

П.В. Коломиец

# РАСЧЁТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Методические указания  
к практическим занятиям  
по дисциплине «Химмотология»



Тольятти  
ТГУ  
2011

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Тольяттинский государственный университет  
Автомеханический институт  
Кафедра «Тепловые двигатели»

П.В. Коломиец

## **РАСЧЁТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА**

Методические указания  
к практическим занятиям по дисциплине «Химмотология»

Тольятти  
ТГУ  
2011

УДК 662.6/.9

ББК 31.35

К61

Рецензенты:

к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Автомобили и автомобильное хозяйство»  
Технологического института – филиала Ульяновской государственной  
сельскохозяйственной академии (г. Димитровград) *А.Л. Хохлов*;

д.т.н., доцент Тольяттинского государственного университета

*А.Г. Егоров*

**К61** Коломиец, П.В. Расчёт горения топлива: Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Химмотология» / П.В. Коломиец. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 38 с. : обл.

В методических указаниях рассмотрены теоретические основы процесса горения и его расчёт на основе стехиометрических соотношений и по приближённым зависимостям. Приведены примеры расчётов процесса сгорания для различных видов органического топлива. Представлены варианты задания для последующего расчёта горения топлива и условия его сжигания.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистратуры 140500.68 «Энергомашиностроение», магистерской программе 140506 «Поршневые и комбинированные двигатели», очной формы обучения.

УДК 662.6.9

ББК 31.35

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», 2011

## ВВЕДЕНИЕ

При подготовке магистрантов по направлению 140500.68 «Энергомашиностроение», магистерской программе 140506 «Поршневые и комбинированные двигатели» очной формы обучения практические занятия по дисциплине «Химмотология» являются важным этапом, в процессе прохождения которого магистрант приобретает навыки индивидуальной проектно-конструкторской деятельности. К ним можно отнести, например, такие как готовность осуществлять анализ различных вариантов, искать и вырабатывать компромиссные решения; способность использовать методы решения задач на определение оптимальных соотношений параметров различных систем; способность использовать знания теоретических основ рабочих процессов и методов расчётного анализа тепловых и энергетических установок.

Цель предложенного курса – ознакомить магистрантов с методами расчётов горения энергетического топлива и научить ими пользоваться.

При выполнении практических работ магистрант должен приобрести навыки самостоятельного расчётного анализа горения различных видов органического топлива.

# 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Сжигание любого топлива осуществляется в целях получения определенного количества теплоты, необходимой для проведения какого-либо технологического процесса, требующего получения высоких температур.

Процесс горения – это окисление горючих элементов топлива с выделением теплоты, поэтому в общем виде этот процесс можно представить следующим образом:

$$Г + О = ПГ + Q,$$

где  $Г$  – горючие составляющие топлива;  $О$  – окислитель;  $ПГ$  – продукты горения;  $Q$  – теплота, выделяемая при горении.

В качестве окислителя в тепловых и энергетических установках в основном используют атмосферный воздух или воздух, обогащённый кислородом, вырабатываемым на специальных станциях.

В большинстве случаев топливо в тепловых агрегатах сжигается полностью. Поэтому далее рассматриваются именно эти условия.

## 1.1. Цель расчёта процесса горения

Целью расчёта горения топлива является определение количественных характеристик, к которым относят расход атмосферного или обогащённого кислородом воздуха, необходимого для полного сжигания единицы топлива ( $L$ , м<sup>3</sup>/кг или м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), выход ( $V$ , м<sup>3</sup>/кг или м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) и состав продуктов полного сгорания, а также температуру горения топлива ( $t_{гор}$ , °С). Расчёт указанных характеристик можно осуществлять либо на основе представленного химического состава топлива (точные расчёты), либо на основе знания только теплоты сгорания и вида топлива (приближённые расчеты).

Если рассчитываемые характеристики получаются в результате точного учёта количества кислорода для полного окисления горючих составляющих, то эта характеристика получена на основе стехиометрических соотношений, и тогда им присваивают индекс «ноль».

Таким образом, минимально необходимое количество воздуха (теоретически необходимое) обозначается  $L_0$ , а теоретический выход продуктов сгорания от сжигания единицы топлива обозначается как  $V_0$ .

Ввиду сложности процесса горения теоретически необходимого количества воздуха бывает недостаточно для полного окисления горючих составляющих топлива. На практике воздух подают с некоторым избытком для обеспечения полного сгорания топлива. Количество действительно введённого воздуха обозначают  $L_0$  ( $\text{м}^3/\text{кг}$  или  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ). Отношение действительно введённого количества воздуха к теоретически необходимому называют коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{L_0}{L_0} \quad (1)$$

Коэффициент избытка воздуха задаётся в технических расчетах в зависимости от вида топлива, теплоты его сгорания, условий, протекания процесса и типа камеры сгорания.

При конкретном  $\alpha$  образуется действительный выход продуктов сгорания  $V_0$ . Состав продуктов сгорания, необходимый для расчёта процесса, а также теплообмена в рабочем пространстве теплового агрегата, будет рассмотрен ниже для конкретных видов топлива.

Ещё одной важной характеристикой процесса горения топлива является температура горения, которая зависит от многих факторов, таких как вид топлива, его теплота сгорания, коэффициент избытка воздуха, степень обогащения кислородом, температура подогрева топлива и воздуха, технологические условия сжигания топлива и т. д.

Чтобы эта характеристика была более определённой и соответствовала данному виду топлива и условиям его сжигания, принимают некоторые ограничения и допущения. Во-первых, условно допускают, что вся теплота, выделявшаяся при горении единицы топлива, остается в продуктах сгорания, т. е. принимаются условия отсутствия теплообмена отработавших газов с окружающей средой (адиабатические условия). Во-вторых, допускается ввод теплоты с подогретыми топливом и воздухом и, в-третьих, допускается, несмотря на избыток воздуха, что часть топлива по различным причинам может не догорать, и тогда появляется вынос теплоты с механическим недожогом (для твёрдого топлива) и с химическим недожогом (для всех видов топлива).

В этом случае тепловой баланс такого, адиабатического, процесса может быть представлен уравнением :

$$Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_u^p + Q_T + Q_B, \quad (2)$$

где  $Q_2$  – теплота продуктов сгорания;  $Q_3$  – химический недожог топлива включая диссоциацию продуктов сгорания;  $Q_4$  – механический недожог топлива;  $Q_n^p$  – теплота, вносимая единицей топлива при полном горении;  $Q_T$  – физическая теплота подогретого топлива;  $Q_B$  – физическая теплота подогретого воздуха.

В этом уравнении отсутствуют затраты теплоты на обработку технологического материала ( $Q_i$ ) и потери теплоты в окружающую среду ( $Q_5$ ) ввиду адиабатических условий процесса горения.

В этом случае теплоту продуктов сгорания  $Q_2$  можно представить как

$$Q_2 = C_{np.cc} t_{гор} V_{\delta}, \quad (3)$$

где  $C_{np.cc}$  – удельная теплоемкость продуктов сгорания;  $t_{гор}$  – температура горения;  $V_{\delta}$  – практический выход продуктов сгорания при сжигании единицы топлива.

Теперь можно решить уравнение (2) относительно температуры горения с подстановкой в него уравнения (3).

Если химический недожог (кроме диссоциации) и механический недожог топлива отсутствуют, но имеет место подогрев топлива и воздуха и сгорание топлива ведётся с избытком воздуха, характеризуемым  $\alpha$ , то решение уравнения (2) позволяет получить так называемую теоретическую температуру горения, °C:

$$t_{\alpha}^T = \frac{Q_H^p + Q_T + Q_B - Q_{3disc}}{C_{np.cc} V_{\alpha}}. \quad (4)$$

Если имеет место реальный химический и механический недожог топлива и сохраняются остальные условия, то можно рассчитать балансовую температуру горения, °C:

$$t_{\alpha}^{\delta} = \frac{Q_H^p + Q_T + Q_B - Q_3 - Q_4}{C_{np.cc} V_{\delta}}. \quad (5)$$

Таким образом, все необходимые характеристики процесса горения подвергаются расчёту. Однако существуют допущения, которые принимаются при осуществлении технических расчётов по горению.

## 1.2. Ограничения и допущения, принимаемые в технических расчётах

Все расчёты ведутся на единицу топлива (1 кг для твёрдого и жидкого и 1 м<sup>3</sup> для газообразного топлива). Газовые объёмы рассчитываются при нормальных условиях, т. е. при температуре 20 °С и давлении 760 мм. рт. ст. Объём одного киломоля газов в этих условиях принимают равным 22,4 м<sup>3</sup>. В качестве окислителя используют атмосферный воздух, состав которого принимают неизменным: 21% кислорода и 79% азота по объёму. Соотношение азота и кислорода воздуха представляют в виде константы:

$$K = \frac{79}{21} = 3,76 .$$

При обогащении кислородом константа соотношения азота и кислорода уменьшается. Значение константы с изменением содержания кислорода приведено ниже.

|                                  |      |     |     |     |     |      |      |      |      |
|----------------------------------|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| Содержание O <sub>2</sub> , об.% | 21   | 25  | 33  | 40  | 50  | 60   | 70   | 80   | 90   |
| $K = \frac{N_2}{O_2}$            | 3,76 | 3,0 | 2,0 | 1,5 | 1,0 | 0,66 | 0,43 | 0,25 | 0,11 |

Рассмотрим точные расчёты горения топлива, основанные на стехиометрических соотношениях горючих составляющих и окислителя. Такие расчёты принято называть аналитическими.

## 2. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ГОРЕНИЯ ТВЁРДОГО И ЖИДКОГО ТОПЛИВА

Для аналитического расчёта необходимо знать элементарный состав топлива.

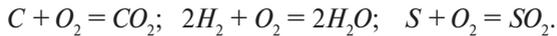
$$C^P + H^P + O^P + N^P + S^P + A^P + W^P = 100\% .$$

Сложность расчёта заключается в том, что состав топлива задан в массовых процентах, а кислород, необходимый для окисления горючих элементов, нужно определить в кубических метрах.

Ключом к решению этой задачи является молярное соотношение кислорода и горючего элемента в реакции окисления.

### 2.1. Определение количества кислорода для окисления горючих элементов топлива

Рассмотрим соответствующие реакции окисления:



Для окисления одного моля углерода массой 12 кг требуется один моль кислорода, занимающего объём 22,4 м<sup>3</sup>. Следовательно, расход кислорода на окисление 1 кг углерода будет равен  $\frac{22,4}{12} = 1,867$  м<sup>3</sup>/кг. Для окисления углерода  $C^P$ , содержащегося в 1 кг данного топлива, потребуется  $V_{O_2}^I = 0,01 \cdot 1,867 C^P$  м<sup>3</sup> кислорода.

