

Министерство образования и науки РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Сибирский государственный индустриальный университет»

Кафедра теплоэнергетики и экологии

РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Методические рекомендации
к проведению практических занятий и выполнению ВКР
для студентов, обучающихся по направлениям подготовки
150400 «Металлургия»,
280700 «Техносферная безопасность»,
140100 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Новокузнецк
2014

УДК 622.61(07)
Р 24

Рецензент:

доцент кафедры теплогазоводоснабжения и вентиляции
СибГИУ
Логунова О.Я.

Р 24 Расчет горения топлива: Методические рекомендации к проведению практических занятий и выполнению ВКР / Сиб. гос. индустр.ун-т; сост.: Т.А. Михайличенко, В.В. Стерлигов : – Новокузнецк: Изд.центр СибГИУ, 2014. – 25 с.

Изложены цели и методы расчета полного горения твердого, жидкого и газообразного топлива. Содержатся практические рекомендации для выполнения расчетов горения и необходимый справочный материал. Приведен перечень рекомендуемой литературы. Предназначены для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 150400 «Металлургия», 280700 «Техносферная безопасность», 140100 «Теплоэнергетика и теплотехника», а также могут быть полезны всем студентам, изучающим дисциплины теплотехнического профиля.

СОДЕРЖАНИЕ

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	4
2 РАСЧЕТ ПОЛНОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА	4
2.1 Основы расчета полного горения топлива.....	4
2.2 Низшая теплота сгорания.....	5
2.3 Определение состава влажного газообразного топлива и рабочей массы твердого и жидкого топлива. Определение состава смешанного газа.....	7
2.4 Определение теоретического (L_B^0) и действительного (L_B^d) количества воздуха для горения	11
2.5 Определение теоретического (V^0) и действительного (V^d) количества продуктов сгорания	13
2.6 Определение состава и плотности продуктов полного сгорания	15
2.7 Материальный баланс горения топлива	16
2.8 Определение температуры горения топлива	20
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	25

1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Расчет горения топлива является основой теплотехнического расчета любого нагревательного устройства, использующего топливо.

Целью расчета горения топлива является определение:

- теплоты сгорания топлива (Q_H^p);
- теоретического (L_B^0) и действительного (L_B^d) количества воздуха;
- теоретического (V^0) и действительного (V^d) количества продуктов сгорания;
- состава и плотности продуктов сгорания;
- температуры горения.

Эти данные необходимы для расчета теплообмена в рабочем пространстве печи, расчета теплового баланса и всех ее аэродинамических расчетов. Например, объем продуктов сгорания необходимо знать, чтобы рассчитать потери тепла с уходящими газами в тепловом балансе, а также для расчета борцов, дымовой трубы и теплоутилизирующих устройств (рекуператоров и регенераторов). По величине необходимого для горения воздуха рассчитываются воздухопроводы, дутьевые устройства (вентиляторы). Зная состав продуктов сгорания, можно определить парциальные давления составляющих дыма и, таким образом, рассчитывать теплообмен излучением.

2 РАСЧЕТ ПОЛНОГО ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

2.1 Основы расчета полного горения топлива

Полное сгорание топлива обеспечивает наиболее экономичную работу теплотехнических агрегатов и имеет место при следующих условиях: хорошем смешении топлива с окислителем, достаточной температуре и надлежащей подготовке топлива к сгоранию.

В основе расчета лежит анализ уравнений химических реакций окисления и их стехиометрические коэффициенты. В этом случае при расчете предполагается:

- окисление горючих составляющих топлива идет до получения продуктов полного сгорания (CO_2 , H_2O , SO_2);
- отсутствует диссоциация продуктов сгорания и горючих составляющих топлива;
- горение протекает без образования продуктов химического и механического недожога;
- воздух, используемый в качестве окислителя, состоит из 79% N_2 и 21% O_2 (по объему);
- газообразное топливо, воздух и продукты сгорания находятся при нормальных условиях ($T=273\text{ К}$, $P=101325\text{ Па}$), т.е. 1 кмоль этих газов занимает объем $22,4\text{ м}^3$;
- продукты термического разложения золы в расчете горения твердого топлива не учитываются.

Для удобства расчет ведется на 1 или 100 единиц – т.е. на 1 или 100 м^3 для газообразного и 1 или 100 кг для твердого и жидкого топлива. Определенные в результате расчета количества газов в м^3 при нормальных условиях в дальнейшем пересчитывают на объем реальных газов при известных рабочих условиях (T , P).

