4 = 95\%; \text{C}_2\text{H}_6 = 1\%; \text{C}_3\text{H}_8 = 0,6\%;$$

$$\text{C}_4\text{H}_{10} = 0,4\%; \text{CO}_2 = 1\%; \text{N}_2 = 2\%.$$

Рассчитываем объем сухих газов

$$V_{\text{с.г}} = \frac{\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_6 + 3\text{C}_3\text{H}_8 + 4\text{C}_4\text{H}_{10}}{\text{CO}'_2 + \text{CO}' + \text{CH}'_4} =$$

$$= \frac{1 + 95 + 2 \cdot 1 + 3 \cdot 0,6 + 4 \cdot 0,4}{8 + 0,2 + 0,1} = 12,22 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Объем водяного пара без учета неполноты сгорания

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01(2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_6 + 4\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{C}_4\text{H}_{10}) =$$

$$= 0,01(2 \cdot 95 + 3 \cdot 1 + 4 \cdot 0,6 + 5 \cdot 0,4) = 1,97 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Объем водяного пара с учетом неполноты сгорания газа

$$V''_{\text{H}_2\text{O}} = V_{\text{H}_2\text{O}} - 0,01V_{\text{с.г}}(\text{H}_2 + 2\text{CH}_4) =$$

$$= 1,97 - 0,01 \cdot 12,22(0,2 + 2 \cdot 0,1) = 1,92 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Суммарный объем продуктов сгорания

$$V_{\text{п.г}} = V_{\text{с.г}} + V''_{\text{H}_2\text{O}} = 12,22 + 1,92 = 14,14 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

## Контрольное задание № 12

Определить суммарный объем продуктов сгорания природного газа, состав которого приведен в табл. 16. Данные газового анализа приведены в табл. 19. Определить коэффициент использования природного газа, при температуре уходящих газов  $t_{\text{y.г}} = 200^\circ\text{C}$ .

Таблица 19

Содержание газов в сухих продуктах сгорания природного газа

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CO <sub>2</sub> , %	7,0	7,4	9,8	7,6	7,8	8,2	8,4	8,8	9,0	9,2	8,0	8,8	9,0	9,2	9,6
CO, %	0,4	0,25	0,1	0,2	0,15	0,1	0,4	0,25	0,1	0,2	0,15	0,4	0,25	0,1	0,2
H <sub>2</sub> , %	0,2	0,15	0,1	0,2	0,15	0,1	0,2	0,15	0,1	0,2	0,15	0,2	0,15	0,1	0,2
CH <sub>4</sub> , %	0,1	0,1	0,15	0,15	0,15	0,1	0,1	0,15	0,1	0,1	0,15	0,1	0,1	0,15	0,15
Вариант	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
CO <sub>2</sub> , %	9,8	10,0	9,6	8,6	9,2	9,0	8,6	7,0	7,3	9,7	7,5	7,7	8,1	8,3	8,7
CO, %	0,15	0,1	0,4	0,25	0,1	0,2	0,15	0,4	0,25	0,1	0,2	0,15	0,1	0,4	0,25
H <sub>2</sub> , %	0,15	0,1	0,2	0,15	0,1	0,2	0,15	0,15	0,1	0,2	0,15	0,2	0,15	0,1	0,2
CH <sub>4</sub> , %	0,15	0,1	0,1	0,15	0,1	0,1	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,15	0,15	0,1

### 13. РАСЧЕТ ОБЪЕМОВ ВОЗДУХА И ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИ СОВМЕСТНОМ СЖИГАНИИ НЕСКОЛЬКИХ ВИДОВ ТОПЛИВА

#### Основные понятия и расчетные формулы

При совместном сжигании двух или нескольких видов топлива в заданном соотношении, например А кг твердого топлива, Б кг жидкого и В м<sup>3</sup> газообразного:

1. Для каждого вида топлива подсчитывают объемы воздуха  $V'_B$ , м<sup>3</sup>/кг топлива,  $V''_B$ , м<sup>3</sup>/кг топлива,  $V'''_B$ , м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> топлива, и продуктов сгорания

$$V'_{п.с} = V'_{RO_2} + V'_{H_2O} + V'_{N_2} + V'_{O_2}, \text{ м}^3/\text{кг топлива};$$

$$V''_{п.с} = V''_{RO_2} + V''_{H_2O} + V''_{N_2} + V''_{O_2}, \text{ м}^3/\text{кг топлива};$$

$$V'''_{п.с} = V'''_{RO_2} + V'''_{H_2O} + V'''_{N_2} + V'''_{O_2}, \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ топлива},$$

где  $V_{RO_2}$ ,  $V_{N_2}$ ,  $V_{O_2}$ ,  $V_{H_2O}$  – удельный объем углекислого газа, азота, кислорода и водяных паров, образующийся при сжигании каждого вида топлива, м<sup>3</sup>/кг топлива (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> топлива).