Для окисления двух молей водорода массой 4 кг требуется только один моль кислорода, т. е. на горение 1 кг водорода необходимо затратить кислорода  $\frac{22,4}{4} = 5,6$  м<sup>3</sup>/кг. Тогда для окисления водорода в количестве  $H^P$  % потребуется объём кислорода  $V_{O_2}^H = 0,01 \cdot 5,6 H^P$  м<sup>3</sup>.

Аналогично получим для серы, м<sup>3</sup>:

$$V_{O_2}^S = 0,01 \frac{22,4 \cdot S^P}{32} = 0,01 \cdot 0,7 S^P .$$

Необходимо учесть, что в состав твёрдого и жидкого топлива входит некоторое количество кислорода  $O^P$  %, которое при горении топлива может участвовать в реакциях окисления, поэтому из суммарного объёма кислорода, необходимого для сгорания 1 кг топлива, следует вычесть объём кислорода топлива.

Произведём пересчёт, используя молярное соотношение: один моль кислорода массой 32 кг занимает объём 22,4 м<sup>3</sup>, т. е. 1 кг кислорода име-

ет объём  $\frac{22,4}{32} = 0,7 \text{ м}^3$ . Следовательно, объём кислорода, содержащегося в 1 кг топлива, составит ( $\text{м}^3$ ):  $V_{O_2}^o = 0,01 \cdot 0,7O^p$ .

Отсюда общий расход кислорода, необходимого для полного горения 1 кг жидкого или твёрдого топлива, будет равен ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ):

$$V_{O_2} = V_{O_2}^c + V_{O_2}^H + V_{O_2}^S - V_{O_2}^o = 0,01(1,867C^p + 5,6H^p + 0,7S^p - 0,7O^p).$$

## 2.2. Определение количества воздуха для сжигания 1 кг топлива

Теоретическое количество сухого воздуха можно определить из выражения ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ):

$$L_0^{c.g} = (1 + k)V_{O_2}. \quad (6)$$

Действительный расход сухого воздуха ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ):

$$L_0^{c.g} = \alpha L_0^{c.g}. \quad (7)$$

Влагосодержание воздуха, как и горючих газов, задают в количестве граммов водяных паров, приходящихся на  $1 \text{ м}^3$  сухого воздуха  $g^{c.g}$  г/ $\text{м}^3$ . Объём, занимаемый этой влагой, можно определить, используя молярное соотношение. Один моль водяных паров массой 18 кг занимает объём  $22,4 \text{ м}^3$ , а объём 1 г влаги равен  $\frac{22,4}{18 \cdot 1000} = 0,00124 \text{ м}^3/\text{г}$ . Тогда объём водяных паров, содержащихся в воздухе, необходимый для горения единицы топлива, будет равен  $0,00124 g^{c.g} L_0^{c.g}$ , а теоретический и действительный расход влажного воздуха составят ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ):

$$L_0^{6.g} = (1 + 0,00124 g^{c.g}) L_0^{c.g}; \quad (8)$$

$$L_0^{6.g} = \alpha L_0^{6.g}. \quad (9)$$

## 2.3. Определение количества и состава продуктов сгорания

При полном сгорании топлива с  $\alpha = 1$  образуются продукты сгорания, содержание  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ .

Объём отработавших газов, образующихся при сгорании 1 кг твёрдого или жидкого топлива при  $\alpha = 1$ , будет равен ( $\text{м}^3/\text{кг}$ ):

$$V_0 = V_0^{CO_2} + V_0^{SO_2} + V_0^{H_2O} + V_0^{N_2}. \quad (10)$$

Если обратиться к реакции окисления углерода, то, используя молярное соотношение, можно определить, что из одного моля углерода массой 12 кг образуется один моль  $CO_2$  объёмом 22,4 м<sup>3</sup>, т. е. в результате окисления 1 кг углерода образуется 1,867 м<sup>3</sup> диоксида 1 углерода, а объём  $CO_2$  (м<sup>3</sup>/кг):  $V_0^{CO_2} = 0,01 \cdot 1,867C^P$ .

Аналогичным образом можно определить объём образовавшегося  $SO_2$  (м<sup>3</sup>/кг):  $V_0^{SO_2} = 0,01 \cdot 0,7S^P$ .

В продуктах полного сгорания твёрдого или жидкого топлива водяной пар может образовываться:

- 1) при окислении водорода;
- 2) при переходе из топлива в результате испарения содержащейся в нём влаги;
- 3) внесенным влажным атмосферным воздухом.

Кроме того, при сжигании мазута в некоторых случаях его распыляют паром, который также полностью переходит в отработавшие газы ( $W^{\phi}$ , %).

Объём (м<sup>3</sup>/кг) водяных паров при окислении водорода можно определить из мольного соотношения по реакции его горения: из одного моля водорода массой 2 кг образуется один моль водяных паров объёмом 22,4 м<sup>3</sup>.

Тогда (м<sup>3</sup>/кг):  $V_{H_2O}^H = 0,01 \cdot 11,2H^P$ .

При испарении влаги топлива из одного моля воды массой 18 кг образуется один моль паров объёмом 22,4 м<sup>3</sup>, тогда удельный объём этой влаги составит (м<sup>3</sup>/кг):

$$V_{H_2O}^{W^P+W^{\phi}} = 0,01 \cdot 1,244(W^P + W^{\phi}).$$

Объём водяных паров, внесенных с воздухом, равен (м<sup>3</sup>/кг):

$$V_{H_2O}^{Возд} = 0,00124g^{c.в} L_{O_2}^{c.в}.$$

Источниками азота в продуктах полного сгорания являются само топливо ( $N^p$ , %) и атмосферный воздух.

По массе моля азота (28 кг) и его объёму (22,4 м<sup>3</sup>) легко определить объём 1 кг азота:  $\frac{22,4}{28} = 0,8$  м<sup>3</sup>.

Тогда (м<sup>3</sup>/кг):  $V_{N_2}^{мон} = 0,01 \cdot 0,8N^P$ .

В атмосферном воздухе при соотношении азота и кислорода

$$K = \frac{N_2}{O_2} \text{ объём азота составляет (м}^3\text{):}$$

$$V_{N_2}^{возд.} = kV_{O_2}.$$

Общий объём азота в отработавших газах (м<sup>3</sup>/кг):

$$V_0^{N_2} = 0,01 \cdot 0,8N^P + kV_{O_2}.$$

Состав продуктов полного сгорания при сжигании 1 кг топлива  $\alpha = 1$  может быть определён следующим образом:

$$\begin{aligned} CO_2 &= \frac{V_0^{CO_2}}{V_0} 100\%; & N_2 &= \frac{V_0^{N_2}}{V_0} 100\%; \\ SO_2 &= \frac{V_0^{SO_2}}{V_0} 100\%; & H_2O &= \frac{V_{H_2O}}{V_0} 100\%. \end{aligned} \quad (11)$$

Объём и состав продуктов сгорания при  $\alpha > 1$  будет отличаться от аналогичных характеристик при  $\alpha = 1$  вследствие введения избыточного воздуха.

В связи с тем, что при  $\alpha = 1$  предусматривается полное окисление горючих компонентов, объём  $CO_2$ ,  $SO_2$  и  $H_2O$ , естественно, не изменится и при  $\alpha > 1$ . Но избыточный воздух повлияет на величины  $V_{H_2O}$  и  $V_{N_2}$  (м<sup>3</sup>/кг):

$$V_{H_2O}^{H_2O} = V_0^{H_2O} + 0,00124g^{c,e}(\alpha - 1)L_0^{c,e}; \quad V_0^{N_2} = V_0^{N_2} + k(\alpha - 1)V_{O_2}.$$

В дополнение к этому в продуктах сгорания появится свободный (избыточный) кислород, объём (м<sup>3</sup>/кг) которого определяют как

$$V_0^{изб} = (\alpha - 1)V_{O_2}.$$

С учетом всех дополнений можно рассчитать удельный объём (м<sup>3</sup>/кг) продуктов сгорания при  $\alpha > 1$

$$V_{\partial} = V_{\partial}^{CO_2} + V_{\partial}^{SO_2} + V_{\partial}^{H_2O} + V_{\partial}^{N_2} + V_{O_2}^{изб}. \quad (12)$$

Состав продуктов сгорания при  $\alpha > 1$ :

$$\begin{aligned} CO_2 &= \frac{V_{\partial}^{CO_2}}{V_{\beta}} \cdot 100\%; & SO_2 &= \frac{V_{\partial}^{SO_2}}{V_{\alpha}} \cdot 100\%; & H_2O &= \frac{V_{\partial}^{H_2O}}{V_{\alpha}} \cdot 100\%; \\ N_2 &= \frac{V_{\partial}^{N_2}}{V_{\alpha}} \cdot 100\%; & O_2^{изб} &= \frac{V_{O_2}^{изб}}{V_{\alpha}} \cdot 100\%. \end{aligned}$$

#### 2.4. Определение температуры горения

Приведенные формулы (4) и (5) позволяют рассчитывать теоретическую и балансовую температуры горения топлива. Однако эти расчёты достаточно затруднены, так как входящая в указанные формулы теплоёмкость продуктов сгорания сама является функцией искомой температуры.

Расчёт температуры горения различного топлива с использованием  $i$ - $t$ -диаграмм исключает громоздкие расчёты [1].

Эти диаграммы построены в координатах «температура – общее теплосодержание продуктов сгорания» (приложение Д). Общее теплосодержание  $i_{\text{общ}}$  представляет собой произведение удельной теплоёмкости продуктов сгорания  $C_{\text{пр.сж}}$  и их температуры. Если в формулах (4) и (5)  $C_{\text{пр.сж}}$  из знаменателя правой части перенести в левую часть равенства, то получим  $i_{\text{общ}}$ . Тогда в правой части равенства, разделив почленно числитель на величину  $V_{\text{д}}$ , получим отдельные составляющие общего теплосодержания продуктов сгорания.

Итак, химическая энтальпия (кДж/м<sup>3</sup>) продуктов сгорания:

$$i_x = \frac{Q_H^p}{V_{\text{д}}} \quad (13)$$

физическая энтальпия (кДж/м<sup>3</sup>) подогретого топлива:

$$i_T = \frac{c_T t_T}{V_{\text{д}}}, \quad (14)$$

где  $C_T$  – удельная теплоемкость подогретого топлива;  $t_T$  – температура подогрева топлива.