2.2 Низшая теплота сгорания

Низшей теплотой сгорания, $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$, называется количество тепла, которое выделяется при полном сгорании единицы количества топлива (1 кг, 1 м^3 , 1 кмоль) при условии, что влага продуктов сгорания находится в парообразном состоянии при температуре 20°C (в отличие от высшей теплоты сгорания $Q_{\text{в}}^{\text{p}}$, которая предполагает конденсацию влаги продуктов сгорания в жидкость при температуре 0°C). Понятие $Q_{\text{в}}^{\text{p}}$ имеет лишь теоретическое значение, поскольку влага продуктов сгорания, как правило, уносится вместе с дымом из рабочего пространства печи в виде пара и если конденсируется, то за пределами системы. Поэтому в теплотехнических расчетах имеют дело с величиной $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$, которая определяется либо экспериментально в специальных приборах-калориметрах, либо аналитически.

Низшую теплоту сгорания газообразного топлива можно рассчитать аналитически, зная его состав и тепловые эффекты реакций горения составляющих топлива, кДж/м^3 ,

$$Q_H^P = \sum_{i=1}^n q_i r_i, \quad (1)$$

где n – количество горючих компонентов топлива;

r_i – объемные доли горючих химических веществ топлива;

q_i – тепловые эффекты реакций полного горения горючих компонентов топлива, кДж/м³.

Значения q для некоторых газов приведены в таблице 1 [1].

При содержании в топливе незначительного количества непредельных углеводородов неизвестного состава (C_nH_m) их условно принимают состоящими из этилена (C_2H_4).

Низшая теплота сгорания твердого и жидкого топлива рассчитывается по эмпирической формуле Д.И. Менделеева:

$$Q_H^P = 339,15 C^P + 1256,1 H^P - 108,86 (O^P - S^P) - 25,12 (W^P + 9H^P), \text{ кДж/кг}, \quad (2)$$

где C^P , H^P , O^P , S^P , W^P – содержание горючих элементов и влаги в рабочей массе топлива, масс. %.

Таблица 1 – Тепловые эффекты реакций горения и приближенные молекулярные массы некоторых газов

Газ	Формула газа	Молекулярная масса, кг/кмоль	Низшая теплота сгорания, кДж/м ³
Водород	H ₂	2	10743
Оксид углерода	CO	28	12636
Метан	CH ₄	16	35847
Ацетилен	C ₂ H ₂	26	56049
Этилен	C ₂ H ₄	28	59059
Этан	C ₂ H ₆	30	63790
Пропилен	C ₃ H ₆	42	86022
Пропан	C ₃ H ₈	44	91281
Бутилен	C ₄ H ₈	56	113785
Бутан	C ₄ H ₁₀	58	118670
Циклопентан	C ₅ H ₁₀	70	138500
Пентан	C ₅ H ₁₂	72	146107
Бензол	C ₆ H ₆	78	142425
Сероводород	H ₂ S	34	23383

2.3 Определение состава влажного газообразного топлива и рабочей массы твердого и жидкого топлива. Определение состава смешанного газа

Состав газообразного топлива задается содержанием отдельных компонентов, как горючих, так и негорючих в об.% (CO , CO_2 , H_2O , H_2 , O_2 , H_2S , CH_4 , N_2 и т.д.), а состав твердого и жидкого топлива – содержанием отдельных элементов (C , H , O , N , S) и балластных составляющих (влаги W и золы A) в масс.%.

В справочной литературе обычно задается состав сухого газообразного топлива, поэтому перед расчетом горения состав сухого газа необходимо пересчитать на влажный по формуле:

$$x^B = x^C \frac{100}{100 + 0,1244d_r}, \quad (3)$$

где x^B – содержание компонента во влажном газе, об.%;

x^C – содержание компонента в сухом газе, об.%;

d_r – содержание влаги в газе, г/м^3 сухого газа при нормальных условиях.

Если содержание влаги отнесено к 1 м^3 влажного газа или к 1 м^3 натурального газа (состояние которого задано конкретными P и T), то расчеты, связанные с влажностью, значительно усложняются.