2. Складывают подсчитанные объемы, определяют суммарные объемы воздуха  $V_B$  и продуктов сгорания  $V_{п.с}$ :

$$V_B = AV'_B + BV''_B + BV'''_B, \text{ м}^3;$$

$$V_{п.с} = AV'_{п.с} + BV''_{п.с} + BV'''_{п.с}, \text{ м}^3;$$

3. По объему компонентов в продуктах сгорания

$$V_{RO_2} = AV'_{RO_2} + BV''_{RO_2} + BV'''_{RO_2}, \text{ м}^3;$$

$$V_{N_2} = AV'_{N_2} + BV''_{N_2} + BV'''_{N_2}, \text{ м}^3;$$

$$V_{O_2} = AV'_{O_2} + BV''_{O_2} + BV'''_{O_2}, \text{ м}^3,$$

и суммарному объему сухих продуктов сгорания

$$V_{с.г} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{O_2}, \text{ м}^3$$

подсчитывают процентный состав продуктов сгорания

$$RO_2 = \frac{V_{RO_2}}{V_{с.г}} 100\%; \quad N_2 = \frac{V_{N_2}}{V_{с.г}} 100\%; \quad O_2 = \frac{V_{O_2}}{V_{с.г}} 100\%.$$

Теплота сгорания смеси двух твердых, жидких топлив определяется суммированием их теплот сгорания с учетом массовых долей этих топлив в смеси, МДж/кг:

$$Q_{\text{н см}}^{\text{p}} = m_1 Q_{\text{н1}}^{\text{p}} + (1 - m_1) Q_{\text{н2}}^{\text{p}}$$

где  $m_1$  – массовая доля первого топлива в смеси;  $Q_{\text{н1}}^{\text{p}}$  и  $Q_{\text{н2}}^{\text{p}}$  – теплоты сгорания первого и второго топлив, МДж/кг.

Если смесь топлив задана в долях по тепловыделению каждого из них  $q_1$  и  $q_2 = 1 - q_1$  (доле первого и второго топлива в суммарном тепловыделении смеси этих топлив), то для перехода к массовым долям используется зависимость

$$m_1 = \frac{q_1 Q_{\text{н2}}^{\text{p}}}{q_1 Q_{\text{н2}}^{\text{p}} + (1 - q_1) Q_{\text{н1}}^{\text{p}}}.$$

Для обратного перехода используется зависимость

$$q_1 = \frac{m_1 Q_{\text{н1}}^{\text{p}}}{m_1 Q_{\text{н1}}^{\text{p}} + (1 - m_1) Q_{\text{н2}}^{\text{p}}}.$$

Аналогичные формулы устанавливают связь между объемными долями двух газовых топлив.

При совместном сжигании твердого (жидкого) топлива с газовым расчеты горения проводят на 1 кг твердого (жидкого) топлива с учетом удельного количества газового топлива в смеси, м<sup>3</sup>/кг. При этом рассчитывают условную теплоту сгорания смеси, МДж/кг твердого (жидкого) топлива

$$Q_{\text{н см}}^{\text{p}} = Q_{\text{н}}^{\text{p}} + x Q_{\text{н}}^{\text{c}},$$

где  $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$  и  $Q_{\text{н}}^{\text{c}}$  – теплота сгорания соответственно твердого (жидкого) топлива, МДж/кг и газового топлива МДж/м<sup>3</sup>,  $x$  – количество газового топлива, приходящегося на 1 кг твердого (жидкого) топлива, м<sup>3</sup>.

### Контрольное задание № 13

Определить условную теплоту сгорания смеси, МДж/кг, твердого и газового топлива, если смесь топлив задана в долях по тепловыделению каждого из них:  $q_1 = 0,25$  и  $q_2 = 1 - q_1$  (доле твердого и газового топлива в суммарном тепловыделении смеси). Рассчитать процентный состав продуктов сгорания, если смесь топлив сжигалась при коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,2$ . Состав твердого и газового топлива приведен в табл. 3 и табл. 4.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Равич М.Б. Эффективность использования топлива. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
2. Хзмалян Д.М. Теория топочных процессов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
3. Рациональное использование газа в энергетических установках: Справочное руководство /Р.Б. Ахмедов, О.Н. Брюханов, А.С. Иссерлин и др. – Л.: Недра, 1990. – 423 с.
4. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. чл.-кор. РАН В.А. Григорьева, проф. В.М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 560 с. (Справочная серия «Теплоэнергетика и теплотехника»: в 4 кн.; Кн. 2).

Учебное издание

**ГРИШКО Борис Михайлович  
ТРУБАЕВ Павел Алексеевич**

# **ПРАКТИКУМ**

## **по расчету горения топлива**

Федеральное бюджетное государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Белгородский государственный технологический университет  
им. В.Г. Шухова»  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46