Энтальпия (кДж/м<sup>3</sup>) подогретого воздуха в этом случае будет выражена как

$$i_B = \frac{c_B t_B L_{\alpha}}{V_{\text{д}}}, \quad (15)$$

где  $C_{\alpha}$  – удельная теплоемкость подогретого воздуха;  $t_{\alpha}$  – температура подогрева воздуха;  $L_{\alpha}$  – действительное количество воздуха для сжигания единицы топлива.

Энтальпия химического и механического недожога топлива записывается в виде:

$$\left. \begin{aligned} i_3 &= \frac{Q_3}{V_{\text{д}}} \\ i_4 &= \frac{Q_4}{V_{\text{д}}} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

Значения  $Q_3$  и  $Q_4$  либо принимают в долях от  $Q_H^p$  в зависимости от вида топлива и способа его сжигания, либо рассчитывают по имеющимся данным анализа состава продуктов сгорания. Таким образом, для определения теоретической температуры горения топлива  $t_{\alpha}^T$  общее теплосодержание (кДж/м<sup>3</sup>), рассчитывают по формуле:

причём величина  $i_{э.дисс}$  учтена при построении  $i-t$ -диаграмм и в расчёт по формуле (17) не входит. Определение балансовой температуры горения  $t_{\alpha}^B$  кДж/м<sup>3</sup>, осуществляется на основании расчёта общего тепло-содержания:

$$i_{общ}^{\delta} = i_x + i_T + i_B - i_3 - i_4, \quad (18)$$

В прил. 4 приведены три  $i-t$ -диаграммы, каждая из которых относится к определённой группе топлива. В первую группу входит газообразное топливо с теплотой сгорания  $Q_n^p > 12000$  кДж/м<sup>3</sup> (прил. 4, рис. 4.1).

Вторая группа топлива включает смеси газов с  $Q_n^p = 8000...12000$  кДж/м<sup>3</sup>, мазут, каменные угли, антрацит и кокс (прил. 4, рис. 4.2). В третью группу топлива включены смеси газов с  $Q_n^p < 8000$  кДж/м<sup>3</sup>, бурые угли и торф (прил. 4, рис. 4.3).

Каждая из диаграмм представляет семейство сплошных и пунктирных кривых. По сплошным кривым определяют теоретическую температуру горения  $t^T$ , а по пунктирным – балансовую  $t^B$ . Серия сплошных и пунктирных кривых позволяет установить зависимость температуры горения от избыточного воздуха в продуктах сгорания. Этот параметр рассчитывают по формуле

$$V = \frac{L_{\delta} - L_0}{V_{\delta}} \cdot 100\%. \quad (19)$$

Ключ к работе с  $i-t$ -диаграммой следующий: по формулам (13)-(18) рассчитывают теплосодержание  $i_{общ}$  и  $i_{общ}^B$ , затем по формуле (19) определяют величину  $V_L$ . В зависимости от вида топлива и величины теплоты его сгорания  $Q_n^p$  выбирают нужную  $i-t$ -диаграмму (приложение Г), на оси ординат которой откладывают значение  $i_{общ}$ , и проводят горизонтальную линию до соответствующей сплошной кривой, означающей рассчитанное значение  $V_L$ , из точки пересечения опускают перпендикуляр на ось абсцисс и читают значение  $t_{\alpha}^T$ . То же самое проделывают при определении  $t_{\alpha}^B$  с той разницей, что на ординате откладывают величину  $i_{общ}$  и горизонталь проводят до соответствующей пунктирной кривой значения  $V_L$ .

### 3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ГОРЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА

В отличие от твёрдого и жидкого топлива химический состав газообразного топлива приводится на сухую массу. Для пересчёта состава топлива на рабочую массу необходимо знать значение влагосодержания  $g^{сз}$ , которое можно выбрать по табл. 2.

Таблица 2

Влагосодержание в газах в зависимости от температуры

| $t, ^\circ\text{C}$ | 0   | 5   | 10  | 20   | 30   | 40   | 50    | 60    | 70    |
|---------------------|-----|-----|-----|------|------|------|-------|-------|-------|
| $g, \text{г/м}^3$   | 4,9 | 7,0 | 9,8 | 19,0 | 35,1 | 63,1 | 111,3 | 197,0 | 356,0 |

По формуле

$$x^{B,\Gamma} = \frac{100}{\frac{803,6}{g} + 1} \quad (20)$$

рассчитывают процентное содержание водяных паров в газообразном топливе, и по формуле

$$x^{B,\Gamma} = x^{C,\Gamma} \frac{100 - H_2O^{B,\Gamma}}{100} \% \quad (21)$$

производят пересчёт всех элементов топлива на рабочую массу. После пересчёта сумма всех химических элементов топлива, включая  $H_2O$ , должна равняться 100%.

Далее по формуле рассчитывают теплоту сгорания топлива  $Q_u^p$ :

$$\begin{aligned} Q_H^P = & 127,7CO^{B,\Gamma} + 108H_2^{B,\Gamma} + 358CH_4^{B,\Gamma} + 590C_2H_4^{B,\Gamma} + \\ & + 555C_2H_2^{B,\Gamma} + 636C_2H_6^{B,\Gamma} + 913C_3H_8^{B,\Gamma} + 1185C_4H_{10}^{B,\Gamma} + \\ & + 1465C_5H_{12}^{B,\Gamma} + 234H_2S^{B,\Gamma}. \end{aligned}$$

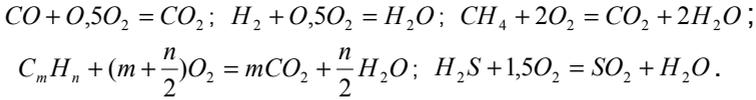
#### 3.1. Определение количества кислорода и воздуха для сжигания 1 м<sup>3</sup> газа

Имеем элементарный состав газообразного топлива:

$$\begin{aligned} CO^{B,\Gamma} + H_2^{B,\Gamma} + CH_4^{B,\Gamma} + C_m H_n^{B,\Gamma} + H_2S^{B,\Gamma} + CO_2^{B,\Gamma} + \\ + N_2^{B,\Gamma} + O_2^{B,\Gamma} + \dots + H_2O^{B,\Gamma} = 100\%. \end{aligned}$$

Вывод расчётных формул для газообразного топлива существенно проще, чем для твёрдого и жидкого, так как топливо и окислитель

имеют одно и то же агрегатное состояние. Реакции окисления горючих составляющих топлива имеют вид:



Как видно из уравнений, на каждый моль горючей газообразной составляющей приходится определённое количество кислорода, поэтому для определения объёма кислорода, необходимого для окисления 1 м<sup>3</sup> топлива, составляют простое уравнение, соответствующее стехиометрическим соотношениям при  $\alpha = 1$ :

$$V_{O_2} = 0,01 \left[ 0,5 \left( CO^{B,\Gamma} + H_2^{B,\Gamma} \right) + \left( m + \frac{n}{4} \right) \Sigma C_m H_n^{B,\Gamma} + 1,5 H_2 S^{B,\Gamma} - O_2^{B,\Gamma} \right]. \quad (22)$$

Далее по формуле (6) находим количество воздуха, подаваемого для горения 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива при  $\alpha = 1$ , а по формуле (7) –  $\alpha > 1$ .

### 3.2. Определение количества продуктов сгорания газообразного топлива

Продукты полного сгорания газообразного топлива состоят из  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $H_2O$  и  $N_2$ . Поскольку  $CO_2$  и  $SO_2$  при анализе состава продуктов горения неразделимы, обе молекулы далее будем обозначать, одним условным обозначением  $RO_2$ .

Определим объёмы отдельных составляющих продуктов сгорания при  $\alpha = 1$ :

$$V_0^{RO_2} = 0,01 \left( RO_2^{B,\Gamma} + CO^{B,\Gamma} + H_2 S^{B,\Gamma} + m \Sigma C_m H_n^{B,\Gamma} \right); \quad (23)$$

$$V_0^{H_2O} = 0,01 \left( H_2 O^{B,\Gamma} + H_2^{B,\Gamma} + H_2 S^{B,\Gamma} + \frac{n}{2} \Sigma C_m H_n^{B,\Gamma} \right); \quad (24)$$

$$V_0^{N_2} = 0,01 N_2^{B,\Gamma} + k V_{O_2}. \quad (25)$$

Тогда выход продуктов сгорания при сжигании 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива при  $\alpha = 1$  составит:

$$V_0 = V_0^{RO_2} + V_0^{H_2O} + V_0^{N_2}. \quad (26)$$

При сжигании 1 м<sup>3</sup> газообразного топлива с  $\alpha > 1$  в продуктах сгорания появится избыточный воздух, который влияет только на объём азота  $V_{N_2}$  и даёт избыточный кислород, поэтому при  $\alpha > 1$ :

$$V_{\delta}^{N_2} = 0.01N_2^{B,G} + \alpha k V_{O_2}; \quad (27)$$

$$V_{O_2}^{usz} = (\alpha - 1) V_{O_2}. \quad (28)$$

Тогда выход продуктов сгорания при  $\alpha > 1$ :

$$V_{\delta} = V_{\delta}^{RO_2} + V_{\delta}^{H_2O} + V_{\delta}^{N_2} + V_{O_2}^{usz}. \quad (29)$$

При этом необходимо отметить, что  $V_0^{RO_2} = V_{\delta}^{RO_2}$  и  $V_0^{H_2O} = V_{\delta}^{H_2O}$ .

Расчёт состава продуктов сгорания и температуры горения осуществляется так же, как для твёрдого и жидкого топлива (п. 2.3 и 2.4).

#### 4. ПРИБЛИЖЁННЫЙ МЕТОД РАСЧЁТА ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Инженерные расчёты тепловых процессов горения топлива допускают погрешности в пределах 1–5%.

Учитывая, что зависимость между теплотой сгорания топлива, расходом воздуха и выходом продуктов сгорания является линейной, а разность между объёмом продуктов сгорания и количеством воздуха, подаваемого для горения единицы топлива, есть величина постоянная для данного вида топлива ( $\Delta V = V_0 + L_0 = V_o - L_o$ ), предложены зависимости для определения количественных характеристик процесса горения как функции теплоты сгорания топлива ( $L_o, \Delta V \text{ м}^3/\text{кг} (\text{м}^3/\text{м}^3); V_o V_o \text{ м}^3/\text{м}^3$ ) [2]:

$$L_0 = 0,001l_1 Q_H^P + l_2 W^P - \Delta L; \quad (30)$$

$$\Delta V = S_1 - 0,001S_2 Q_H^P - 0,0124(W^P - W_{ГР}); \quad (31)$$

$$V_0 = L_0 + \Delta V; \quad (32)$$

$$V_o = L_o + \Delta V; \quad (33)$$

где  $l_1, l_2, S_1, S_2$  – коэффициенты;  $\Delta L, W_{sp}$  – поправки.