Влагосодержание сухого газа, г/м^3

$$d_r = 804 \frac{P_{\text{в.п.}} \cdot \varphi}{P - P_{\text{в.п.}} \cdot \varphi}, \quad (4)$$

где коэффициент 804 – плотность водяных паров при нормальных условиях ($\frac{18\text{кг/моль}}{22,4\text{м}^3/\text{кмоль}} = 0,804\text{кг/м}^3 = 804\text{г/м}^3$);

$P_{\text{в.п.}}$ – парциальное давление водяных паров, зависящее от температуры газа, Па;

P – рабочее давление газа, Па;

φ – относительная влажность газа, доли единицы.

Величины, характеризующие влажность газа в зависимости от температуры насыщения при рабочем давлении влажного газа 101325 Па, приведены в таблице 2.

Искусственные газы (доменный, коксовый, генераторный) подвергается мокрой очистке почти при атмосферном давлении, поэтому они насыщены водяными парами ($\varphi = 1$), и величина

влажностного содержания d_r может быть взята из таблицы 2 [2] по температуре насыщения, которую задают в зависимости от времени года, условий в цехе и т.д.

Природный газ перед транспортировкой с места добычи подвергается сушке во избежание образования кристаллогидратов тяжелых углеводородов, и для него $\varphi = 0,6$. Рабочее давление природного газа, подаваемого на промышленные предприятия по распределительным газопроводам высокого давления, составляет 0,3-0,6 МПа, а рабочая температура 0-20⁰С. Таким образом, величина влажностного содержания, вычисленная по формуле (4), весьма незначительна, и можно считать, что природный газ поступает практически сухим.

Иногда в расчете требуется учесть влажность воздуха. Пересчет состава сухого воздуха на влажный проводится по формулам:

$$O_2^B = O_2^C \frac{100}{100 + 0,1244d_B}; \quad (5)$$

$$N_2^B = N_2^C \frac{100}{100 + 0,1244d_B}; \quad (6)$$

$$H_2O^B = \frac{0,1244d_B}{100 + 0,1244d_B} \cdot 100; \quad (7)$$

Здесь O_2^B , N_2^B , H_2O^B – содержание составляющих влажного воздуха, %;

O_2^C , N_2^C – содержание составляющих сухого воздуха, %;

d_B – влажностное содержание воздуха, которое определяется по формуле (4), г/м³ сухого газа.

Часто для сжигания используется смесь двух газов с заданной теплотой сгорания $Q_{H\text{ см}}^P$. В этом случае перед расчетом горения нужно определить состав смешанного газа. Для этого необходимо:

1. Пересчитать составы заданных сухих газов с поправкой на влажность по формулам (3), (4).
2. Принять объемную долю первого газа в смеси за x , а долю второго газа за $(1-x)$. Тогда

$$Q_{H\text{ см}}^P = Q_H^P \cdot x + Q_H^P (1-x),$$

откуда

$$x = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{P}''} - Q_{\text{н см}}^{\text{P}}}{Q_{\text{н}}^{\text{P}''} - Q_{\text{н}}^{\text{P}}}.$$

Величины $Q_{\text{н}}^{\text{P}'}$ и $Q_{\text{н}}^{\text{P}''}$, теплоты сгорания первого и второго газов, рассчитываются по формуле (1).

3. Рассчитать состав смешанного газа:

$$\text{Например, } \text{CO}_{2 \text{ см}} = \text{CO}_2' \cdot x + \text{CO}_2'' \cdot (1 - x) \text{ и т.д.,} \quad (8)$$

где $\text{CO}_{2 \text{ см}}$ – содержание компонента в смеси;

CO_2' – содержание компонента в первом газе;

CO_2'' – содержание компонента во втором газе.

Составы сухих газов (природного, коксового и доменного) приведены в [1, таблицы 6-8].

Состав твердого и жидкого топлива может быть задан органической, горючей или сухой массой. Перед расчетом горения заданный состав необходимо пересчитать на рабочую массу по одной из следующих формул:

$$\begin{aligned} x^{\text{P}} &= x^{\text{O}} \frac{100 - S^{\text{P}} - A^{\text{P}} - W^{\text{P}}}{100}, \\ x^{\text{P}} &= x^{\text{Г}} \frac{100 - A^{\text{P}} - W^{\text{P}}}{100}, \\ x^{\text{P}} &= x^{\text{C}} \frac{100 - W^{\text{P}}}{100}. \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь x^{O} , $x^{\text{Г}}$, x^{C} , x^{P} – содержание элемента топлива соответственно в органической, горючей, сухой и рабочей массе, масс.%;

S^{P} , A^{P} , W^{P} – содержание серы, золы и влаги в рабочей массе топлива (по данным технического анализа), масс.%.