Значения коэффициентов и поправок приведены в прил. 3, табл. 3.1.

Сопоставление результатов расчёта характеристик процесса горения, вычисленных аналитическим методом и по приближённым формулам, показывает, что в большинстве случаев расхождение составляет не более 1–3%, это практически не оказывает влияния на величину температуры горения топлива.

## 5. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ХАРАКТЕРИСТИК ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ

В практике эксплуатации тепловых агрегатов встречается сжигание комбинированного топлива, т. е. состоящего из двух и более видов.

Например, на металлургических заводах широко используется коксо доменная смесь, состоящая из доменного и коксового газов, смешанных друг с другом в различных пропорциях в зависимости от требуемой теплоты сгорания.

Ввиду напряжённого топливного баланса металлургических заводов с полным циклом в последнее время в коксо доменную смесь добавляют природный газ. Таким образом, получается смесь уже трёх видов топлива. Иногда применяют совместное сжигание газообразного и жидкого топлива, например коксо доменной смеси и мазута, природного газа и мазута и т. д.

Во всех случаях расчёты процесса сгорания смесей различного топлива усложняются.

### 5.1. Расчёт характеристик горения смесей газообразного топлива

Если расчёт необходимо провести аналитическим способом, т. е. когда задан химический состав смеси различного газообразного топлива, то методика аналогична изложенной в разделе 4. Если расчёт горения газообразной топливной смеси ведётся по приближенным формулам, то здесь нужно знать пропорцию или долю отдельных видов газообразного топлива в газовой смеси. Например, доля доменного газа —  $x$ , а доля коксового газа —  $y$  в коксо доменной смеси. Эти доли могут быть назначены, а могут быть и вычислены, если известны теплоты сгорания доменного газа  $(Q_H^P)_{д.г.}$ , коксового газа  $(Q_H^P)_{к.г.}$  и их смеси  $(Q_H^P)_{см.}$ . Тогда составляют два уравнения, из которых и определяют соответствующие доли:

$$\left. \begin{aligned} x + y &= 1 \\ x_{к.г.} &= (Q_H^P)_{д.г.} + y(Q_H^P)_{к.г.} = (Q_H^P)_{см.} \end{aligned} \right\} \quad (34)$$

Далее отдельно для каждого вида газообразного топлива рассчитывают характеристику  $L_0$  и  $V_0$ ,  $L_0$  и  $V_0$ , используя данные прил. 3, а за-

тем, применяя долевые соотношения, рассчитывают эти характеристики для топливной смеси в целом:

$$\left. \begin{aligned} L_{OCH} &= xL_{зДГ} + yL_{ОКГ}, \\ V_{OCH} &= xV_{ОДГ} + yV_{ОКГ}, \\ \Delta V_{CH} &= V_{OCH} - L_{OCH}, \\ L_{\delta CH} &= \alpha L_{OCH}, \\ V_{\delta CH} &= L_{\delta CH} + \Delta V_{CH} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

## 5.2. Расчёт характеристик горения смесей газообразного и жидкого топлива

В случае, если сжигают совместно газообразное и жидкое топливо, например, природный газ и мазут, необходимо знать пропорции подаваемого топлива, и далее, независимо от метода расчёта, отдельно для газообразного и жидкого топлива определяют соответствующие характеристики  $L_{ог}$ ,  $L_{ож}$ ,  $L_{дг}$ ,  $L_{дж}$ ,  $V_{ог}$ ,  $V_{ож}$ ,  $V_{дг}$ ,  $V_{дж}$ .

Эти характеристики используются при расчёте абсолютных расходов воздуха  $V_{\alpha}$  и продуктов сгорания  $V_{np.cz}$  при сжигании газообразного топлива в количестве  $B_{г}$  м<sup>3</sup>/ч и жидкого топлива в количестве  $B_{ж}$  кг/ч:

$$\begin{aligned} V_B &= L_{дг}B_{г} + L_{дж}B_{ж}; \\ V_{np.cz} &= V_{дг}B_{г} + V_{дж}B_{ж}. \end{aligned} \quad (36)$$

Расчёт температур горения осуществляют с использованием  $i$ - $t$ -диаграмм, предварительно определив общие энтальпии.

При расчёте  $i_{\text{общ}}$  и  $i_{\text{общ}}^B$  может возникнуть затруднение с определением  $i_T = c_T \cdot t_T$  при подогреве топлива, так как химический состав его неизвестен и невозможно подсчитать удельную теплоёмкость  $C_T$ .

В этом случае необходимо воспользоваться данными прил. 3, табл. 3.2.

### **Библиографический список**

1. Тройб, С.Г. Расчёт температуры горения / С.Г Тройб. – Свердловск : Изд-во УПИ, 1960. – 36 с.
2. Гордон, Я.М. Теплотехнические расчёты металлургических печей / Я.М. Гордон, Б.Ф. Зебнин, М.Д. Казяев. – М. : Металлургия, 2002. – 368 с.

### Пример расчёта горения жидкого топлива

#### 1. Исходные данные

Задан химический состав мазута.

| $C^p$ | $H^p$ | $O^p$ | $N^p$ | $S^p$ | $A^p$ | $W^p$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 85,9  | 9,9   | 0,5   | 0,3   | 0,4   | 0,2   | 2,8   |

Кроме того, известны:

- коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 1,28$ ;
- влажность воздуха  $g^{c.в} = 13,9$  г/см<sup>3</sup>;
- температура мазута  $t_T = 98^\circ\text{C}$ ;
- температура подогрева воздуха  $t_e = 300^\circ\text{C}$ .

#### 2. Определение количества воздуха, необходимого для сжигания 1 кг мазута

Рассчитаем количество кислорода, окисляющего все горючие компоненты мазута:

$$V_{O_2} = 0,01 \cdot (1,867C^p + 5,6H^p + 0,7S^p - 0,7O^p) = \\ = 0,01 \cdot (1,867 \cdot 85,9 + 5,6 \cdot 9,9 + 0,7 \cdot 0,4 - 0,7 \cdot 0,5) = 2,157 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Теоретический расход сухого атмосферного воздуха будет равен:

$$L_0^{c.с} = (1 + k)V_{O_2} = (1 + 3,76) \cdot 2,157 = 10,27 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Теоретический расход влажного воздуха:

$$L_0^{с.в} = (1 + 0,00124g^{c.в}) = (1 + 0,00124 \cdot 13,9) \cdot 10,27 = 10,44 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Действительный расход влажного воздуха:

$$L_0^{с.в} = \alpha L_0^{с.в} = 1,28 \cdot 10,44 = 13,36 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

#### 3. Определение объёмного количества и состава продуктов горения мазута при $\alpha = 1$

Объёмное количество диоксида углерода:

$$V_0^{CO_2} = 0,01 \cdot 1,867C^p = 0,01 \cdot 1,867 \cdot 85,9 = 1,604 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Объёмное количество диоксида серы:

$$V_0^{SO_2} = 0,01 \cdot 0,7S^p = 0,01 \cdot 0,7 \cdot 0,4 = 0,003 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Объёмное количество водяных паров:

$$V_0^{H_2O} = 0,01 \cdot (11,2H^p + 1,244W^p) + 0,00124g^{c.в}L_0^{c.с} = \\ = 0,01 \cdot (11,2 \cdot 9,9 + 1,244 \cdot 2,8) + 0,00124 \cdot 13,9 \cdot 10,27 = 1,319 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Количество азота:

$$V_0^{N_2} = 0,01 \cdot 0,8 N^P + k V_{O_2} = 0,01 \cdot 0,8 \cdot 0,3 + 3,76 \cdot 2,157 = 8,11 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Общий объём продуктов горения при  $\alpha = 1$ :

$$V_0 = V_0^{CO_2} + V_0^{SO_2} + V_0^{H_2O} + V_0^{N_2} = 1,604 + 0,003 + 1,319 + 8,11 = 11,04 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Состав отработавших газов:

$$CO_2 = \frac{V_0^{CO_2} \cdot 100}{V_0} = \frac{1,604 \cdot 100}{11,04} = 14,53\%;$$

$$SO_2 = \frac{V_0^{SO_2} \cdot 100}{V_0} = \frac{0,003 \cdot 100}{11,04} = 0,03\%;$$

$$N_2 = \frac{V_0^{N_2} \cdot 100}{V_0} = \frac{8,11 \cdot 100}{11,04} = 73,46\%;$$

$$H_2O = \frac{V_0^{H_2O} \cdot 100}{V_0} = \frac{1,319 \cdot 100}{11,04} = 11,98\%.$$

4. *Определение объёмного количества и состава продуктов горения при  $\alpha = 1,28$*

Количество  $CO_2$  и  $SO_2$  останется таким же, как и при  $\alpha = 1$ :

$$V_{\partial}^{CO_2} = V_0^{CO_2} = 1,604 \text{ м}^3 / \text{кг}; \quad V_{\partial}^{SO_2} = V_0^{SO_2} = 0,003 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Количество водяных паров увеличится за счёт влаги избыточного воздуха:

$$V_{\partial}^{H_2O} = V_0^{H_2O} + 0,00124 g^{c.e} (\alpha - 1) L_0^{c.e} = \\ = 1,319 + 0,00124 \cdot 13,9 \cdot (1,28 - 1) \cdot 10,27 = 1,368 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

За счёт избыточного воздуха увеличится и количество азота:

$$V_{\partial}^{N_2} = V_0^{N_2} + k(\alpha - 1)V_{O_2} = 8,11 + 3,76 \cdot (1,28 - 1) \cdot 2,157 = 10,48 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

В продуктах горения появится свободный кислород избыточного воздуха:

$$V_{O_2}^{изб} = (\alpha - 1) \cdot V_{O_2} = (1,28 - 1) \cdot 2,157 = 0,604 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Общий объём продуктов горения при  $\alpha = 1,26$ :

$$V_{\partial} = V_{\partial}^{CO_2} + V_{\partial}^{SO_2} + V_{\partial}^{H_2O} + V_{\partial}^{N_2} + V_{O_2}^{изб} = \\ = 1,604 + 0,003 + 1,368 + 10,48 + 0,604 = 14,06 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Состав продуктов горения:

$$CO_2 = \frac{V_{\partial}^{CO_2} \cdot 100}{V_{\partial}} = \frac{1,604 \cdot 100}{14,06} = 11,41\%;$$

$$SO_2 = \frac{V_{\partial}^{SO_2} \cdot 100}{V_{\partial}} = \frac{0,003 \cdot 100}{14,06} = 0,02\%.$$

$$H_2O = \frac{V_{\partial}^{H_2O} \cdot 100}{V_{\partial}} = \frac{1,368 \cdot 100}{14,06} = 9,73\%;$$

$$N_2 = \frac{V_{\partial}^{N_2} \cdot 100}{V_{\partial}} = \frac{10,48 \cdot 100}{14,06} = 74,54\%;$$

$$O_2 = \frac{V_{O_2}^{изб} \cdot 100}{V_{\partial}} = \frac{0,604 \cdot 100}{14,06} = 4,30\%.$$

5. Рассчитаем низшую теплоту сгорания мазута:

$$Q_H^P = 339C^P + 1030H^P + 109(O^P - S^P) - 25(9H^P \cdot W^P) = \\ = 339 \cdot 85,9 + 1030 \cdot 9,9 + 109 \cdot (0,5 - 0,4) - 25 \cdot (9 \cdot 9,9 + 2,8) = 37030,5 \text{ кДж / кг.}$$

6. Рассчитаем температуру горения:

Сначала определим общее теплосодержание продуктов горения мазута без учёта диссоциации, кДж/м<sup>3</sup>:  $i_{\text{общ}} = i_x + i_g + i_T$

Энтальпия единицы объёма дымовых газов за счёт химической энергии мазута:

$$i_x = \frac{Q_H^P}{V_{\partial}} = \frac{37030,5}{14,06} = 2634 \text{ кДж / м}^3.$$

Подогретый до 300<sup>0</sup>С воздух вносит в один кубометр отходящих газов, кДж/м<sup>3</sup>:  $i_g = \frac{C_g t_g L_{\partial}}{V_{\partial}} \dots$

Среднюю теплоёмкость воздуха  $C_g$  находим по табл. 3.3 (прил. 3):  $C_g = 1,315 \text{ кДж/м}^3$ .

Тогда

$$i_g = \frac{1,315 \cdot 300 \cdot 13,36}{14,06} = 375 \text{ кДж / м}^3.$$

За счёт подогрева мазута единица продуктов горения получает, кДж/м<sup>3</sup>:  $i_T = \frac{C_T t_T}{V_{\partial}} \dots$

Средняя теплоёмкость мазутов в интервале температур 20...100<sup>0</sup>С изменяется в пределах 1,88...2,28 кДж/(кг · К).

Тогда

$$i_T = \frac{2,2 \cdot 98}{14,06} = 15 \text{ кДж/м}^3;$$

$$i_{\text{общ}} = 2634 + 375 + 15 = 3024 \text{ кДж/м}^3.$$

Рассчитаем относительное содержание избыточного воздуха в единице продуктов горения мазута:

$$V_L = \frac{L_{\partial} - L_0}{V_{\partial}} \cdot 100 = \frac{13,36 - 10,44}{14,06} = 20,7\%.$$

По  $i$ - $t$ -диаграмме для мазутов (прил. 4, рис. 4.2) находим теоретическую температуру горения:  $t_{\alpha}^T = 1875^{\circ} \text{C}$ .

### Пример расчёта процесса горения природного газа

#### 1. Исходные данные

Сжигается природный газ, элементарный состав которого на сухую массу равен (%):

$$CH_4^{C.G} = 98,0; \quad C_3H_8^{c.z} = 0,9; \quad C_4H_{10}^{C.G} = 0,8; \quad N_2^{C.G} = 0,3.$$

Влагосодержание газа составляет:  $g = 5,0 \text{ г/м}^3$  сухого газа.

Температура подогрева газа:  $t_T = 20^\circ\text{C}$ .

Температура подогрева воздуха:  $t_e = 400^\circ\text{C}$ .

Коэффициент избытка воздуха:  $\alpha = 1,15$ .

Химический недожог топлива:  $g_3 = 0,02Q_H^P$ .

Механический недожог отсутствует.

#### 2. Пересчёт состава газа на рабочую массу

Используя формулу (20), рассчитаем процентное содержание водяных паров в  $1 \text{ м}^3$  природного газа при влагосодержании  $g^{C.G} = 5,0 \text{ г/м}^3$  сухого газа:

$$H_2O^{B.G} = \frac{0,1244 \cdot 5,0}{1 + 0,00124 \cdot 5,0} = 0,618\%.$$

По формуле (21) пересчитаем состав газа на рабочую массу:

$$CH_4^{B.G} = CH_4^{C.G} \cdot \frac{100 - H_2O^{B.G}}{100} = 98,0 \cdot \frac{100 - 0,618}{100} = 97,394\%.$$

$$C_3H_8^{B.G} = 0,9 \cdot 0,99382 = 0,894\%; \quad C_4H_{10}^{B.P} = 0,8 \cdot 0,99382 = 0,796\%;$$

$$N_2^{B.G} = 0,3 \cdot 0,9982 = 0,298\%.$$

Для проверки правильности расчёта суммируем полученные данные по влажному составу газа:

$$\begin{aligned} CH_4^{B.G} + C_3H_8^{B.G} + C_4H_{10}^{B.G} + N_2^{B.G} + H_2O^{B.G} &= \\ &= 97,394 + 0,894 + 0,796 + 0,298 + 0,618 = 100\% \end{aligned}$$

следовательно, пересчёт на влажную массу произведён верно.

#### 3. Расчёт количества кислорода и воздуха для сжигания $1 \text{ м}^3$ газа

По формуле (22) найдем объём кислорода, необходимый для окисления горючих составляющих природного газа (в формулу подставляем только те химические элементы, которые даны в задании; остальные, отсутствующие в газе, приравниваем к нулю):

$$V_{O_2} = 0,01(2CH_4^{B,\Gamma} + 5C_3H_8^{B,\Gamma} + 6,5C_4H_{10}^{B,\Gamma}) = \\ = 0,01 \cdot (2 \cdot 97,394 + 5 \cdot 0,894 + 6,5 \cdot 0,796) = 2,04432 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Далее по формуле (6) находим количество воздуха при  $\alpha = 1$ , необходимого для сжигания  $1 \text{ м}^3$  природного газа, используя соотношение азота и кислорода в воздухе,  $K = 3,76$ :

$$L_0 = (1 + 3,76) \cdot 2,04432 = 9,73 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Действительно введённое количество воздуха при  $\alpha = 1,15$  по формуле (7) составит  $L_0 = 1,15 \cdot 9,73 = 11,19 \text{ м}^3 / \text{м}^3$ .

#### 4. Расчёт объёма и состава продуктов сгорания при сжигании $1 \text{ м}^3$ газа

Сначала найдём объём продуктов сгорания при  $\alpha = 1$ , используя формулы (23)–(25):

$$V_0^{RO_2} = 0,01(CH_4^{B,\Gamma} + 3C_3H_8^{B,\Gamma} + 4C_4H_{10}^{B,\Gamma}) = \\ = 0,01(97,394 + 3 \cdot 0,894 + 4 \cdot 0,796) = 1,033 \text{ м}^3 / \text{м}^3;$$

$$V_0^{H_2O} = 0,01(H_2O^{B,\Gamma} + 2CH_4^{B,\Gamma} + 4C_3H_8^{B,\Gamma} + 5C_4H_{10}^{B,\Gamma}) = \\ = 0,01 \cdot (0,618 + 2 \cdot 97,394 + 4 \cdot 0,894 + 5 \cdot 0,796) = 2,03 \text{ м}^3 / \text{м}^3;$$

$$V_0^{N_2} = 0,01N_2^{B,\Gamma} + 3,76V_{O_2} = 0,01 \cdot 0,3 + 3,76 \cdot 2,04432 = 7,69 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Тогда

$$V_0 = 1,033 + 2,03 + 7,69 = 10,753 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Выход продуктов сгорания при  $\alpha = 1,15$  изменится только на величину содержания азота ( $N_2$ ), внесённого с избытком воздуха, и на величину избыточного кислорода  $O_2^{изб}$  (формулы (27) и (28):

$$V_0^{N_2} = 0,01N_2^{B,\Gamma} + \alpha 3,76V_{O_2} = 0,01 \cdot 0,3 + 1,15 \cdot 3,76 \cdot 2,04432 = 8,84 \text{ м}^3 / \text{м}^3;$$

$$V_{O_2}^{изб} = (1,15 - 1) \cdot 2,04432 = 0,307 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Тогда по формуле (29) объём продуктов сгорания при  $\alpha = 1,15$  составит:

$$V_0 = 1,033 + 2,03 + 8,84 + 0,307 = 12,21 \text{ м}^3 / \text{м}^3.$$

Состав продуктов сгорания при  $\alpha = 1$ :

$$RO_2 = \frac{V_0^{RO_2}}{V_0} \cdot 100\% = \frac{1,033}{10,753} \cdot 100 = 9,61\%;$$

$$H_2O = \frac{V_0^{H_2O}}{V_0} \cdot 100\% = \frac{2,03}{10,753} \cdot 100 = 18,88\%;$$

$$N_2 = \frac{V_0^{N_2}}{V_0} \cdot 100\% = \frac{7,69}{10,753} \cdot 100 = 71,51\%.$$

Состав продуктов сгорания при  $\alpha = 1.15$ :

$$RO_2 = \frac{V_{\partial}^{RO_2}}{V_{\partial}} \cdot 100\% = \frac{1,033}{12,21} \cdot 100 = 8,46\%;$$

$$H_2O = \frac{V_{\partial}^{H_2O}}{V_{\partial}} \cdot 100\% = \frac{2,03}{12,21} \cdot 100 = 16,63\%$$

$$N_2 = \frac{V_{\partial}^{N_2}}{V_{\partial}} \cdot 100\% = \frac{8,84}{12,21} \cdot 100 = 72,40\%;$$

$$O_2^{изб} = \frac{V_{O_2}^{изб}}{V_{\partial}} \cdot 100\% = \frac{0,307}{12,21} \cdot 100 = 2,51\%.$$

### 5. Расчёт теплоты сгорания природного газа

Воспользуемся формулой, подставив в неё горючие составляющие, которые указаны в исходных данных и пересчитаны на рабочую массу.

$$\begin{aligned} Q_H^P &= 358CH_4^{B.G} + 913C_3H_8^{B.G} + 1185C_4H_{10}^{B.G} = \\ &= 358 \cdot 97,394 + 913 \cdot 0,894 + 1185 \cdot 0,796 = 36626,5 \text{ кДж/м}^3. \end{aligned}$$

### 6. Расчёт температуры горения

Для нахождения по  $i$ - $t$ -диаграмме соответствующих температур горения  $t_{\alpha}^T$  и  $t_{\alpha}^B$  рассчитаем общее и балансовое теплосодержание, используя формулы (13)...(18).