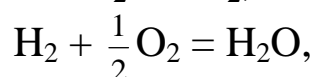
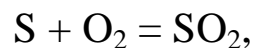
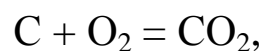
Обратный пересчет можно осуществить по тем же формулам (9). Данные элементарного и технического анализа твердого и жидкого топлива представлены в [1, таблицы 11, 14].

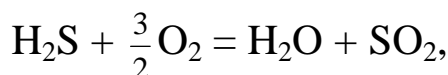
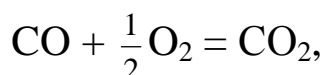
**Таблица 2 – Влагосодержание газа при полном его насыщении
водяными парами при давлении 101325 Па**

Температура насыщенного газа, °С	Парциальное давление водя- ного пара, Па	Абсолютная влажность газа, г/м ³	Содержание влаги в 1 м ³ су- хого газа, г/м ³	Температура насыщенного газа, °С	Парциальное давление водя- ного пара, Па	Абсолютная влажность газа, г/м ³	Содержание влаги в 1 м ³ су- хого газа, г/м ³
-20	102,93	0,81	0,8	32	4759,60	33,8	39,70
-15	165,32	1,29	1,3	34	5306,22	37,6	44,75
-10	259,98	2,04	2,0	36	6212,81	41,7	50,25
-5	401,30	3,08	3,1	38	6626,10	46,2	57,0
0	610,62	4,84	4,87	40	7372,71	51,2	63,50
2	705,27	5,56	5,65	42	8199,30	56,5	71,25
4	813,26	6,36	6,50	44	9092,56	62,3	80,0
6	935,92	7,26	7,49	46	10099,14	68,7	89,3
8	1069,24	8,26	8,80	48	11172,38	75,6	100,4
10	1226,56	9,40	9,88	50	12358,95	83,1	112,5
12	1399,88	10,7	11,3	52	13598,84	91,1	126,2
14	1599,86	12,1	12,95	54	14998,73	99,8	141,0
16	1813,18	13,6	14,64	56	16465,27	109,2	158,2
18	2058,49	15,4	16,79	58	18131,79	119,3	177,4
20	2333,14	17,3	19,05	60	19864,98	130,2	200,0
22	2646,44	19,4	21,5	62	21864,81	142,0	224,7
24	2979,78	21,8	24,5	64	23864,64	154,6	252,7
26	3359,71	24,4	27,67	66	26131,11	168,1	285,0
28	3773,01	27,2	31,25	68	28530,91	182,6	322,5
30	4226,31	30,4	35,27	70	31197,35	198,2	365,0

2.4 Определение теоретического (L_B^0) и действительного (L_B^d) количества воздуха для горения

Необходимо записать уравнения термохимических реакций окисления составляющих топлива для 1 кмоль горючего:





Из анализа последнего уравнения следует, что для сжигания 1 кмоль CH_4 требуется 2 кмоль O_2 , а поскольку объем для всех газов, находящихся при нормальных условиях, по следствию из закона Авогадро есть величина постоянная $v_\mu = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$, то такое же соотношение сохраняется и для м^3 .

Например, для сжигания $1 \text{ м}^3 \text{ CH}_4$ необходимо $2 \text{ м}^3 \text{ O}_2$. С этим количеством O_2 внесется $2 \cdot \frac{79}{21} = 7,52 \text{ (м}^3 \text{ или кмоль) N}_2$. Теоретическое количество воздуха L_B^0 , необходимого для полного сжигания $1 \text{ м}^3 \text{ (кмоль) CH}_4$, составляет $9,52 \text{ м}^3 \text{ (кмоль)}$.

Порядок расчета L_B^A и L_B^0 следующий [3]: зная состав топлива и записав соответствующие реакции окисления горючих составляющих, можно подсчитать общий расход кислорода как сумму расходов кислорода, необходимого для сжигания отдельных горючих составляющих топлива (в $\frac{\text{м}^3 \text{O}_2}{\text{м}^3 \text{топлива}}$):

$$L_{\text{O}_2}^0 = \frac{0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_4 + \dots + 1,5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2}{100}, \quad (10)$$

где CO , H_2 , CH_4 , C_2H_4 , H_2S – содержание горючих составляющих топлива, об.%;

O_2 – содержание O_2 в топливе, об. %;

0,5; 1,5; 2,0; 3,0 – стехиометрические коэффициенты в уравнениях реакций.