Первоначально определим химическую энтальпию топлива по формуле (13):

$$i_x = \frac{Q_H^P}{V_{\alpha}} = \frac{36626,5}{12,21} = 2999,71 \text{ кДж/м}^3.$$

Физическая энтальпия топлива по формуле (14):

$$i_T = \frac{C_T t_T}{V_{\partial}} = \frac{1,57 \cdot 20}{12,21} = 2,57 \text{ кДж/м}^3.$$

Здесь удельная теплоёмкость топлива  $C_m$  рассчитана с использованием прил. 3, табл. 3.3:

$$\begin{aligned} C_T &= 0,01(C_{CH_4} \cdot CH_4^{B.G} + C_{C_3H_8} \cdot C_3H_8^{B.G} + C_{C_4H_{10}} \cdot C_4H_{10}^{B.G} + C_{N_2} N_2^{B.G}) = \\ &= 0,01(1,55 \cdot 97,394 + 3,05 \cdot 0,894 + 4,13 \cdot 0,796 + 1,294 \cdot 0,298) = 1,57 \text{ кДж/м}^3 \cdot \text{К}. \end{aligned}$$

Физическая энтальпия подогретого воздуха по формуле (15)

$$i_B = \frac{C_B t_B L_\partial}{V_\partial} = \frac{1,327 \cdot 400 \cdot 11,19}{12,21} = 486,5 \text{ кДж/м}^3,$$

где  $C_B = 1,327$  кДж/(м · К) взята из прил. 3, табл. 3.3.

Тогда по формуле (16) общая энтальпия продуктов сгорания составит

$$i_{\text{общ}} = i_x + i_T + i_B = 2999,7 + 2,57 + 486,5 = 3488,77 \text{ кДж/м}^3$$

или после округления  $i_{\text{общ}} = 3489$  кДж/м<sup>3</sup>.

Далее, используя соответствующую  $i$ - $t$ -диаграмму (прил. 4, рис. 4.1) и вычислив содержание избыточного воздуха в продуктах сгорания по формуле (19):

$$V_L = \frac{L_\partial - L_0}{V_\partial} \cdot 100\% = \frac{11,19 - 9,73}{12,21} \cdot 100 = 12\%.$$

найдем теоретическую температуру горения природного газа:

$$t_\alpha^T = 2030^\circ \text{C}.$$

Затем, найдя по формуле (16) энтальпию химического недожога:

$$i_3 = \frac{Q_3}{V_\partial} = \frac{0,02 \cdot 36626,5}{12,21} = 60 \text{ кДж/м}^3,$$

рассчитаем общее балансовое теплосодержание продуктов сгорания:

$$i_{\text{общ}}^\delta = i_{\text{общ}} - i_3 = 3489 - 60 = 3429 \text{ кДж/м}^3,$$

По той же  $i$ - $t$ -диаграмме, но уже по пунктирным кривым, используя то же значение  $V_L = 12\%$ , найдем балансовую температуру горения:

$$t_\alpha^\delta = 2065^\circ \text{C}.$$

Таблица 3.1

Значения коэффициента и поправок для расчета характеристик  
горения топлива приближенным методом

| Топливо                            | $l_1$  | $l_2$ | $\Delta L$ | $S_1$ | $S_2$    | $W_{FP}$ |
|------------------------------------|--------|-------|------------|-------|----------|----------|
| Кокс                               | 0,2627 | 0,007 | 0          | 0,40  | 0,0086   | 12,0     |
| Бурые угли:                        |        |       |            |       |          |          |
| $A^c < 20\%$                       |        |       |            | 1,02  | 0,02627  | $W^p$    |
| $A^c = 20-30\%$                    | 0,2627 | 0,007 | 0,06       | 0,97  | 0,02627  | $W^p$    |
| $A^c > 30\%$                       |        |       |            | 0,40  | 0,00860  | 8,0      |
| Каменные угли:                     |        |       |            |       |          |          |
| $A^c < 20\%$                       |        |       |            |       | 0,02866  | $W^p$    |
| $A^c = 20-30\%$                    | 0,2627 | 0,007 | 0,06       | 1,15  | 0,02627  | $W^p$    |
| $A^c > 30\%$                       |        |       |            | 0,97  | 0,0086   | 0        |
| Антрацит                           | 0,2627 | 0,007 | 0          | 0,40  | 0,0086   | 0        |
| Мазут                              | 0,2627 | 0,007 | 0,06       | 0,40  | -0,02866 | 2,0      |
| Доменный газ                       | 0,191  | 0     | 0          | -0,48 | 0,0310   | $W^p$    |
| Коксовый газ                       |        |       |            | 0,97  |          |          |
| $Q_n^p > 16750$ кДж/м <sup>3</sup> | 0,2567 | 0     | 0,25       |       | -0,01433 | $W^p$    |
| $Q_n^p < 16750$ кДж/м <sup>3</sup> | 0,2567 | 0     | 0,25       | 0,44  | 0,02388  | $W^p$    |
| Природный газ:                     |        |       | 0,05       | 1,08  |          |          |
| $Q_n^p > 35800$ кДж/м <sup>3</sup> | 0,2640 | 0     | 0          | 1,0   | 0        | $W^p$    |
| $Q_n^p < 35800$ кДж/м <sup>3</sup> | 0,2640 | 0     |            | 0,38  | -0,01791 | $W^p$    |

Таблица 3.2

Средняя теплоёмкость газообразного топлива, кДж/(м<sup>3</sup>·К)

| Температура | Природный | Коксовый | Доменный |
|-------------|-----------|----------|----------|
| 0           | 1,55      | 1,35     | 1,33     |
| 100         | 1,64      | 1,39     | 1,34     |
| 200         | 1,76      | 1,43     | 1,35     |
| 300         | 1,90      | 1,47     | 1,37     |
| 400         | 2,02      | 1,51     | 1,39     |
| 500         | 2,14      | 1,55     | 1,41     |
| 600         | 2,27      | 1,59     | 1,42     |
| 700         | 2,36      | 1,63     | 1,43     |
| 800         | 2,45      | 1,66     | 1,45     |
| 900         | 2,56      | 1,70     | 1,46     |
| 1000        | 2,66      | 1,73     | 1,48     |
| 1100        | -         | 1,76     | 1,49     |
| 1200        | -         | 1,79     | 1,50     |
| 1300        | -         | 1,81     | 1,51     |

Средняя теплоёмкость газов, кДж/(м<sup>3</sup>·К)

| $t, ^\circ\text{C}$ | CO    | H <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> | O <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | SO <sub>2</sub> | H <sub>2</sub> S | H <sub>2</sub> O | воздух | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | C <sub>3</sub> H <sub>12</sub> |
|---------------------|-------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|--------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0                   | 1,298 | 1,277          | 1,294          | 1,306          | 1,599           | 1,733           | 1,507            | 1,495            | 1,298  | 1,549           | 1,825                         | 2,211                         | 3,048                         | 4,128                          | 5,127                          |
| 100                 | 1,302 | 1,289          | 1,298          | 1,319          | 1,700           | 1,813           | 1,532            | 1,507            | 1,302  | 1,641           | 2,064                         | 2,495                         | 3,510                         | 4,705                          | 5,835                          |
| 200                 | 1,306 | 1,298          | 1,298          | 1,336          | 1,788           | 1,888           | 1,562            | 1,524            | 1,306  | 1,758           | 2,282                         | 2,776                         | 3,965                         | 5,256                          | 6,515                          |
| 300                 | 1,315 | 1,298          | 1,306          | 1,357          | 1,863           | 1,955           | 1,595            | 1,541            | 1,315  | 1,888           | 2,495                         | 3,044                         | 4,369                         | 5,772                          | 7,135                          |
| 400                 | 1,327 | 1,302          | 1,315          | 1,377          | 1,930           | 2,018           | 1,633            | 1,566            | 1,327  | 2,014           | 2,688                         | 3,308                         | 4,760                         | 6,267                          | 7,741                          |
| 500                 | 1,344 | 1,306          | 1,327          | 1,398          | 1,989           | 2,060           | 1,671            | 1,591            | 1,344  | 2,139           | 2,864                         | 3,555                         | 5,094                         | 6,689                          | 8,256                          |
| 600                 | 1,357 | 1,310          | 1,340          | 1,415          | 2,043           | 2,114           | 1,746            | 1,616            | 1,357  | 2,261           | 3,027                         | 3,776                         | 5,432                         | 7,115                          | 8,783                          |
| 700                 | 1,373 | 1,315          | 1,352          | 1,436          | 2,089           | 2,152           | 1,780            | 1,641            | 1,369  | 2,378           | 3,178                         | 3,986                         | 5,724                         | 7,485                          | 9,231                          |
| 800                 | 1,386 | 1,319          | 1,365          | 1,449          | 2,098           | 2,181           | 1,784            | 1,666            | 1,382  | 2,504           | 3,308                         | 4,174                         | 5,989                         | 7,808                          | 9,625                          |
| 900                 | 1,398 | 1,323          | 1,377          | 1,465          | 2,169           | 2,215           | 1,817            | 1,696            | 1,398  | 2,600           | 3,433                         | 4,363                         | 6,231                         | 8,114                          | 9,992                          |
| 1000                | 1,411 | 1,331          | 1,390          | 1,478          | 2,202           | 2,236           | 1,851            | 1,725            | 1,411  | 2,700           | 3,546                         | 4,530                         | 6,461                         | 8,404                          | 10,345                         |
| 1100                | 1,424 | 1,336          | 1,403          | 1,491          | 2,236           | 2,261           | 1,884            | 1,750            | 1,424  | 2,788           | 3,655                         | 4,685                         | 6,678                         | 8,679                          | 10,679                         |
| 1200                | 1,436 | 1,344          | 1,415          | 1,503          | 2,265           | 2,278           | 1,909            | 1,775            | 1,432  | 2,864           | 3,751                         | 4,827                         | 6,881                         | 8,938                          | 10,997                         |
| 1300                | 1,449 | 1,352          | 1,424          | 1,511          | 2,290           | 2,299           | -                | 1,805            | 1,444  | 2,889           | -                             | -                             | -                             | -                              | -                              |