Тогда теоретическое количество воздуха для горения

$$\begin{aligned} L_B^0 &= L_{\text{O}_2}^0 + L_{\text{N}_2}^0 = L_{\text{O}_2}^0 + \frac{79}{21} L_{\text{O}_2}^0 = 4,762 L_{\text{O}_2}^0 = \\ &= \frac{4,762(0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_4 + \dots + 1,5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2)}{100} \end{aligned} \quad (11)$$

На практике для более полного сжигания топлива в зону горения подается воздуха больше, чем это требуется по стехиометрическим соотношениям: $L_B^A > L_B^0$. Отношение действительного количества воздуха к теоретическому называется коэффициентом расхода воздуха: $n = L_B^A / L_B^0$.

Численное значение коэффициента расхода воздуха принимается в зависимости от вида топлива и условий его сжигания (таблица 3) [4].

Рассчитав по формуле (11) L_B^0 и приняв значение n , можно определить действительное количество воздуха:

$$L_B^d = n \cdot L_B^0. \quad (12)$$

При определении величин L_B^0 и L_B^d для твердого и жидкого топлива необходимо сначала сделать пересчет состава топлива, выраженного в массовых процентах, на молярный. Это связано с тем, что для твердого и жидкого топлива объемные доли и процентные содержания компонентов топлива не совпадают, как это имеет место для газообразного топлива. Для пересчета на молярный состав необходимо процентные содержания составляющих топлива поделить на их молекулярные массы, и расчет величин L_B^0 и L_B^d вести в кмоль, которые затем пересчитать в объемные единицы (m^3) умножением на $v_\mu = 22,4 m^3/кмоль$. Тогда теоретически необходимое количество кислорода для окисления C, H и S топлива (в $\frac{m^3 O_2}{m^3 \text{ топлива}}$):

$$L_{O_2}^0 = \left(\frac{C^p}{\mu_c} + \frac{0,5H^p}{\mu_{H_2}} + \frac{S^p}{\mu_s} - \frac{O^p}{\mu_{O_2}} \right) \cdot \frac{V_\mu}{100}; \quad (13)$$

теоретически необходимо количество воздуха (в $\frac{m^3 \text{ воздуха}}{кг \text{ топлива}}$):

$$L_B^0 = L_{O_2}^0 + L_{N_2}^0 = L_{O_2}^0 + 3,762 L_{O_2}^0 = 4,762 L_{O_2}^0 = 4,762 \left(\frac{C^p}{\mu_c} + \frac{0,5H^p}{\mu_{H_2}} + \frac{S^p}{\mu_s} - \frac{O^p}{\mu_{O_2}} \right) \cdot \frac{V_\mu}{100}; \quad (14)$$

действительное количество воздуха (в $\frac{m^3 \text{ воздуха}}{кг \text{ топлива}}$):

$$L_B^d = n \cdot L_B^0. \quad (15)$$

В формулах (13), (14) C^p ; $0,5H^p$; S^p ; O^p – содержание указанных элементов с соответствующими коэффициентами реакций горения, масс.%;

μ_c , μ_{H_2} , μ_s , μ_{O_2} – молекулярные массы, кг/кмоль;

v_μ – объем 1 кмоль газа при нормальных условиях, $m^3/кмоль$;
 $v_\mu = 22,4$.

В том случае, если расчет ведется с учетом влажности воздуха, количество воздуха для горения будет отличаться от вычисленного по формуле (11) и будет равно (в $\frac{\text{м}^3 \text{воздуха}}{\text{м}^3 \text{топлива}}$):

$$L_B^0 = L_B^0 (1 + 0,001244 \cdot d_B) = 4,762(1 + 0,001244 \cdot d_B) \times \frac{(0,5\text{CO} + 0,5\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 3\text{C}_2\text{H}_4 + \dots + 1,5\text{H}_2\text{S} - \text{O}_2)}{100}, \quad (16)$$

где d_B – влажность воздуха, г/м³ сухого газа.