Таблица 3.4

Химический состав топлива и условия его сжигания  
(Варианты задания по расчёту горения топлива)

| Вариант        | Содержание элементов, масс.% |       |       |       |       |       |       | $\alpha$ | $t_T, ^\circ C$ | $t_B, ^\circ C$ | $\frac{g^{c,b}}{\Gamma/M^3 c.B}$ |
|----------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-----------------|-----------------|----------------------------------|
|                | $C^P$                        | $H^P$ | $O^P$ | $N^P$ | $S^P$ | $A^P$ | $W^P$ |          |                 |                 |                                  |
| Торф           |                              |       |       |       |       |       |       |          |                 |                 |                                  |
| 1              | 49,1                         | 6,1   | 6,5   | 0,8   | 0,1   | 6,2   | 31,2  | 1,51     | -               | 235             | 9,8                              |
| 2              | 50,4                         | 5,9   | 6,8   | 0,9   | 0,1   | 3,9   | 32,0  | 1,46     | -               | 245             | 12,1                             |
| 3              | 49,7                         | 6,0   | 5,3   | 0,7   | 0,1   | 8,1   | 30,1  | 1,48     | -               | 225             | 10,2                             |
| Каменный уголь |                              |       |       |       |       |       |       |          |                 |                 |                                  |
| 4              | 79,3                         | 5,2   | 1,0   | 0,8   | 0,5   | 8,6   | 4,6   | 1,50     | -               | 210             | 13,3                             |
| 5              | 83,9                         | 3,8   | 0,9   | 1,2   | 0,8   | 5,6   | 3,8   | 1,47     | -               | 240             | 14,5                             |
| 6              | 81,7                         | 4,1   | 1,2   | 1,1   | 0,7   | 7,7   | 3,5   | 1,49     | -               | 215             | 15,8                             |
| 7              | 79,8                         | 5,0   | 0,8   | 1,3   | 0,6   | 8,4   | 4,1   | 1,45     | -               | 225             | 13,8                             |
| 8              | 83,2                         | 4,5   | 1,3   | 1,0   | 0,5   | 6,7   | 2,8   | 1,51     | -               | 205             | 12,9                             |
| 9              | 82,4                         | 4,9   | 1,1   | 0,9   | 0,7   | 6,9   | 3,1   | 1,44     | -               | 230             | 14,1                             |
| Кокс           |                              |       |       |       |       |       |       |          |                 |                 |                                  |
| 10             | 91,8                         | 1,3   | 1,1   | 1,3   | 1,1   | 0,4   | 3,0   | 1,46     | -               | 240             | 15,2                             |
| 11             | 85,1                         | 0,6   | 0,8   | 0,9   | 0,6   | 0,2   | 1,8   | 1,48     | -               | 220             | 13,9                             |
| 12             | 93,6                         | 1,0   | 0,9   | 1,1   | 0,7   | 0,3   | 2,4   | 1,52     | -               | 205             | 16,0                             |
| Мазут          |                              |       |       |       |       |       |       |          |                 |                 |                                  |
| 13             | 85,1                         | 9,9   | 0,2   | 0,5   | 0,3   | 0,1   | 3,9   | 1,25     | 98              | 280             | 13,0                             |
| 14             | 88,0                         | 8,5   | 0,4   | 0,3   | 0,5   | 0,3   | 2,0   | 1,30     | 95              | 290             | 14,0                             |
| 15             | 84,7                         | 10,6  | 0,5   | 0,4   | 0,7   | 0,2   | 3,6   | 1,38     | 100             | 295             | 15,1                             |
| 16             | 86,2                         | 9,7   | 0,3   | 0,5   | 0,4   | 0,1   | 2,8   | 1,26     | 90              | 300             | 14,7                             |
| 17             | 87,0                         | 8,6   | 0,2   | 0,3   | 0,6   | 0,3   | 3,0   | 1,37     | 100             | 280             | 13,2                             |
| 18             | 84,6                         | 10,7  | 0,4   | 0,4   | 0,3   | 0,2   | 3,4   | 1,34     | 95              | 285             | 13,9                             |
| 19             | 87,6                         | 8,3   | 0,5   | 0,4   | 0,5   | 0,1   | 2,6   | 1,27     | 98              | 295             | 15,3                             |
| 20             | 86,9                         | 9,2   | 0,3   | 0,3   | 0,7   | 0,3   | 2,3   | 1,32     | 97              | 290             | 15,4                             |
| 21             | 85,5                         | 10,3  | 0,2   | 0,4   | 0,5   | 0,2   | 2,9   | 1,29     | 100             | 280             | 13,4                             |
| 22             | 87,9                         | 8,0   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,1   | 2,5   | 1,36     | 96              | 285             | 14,2                             |

Химический состав топлива для различных вариантов задания по расчёту горения топлива

| Вариант | Содержание, об. % |              |              |                |                |                   |                   |             |  |  | $\alpha$ | $t_{T,}^{\circ C}$ | $t_{B,}^{\circ C}$ | $g^{с.в.} / M^3 с.в.$ |
|---------|-------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------|--|--|----------|--------------------|--------------------|-----------------------|
|         | $H_2S^{с.г}$      | $CO_2^{с.г}$ | $CH_4^{с.г}$ | $C_2H_6^{с.г}$ | $C_3H_8^{с.г}$ | $C_4H_{10}^{с.г}$ | $C_5H_{12}^{с.г}$ | $N_2^{с.г}$ |  |  |          |                    |                    |                       |
| 23      | -                 | 0,3          | 88,0         | 1,9            | 0,2            | 0,3               | -                 | 9,3         |  |  | 1,2      | 200                | 200                | 5,0                   |
| 24      | 1,0               | 0,2          | 76,7         | 4,5            | 1,7            | 0,8               | 0,6               | 14,5        |  |  | 1,3      | 100                | 800                | 5,0                   |
| 25      | -                 | -            | 92,2         | 0,8            | -              | 0,1               | -                 | 6,9         |  |  | 1,2      | 20                 | 500                | 5,0                   |
| 26      | -                 | 0,2          | 94,0         | 1,2            | 0,7            | 0,4               | 0,2               | 3,3         |  |  | 1,15     | 30                 | 450                | 5,0                   |
| 27      | -                 | 0,2          | 97,9         | -              | -              | 0,1               | -                 | 1,8         |  |  | 1,1      | 15                 | 400                | 5,0                   |
| 28      | -                 | 0,1          | 97,9         | 0,5            | 0,2            | 0,1               | -                 | 1,2         |  |  | 1,15     | 25                 | 30                 | 5,0                   |
| 29      | -                 | 0,1          | 98,0         | 0,4            | 0,2            | -                 | -                 | 1,3         |  |  | 1,05     | 150                | 700                | 5,0                   |
| 30      | -                 | 0,1          | 93,5         | 4,0            | 1,0            | 0,5               | 0,5               | 0,4         |  |  | 1,1      | 200                | 200                | 5,0                   |
| 31      | -                 | 0,1          | 95,5         | 1,0            | 0,2            | 0,1               | -                 | 3,1         |  |  | 1,2      | 20                 | 300                | 5,0                   |
| 32      | 2,8               | 1,0          | 42,4         | 12,0           | 20,5           | 7,2               | 3,1               | 11,0        |  |  | 12,5     | 250                | 400                | 5,0                   |
| 33      | -                 | 0,1          | 97,5         | 0,6            | 0,3            | 0,2               | 0,2               | 1,1         |  |  | 1,1      | 40                 | 350                | 5,0                   |
| 34      | -                 | 0,1          | 97,0         | 0,7            | 0,2            | 0,2               | -                 | 1,8         |  |  | 1,15     | 150                | 400                | 5,0                   |
| 35      | -                 | 0,1          | 97,2         | 0,5            | 0,4            | 0,4               | -                 | 1,4         |  |  | 1,3      | 200                | 800                | 5,0                   |
| 36      | -                 | -            | 98,1         | -              | 1,1            | 0,3               | -                 | 0,5         |  |  | 1,05     | 20                 | 450                | 6,0                   |
| 37      | -                 | 0,2          | 97,9         | -              | 1,0            | 0,4               | -                 | 0,5         |  |  | 1,1      | 40                 | 300                | 6,0                   |
| 38      | -                 | 0,1          | 97,2         | 0,4            | 0,9            | 0,6               | 0,5               | 0,3         |  |  | 1,2      | 30                 | 350                | 6,0                   |

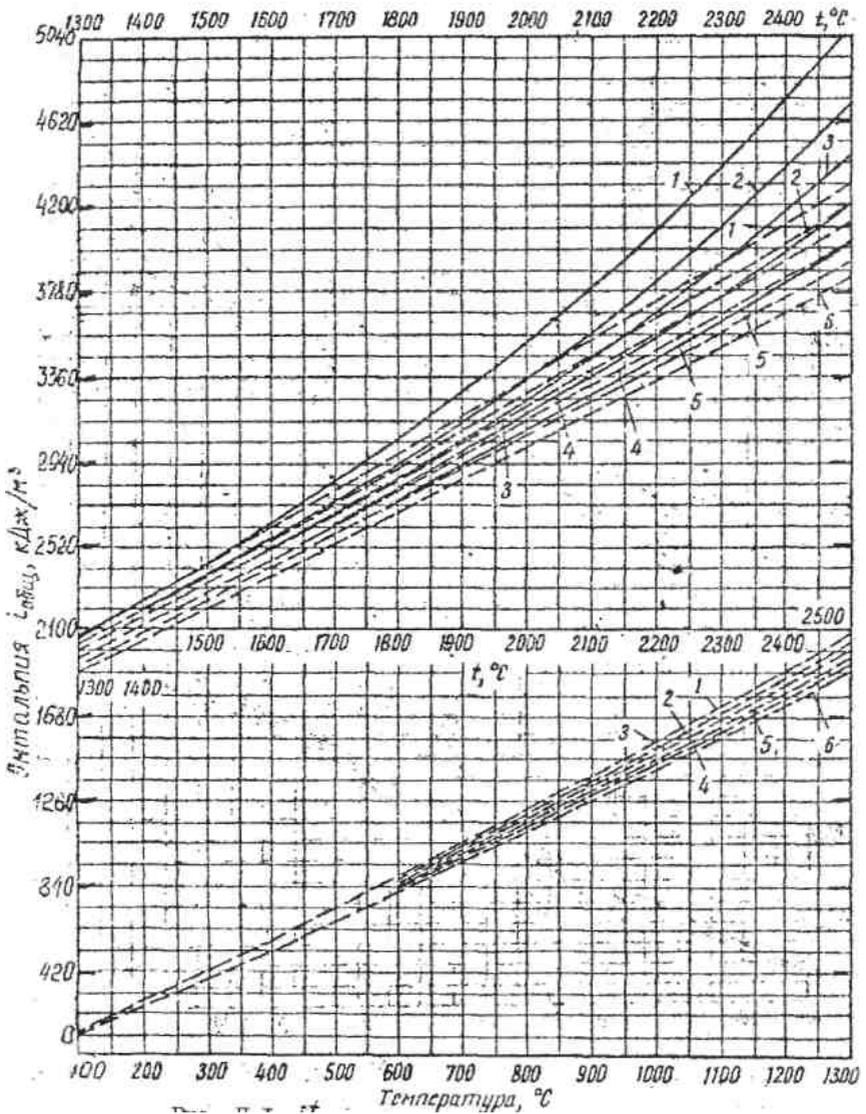


Рис. 4.1.  $i-t$  – диаграмма для природного газа, коксового газа и смеси коксового и доменного газов при  $Q_u^p > 12\,500$  кДж/м<sup>3</sup>: 1 –  $V_L = 0$  (продукты сгорания без воздуха); 2 – 20%; 3 – 40%; 4 – 60%; 5 – 80%; 6 – 100% (чистый воздух); — —  $t_a^T$ , - - - - -  $t_a^B$