2.5 Определение теоретического (V^0) и действительного (V^d) количества продуктов сгорания

В состав продуктов полного сгорания могут входить CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , O_2 и оксиды азота. Количество последних в дыме весьма незначительно, а определение их связано с большими сложностями, поэтому в расчете полного горения принято учитывать лишь 5 составляющих продуктов сгорания: CO_2 , H_2O , SO_2 , N_2 , O_2 . Тогда действительное количество продуктов сгорания:

$$V^d = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{O}_2} + V_{\text{SO}_2}. \quad (17)$$

Здесь общее количество CO_2 в продуктах сгорания складывается из CO_2 , содержащегося в газообразном топливе, и CO_2 , образовавшегося при горении углеродсодержащих компонентов (в $\frac{\text{м}^3 \text{CO}_2}{\text{м}^3 \text{топлива}}$):

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{\text{CO}_2 + (\text{CO} + \text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_4 + \dots)}{100}, \quad (18)$$

где CO_2 – содержание CO_2 в газообразном топливе, %;

CO , CH_4 , C_2H_4 – содержание углеродсодержащих компонентов топлива, %.

Общее количество H_2O складывается из влаги топлива, влаги воздуха и водяных паров, образовавшихся при горении водородсодержащих компонентов (в $\frac{\text{м}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{м}^3 \text{топлива}}$):

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\text{H}_2\text{O} + (\text{H}_2 + 2\text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_4 + \dots + \text{H}_2\text{S})}{100}, \quad (19)$$

где H_2O – содержание влаги в топливе, %;

H_2 , CH_4 , C_2H_4 , C_2H_6 – содержание водородсодержащих компонентов топлива, об. %.

Общее количество N_2 складывается из N_2 , содержащегося в топливе, и N_2 , внесенного с воздухом (в $\frac{m^3 N_2}{m^3 \text{ топлива}}$):

$$V_{N_2}^d = \frac{N_2 + 79 \cdot nL_B^0}{100}, \quad (20)$$

где n – коэффициент расхода воздуха;

N_2 – содержание N_2 в топливе, % об.

O_2 входит в состав продуктов сгорания, если $n > 1$, и определяется как разница действительного и теоретического количества O_2 (в $\frac{m^3 O_2}{m^3 \text{ топлива}}$):

$$\begin{aligned} V_{O_2}^d &= L_{O_2}^d - L_{O_2}^0 = nL_{O_2}^0 - L_{O_2}^0 = (n-1)L_{O_2}^0 = \\ &= \frac{(n-1)(0,5CO + 0,5H_2 + 2CH_4 + 3C_2H_4 + \dots + 1,5H_2S - O_2)}{100} \end{aligned} \quad (21)$$

SO_2 присутствует в продуктах сгорания топлива, содержащего серу, и определяется (в $\frac{m^3 SO_2}{m^3 \text{ топлива}}$):

$$V_{SO_2} = \frac{H_2S}{100}, \quad (22)$$

где H_2S – содержание H_2S в топливе, % об.

Теоретическое количество продуктов сгорания можно определить, если в формулах (20), (21) принять $n=1$. Ясно, что

$$V_{CO_2}^d = V_{CO_2}^0; \quad V_{H_2O}^d = V_{H_2O}^0; \quad V_{SO_2}^d = V_{SO_2}^0$$

и соответствует стехиометрическим соотношениям (реакциям горения) независимо от величины n . Таким образом, разница между V^d и V^0 определяется суммой объема кислорода, превышающего теоретически необходимое количество, и объем азота, внесенного с этим количеством кислорода.

Объем продуктов полного сгорания для твердого и жидкого топлива (m^3/kg) также определяется по формуле (17), в которой

$$V_{CO_2} = \frac{C^p}{\mu_C} \cdot \frac{22,4}{100}, \quad (23)$$

$$V_{SO_2} = \frac{S^p}{\mu_S} \cdot \frac{22,4}{100} \quad (24)$$

$$V_{N_2} = \frac{N^p}{\mu_{N_2}} \cdot \frac{22,4}{100} + 0,79nL_B^0 \quad (25)$$

$$V_{O_2}^d = L_{O_2}^d - L_{O_2}^0 = nL_{O_2}^0 - L_{O_2}^0 = (n-1)L_{O_2}^0 =$$

$$= (n-1) \left(\frac{C^p}{\mu_c} + \frac{0,5H^p}{\mu_{H_2}} + \frac{S^p}{\mu_s} - \frac{O^p}{\mu_{O_2}} \right) \cdot \frac{22,4}{100}, \quad (26)$$

$$V_{H_2O} = \left(\frac{H^p}{\mu_{H_2}} + \frac{W^p}{\mu_{H_2O}} \right) \cdot \frac{22,4}{100} + \frac{W^\Phi}{\mu_{H_2O}} \cdot \frac{22,4}{100}, \quad (27)$$

где W^Φ – количество водяных паров для распыливания жидкого топлива в форсунках высокого давления, в % от массы топлива (для твердого топлива $W^\Phi = 0$).

2.6 Определение состава и плотности продуктов полного сгорания

Состав продуктов полного сгорания (в объемных %) определяется по следующим соотношениям:

$$CO_2 = \frac{V_{CO_2}}{V^d} \cdot 100, \quad H_2O = \frac{V_{H_2O}}{V^d} \cdot 100, \quad SO_2 = \frac{V_{SO_2}}{V^d} \cdot 100,$$

$$N_2 = \frac{V_{N_2}}{V^d} \cdot 100, \quad O_2 = \frac{V_{O_2}}{V^d} \cdot 100. \quad (28)$$

Плотность продуктов сгорания любого вида топлива (в $кг/м^3$):

$$\rho_{пс} = \frac{\mu_{CO_2} \cdot CO_2 + \mu_{SO_2} \cdot SO_2 + \mu_{H_2O} \cdot H_2O + \mu_{N_2} \cdot N_2 + \mu_{O_2} \cdot O_2}{V_\mu \cdot 100}, \quad (29)$$

где μ_{CO_2} и т.д. – молекулярные массы составляющих дыма, $кг/кмоль$;

CO_2 и т.д. – содержание составляющих дыма, %;

V_μ – объем 1 кмоль газа при нормальных условиях, $v_\mu = 22,4 м^3/кмоль$.

Аналогично определяется плотность газообразного топлива (в $кг/м^3$):

$$\rho_t = \frac{\mu_{CO} \cdot CO + \mu_{H_2} \cdot H_2 + \mu_{CH_4} \cdot CH_4 + \dots}{V_\mu \cdot 100} \quad (30)$$

и плотность воздуха (в $кг/м^3$)

$$\rho_b = \frac{\mu_{O_2} \cdot O_2 + \mu_{N_2} \cdot N_2 + \mu_{H_2O} \cdot H_2O}{V_\mu \cdot 100}. \quad (31)$$

При этом плотность сухого воздуха принимается:

$$\rho_b = 1,29 кг/м^3.$$

2.7 Материальный баланс горения топлива

Правильность расчета горения проверяется составлением материального баланса: масса исходных продуктов горения (топливо, воздух) должна быть равна массе получающихся продуктов сгорания. Результаты расчета рекомендуется представить в виде таблиц 4 и 5.

Таблица 4 – Материальный баланс горения газообразного топлива (на 100 м^3 газа)

Статьи прихода массы, кг	Статьи расхода массы, кг
1. Масса топлива $m_T = \rho_T \cdot L_T = \rho_T \cdot 100$ 2. Масса сухого воздуха $m_B = \rho_B \cdot L_B^d$	1. Масса продуктов сгорания $m_{\text{пс}} = \rho_{\text{пс}} \cdot V^d$
Приход массы $m_{\text{прих}} = m_T + m_B$	Расход массы $m_{\text{расх}} = m_{\text{пс}}$

Таблица 5 – Материальный баланс горения твердого и жидкого топлива (на 100 кг топлива)

Статьи прихода массы, кг	Статьи расхода массы, кг
1. Масса топлива $m_T = 100$ 2. Масса сухого воздуха $m_B = \rho_B \cdot L_B^d$	1. Масса продуктов сгорания $m_{\text{пс}} = \rho_{\text{пс}} \cdot V^d$ 2. Масса золы $m_A = A^p$
Приход массы $m_{\text{прих}} = m_T + m_B$	Расход массы $m_{\text{расх}} = m_{\text{пс}} + m_A$

Невязка баланса $\delta = \frac{m_{\text{прих}} - m_{\text{расх}}}{m_{\text{прих}}} \cdot 100\%$ допускается до 0,5%.

Результаты расчета горения топлива рекомендуется представлять в виде таблиц (таблица 6 – для газообразного, таблица 7 – для твердого и жидкого топлива).