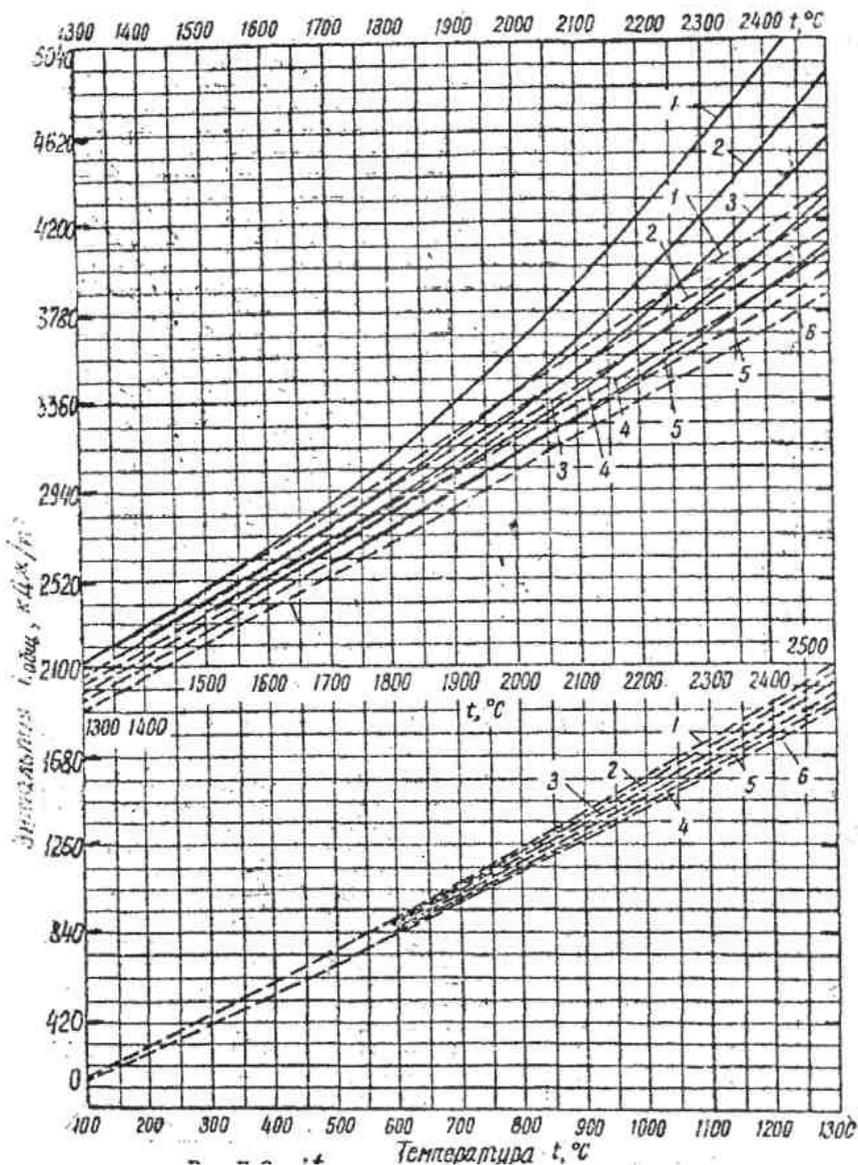


Рис. 4.2.  $i-t$  – диаграмма для паровоздушного газа, смеси коксового с доменным газом при  $Q_n^p = 8400 \dots 12\,500$  кДж/м³ (мазут, каменные угли, антрацит, кокс): 1 –  $V_L = 0$  (продукты сгорания без воздуха); 2 – 20%; 3 – 40%; 4 – 60%; 5 – 80%; 6 – 100% (чистый воздух);  
 — — —  $t_a^T$ , - - - - -  $t_a^B$

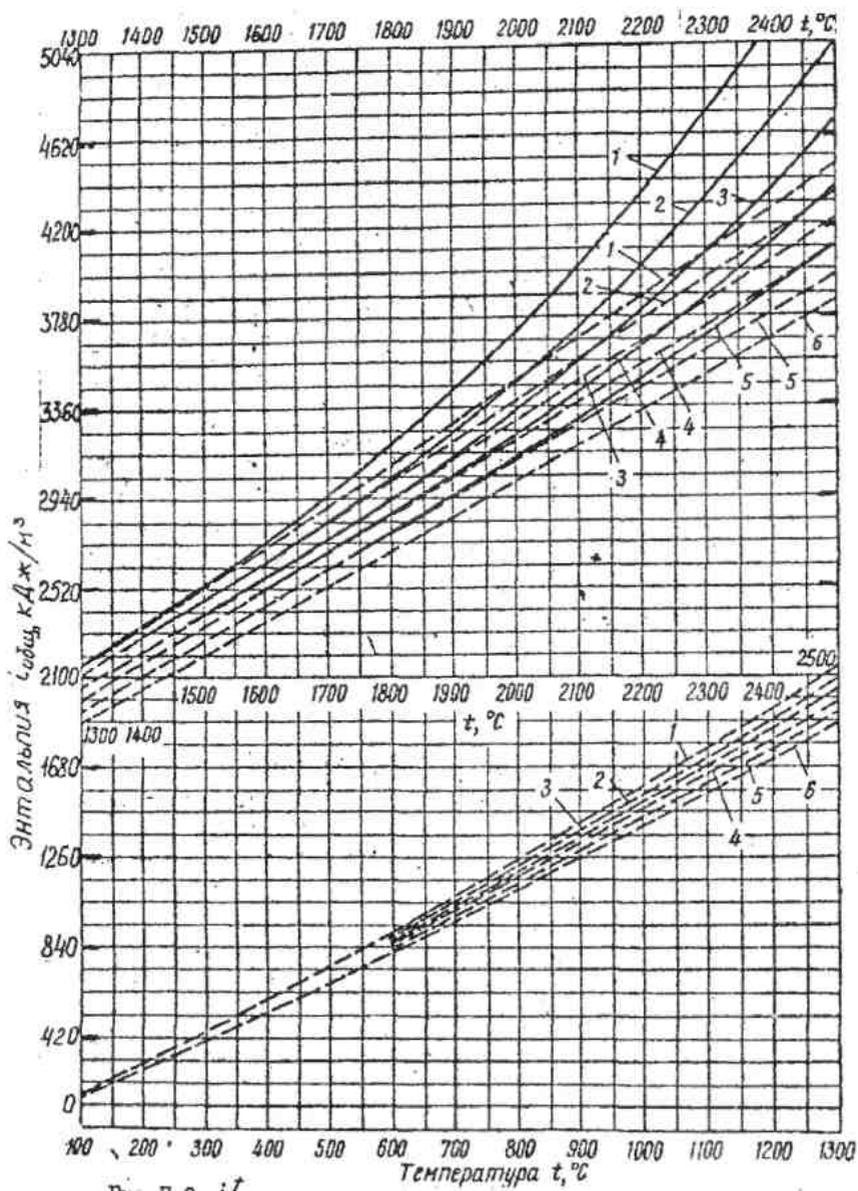


Рис. 4.3.  $i-t$  – диаграмма для водяного генераторного газа, смеси коксового и доменного газов при  $Q_{II}^p < 8400$  кДж/м<sup>3</sup>, (бурые угли, горючие сланцы, дрова): 1 –  $V_L = 0$  (продукты сгорания без воздуха); 2 – 20%; 3 – 40%; 4 – 60%; 5 – 80%; 6 – 100% (чистый воздух); — — —  $t_a^T$ ; - - - - -  $t_a^B$

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....   | 3  |
| 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЁТЫ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА.....   | 4  |
| 1.1. Цель расчёта процесса горения.....   | 4  |
| 1.2. Ограничения и допущения, принимаемые<br>в технических расчётах .....                   | 7  |
| 2. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ГОРЕНИЯ ТВЁРДОГО<br>И ЖИДКОГО ТОПЛИВА.....                          | 8  |
| 2.1. Определение количества кислорода для окисления<br>горючих элементов топлива.....       | 8  |
| 2.2. Определение количества воздуха для сжигания<br>1 кг топлива.....                       | 9  |
| 2.3. Определение количества и состава продуктов сгорания .....                              | 9  |
| 2.4. Определение температуры горения.....   | 11 |
| 3. АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ГОРЕНИЯ<br>ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА.....                               | 14 |
| 3.1. Определение количества кислорода и воздуха<br>для сжигания 1 м <sup>3</sup> газа ..... | 14 |
| 3.2. Определение количества продуктов сгорания<br>газообразного топлива.....                | 15 |
| 4. ПРИБЛИЖЁННЫЙ МЕТОД РАСЧЁТА<br>ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА.....                                       | 17 |
| 5. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА ХАРАКТЕРИСТИК<br>ГОРЕНИЯ ТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ.....                       | 18 |
| 5.1. Расчёт характеристик горения смесей<br>газообразного топлива.....                      | 18 |

|  |    |
|--|----|
| 5.2. Расчёт характеристик горения смесей<br>газообразного и жидкого топлива..... | 19 |
| Библиографический список.....  | 20 |
| Приложения.....  | 21 |

Учебное издание

*Коломиец Павел Валерьевич*

## РАСЧЁТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Методические указания  
к практическим занятиям по дисциплине «Химмотология»

Редактор *Е.Ю. Жданова*

Технический редактор *З.М. Малявина*

Верстка: *Л.В. Сызганцева*

Дизайн обложки: *Г.В. Карасёва*

Подписано в печать 16.09.2011. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 2,2.

Тираж 100 экз. Заказ № 1-97-10.

Тольяттинский государственный университет  
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14