Таблица 6 – Расчет горения газообразного топлива (на 100 м³)

Участвуют в горении						Образуются при горении					
топливо (т)			окислитель (в)			продукты сгорания (пс)					
Состав	м ³ (%)	Реакция горения	O ₂ , м ³ (%)	N ₂ , м ³ (%)	Итого, м ³ (%)	CO ₂ м ³ (%)	H ₂ O м ³ (%)	SO ₂ м ³ (%)	N ₂ , м ³ (%)	O ₂ , м ³ (%)	Итого, м ³ (%)
CH ₄	93,20	CH ₄ +2O ₂ = CO ₂ +2H ₂ O	186,40			93,20	186,40				
C ₂ H ₆	0,70	C ₂ H ₆ + $\frac{7}{2}$ O ₂ = 2CO ₂ +3H ₂ O	2,45			1,40	2,10				
C ₃ H ₈	0,60	C ₃ H ₈ +5O ₂ = 3CO ₂ +4H ₂ O	3,00			1,80	2,40				
C ₄ H ₆	0,60	C ₄ H ₆ + $\frac{11}{2}$ O ₂ = 4CO ₂ +3H ₂ O	3,30			2,40	1,80				
N ₂	4,90	N _{2г} → N _{2пс}							4,90		
n=1 Итого	100	м ³	L ⁰ _{O₂} 195,15	L ⁰ _{N₂} 7 34,14	L ⁰ _В 929,29	V ⁰ _{CO₂} 98,80	V ⁰ _{H₂O} 192,70	V ⁰ _{SO₂}	V ⁰ _{N₂}	-	V ⁰ 1030,54
		(%)	21,00	79,00	100,00						100,00
n=1,1 Итого		м ³	L ^д _{O₂} 214,67	L ^д _{N₂} 807,55	L ^д _В 1022,22	V ^д _{CO₂} 98,80	V ^д _{H₂O} 192,70	V ^д _{SO₂} -	V ^д _{N₂} 812,45	V ^д _{O₂} 19,52	V ^д 1123,47
		(%)	21,00	79,00	100,00	8,79	17,15	-	72,32	1,74	100,00

Таблица 7 – Расчет горения жидкого и твердого топлива (на 100 кг)

Участвуют в горении								Образуются при горении							
топливо (т)					окислитель (в)				продукты сгорания (пс)						
Состав	кг (%)	μ	кмоль	Реакция горения	O ₂ ,	N ₂ ,	Итого,		CO ₂	H ₂ O	SO ₂	N ₂ ,	O ₂ ,	Итого,	
					кмоль	кмоль	кмоль	м ³	кмоль	кмоль	кмоль	кмоль	кмоль	кмоль	кмоль
C	76,32	12	6,36	C+ O ₂ = CO ₂	6,36	7,42×3,76=27,90	35,31	790,90	6,36	-	-	27,90	-	-	36,64×22,4=820,70
H	4,08	2	2,04	H ₂ + $\frac{1}{2}$ O ₂ = H ₂ O	1,02				-	2,04	-	-	-	-	
S	3,80	32	0,12	S +O ₂ = SO ₂	0,12				-	-	0,12	-	-	-	
O	3,64	32	0,11		-0,11				-	-	-	-	-	-	
N	1,61	28	0,06	N _{2т} → N _{2пс}	-				-	-	-	0,06	-	-	
W	3,00	18	0,17		-				-	0,17	-	-	-	-	
A	7,55	-	-		0,03				-	-	-	-	-	-	
					L ⁰ _{O₂}	L ⁰ _{N₂}	L ⁰ _B		V ⁰ _{CO₂}	V ⁰ _{H₂O}	V ⁰ _{SO₂}	V ⁰ _{N₂}	V ⁰ _{O₂}	V ⁰	
Σ n=1	100,00	-	-	кмоль (м ³)	7,42	27,90	35,31	790,90	6,36	2,21	0,12	27,96	-	36,64	820,70
				(%)	21	79	100	100	17,36	6,02	0,32	76,30	-	100	100
					L ^д _{O₂}	L ^д _{N₂}	L ^д _B		V ^д _{CO₂}	V ^д _{H₂O}	V ^д _{SO₂}	V ^д _{N₂}	V ^д _{O₂}	V ^д	
Σ n=1,25				кмоль (м ³)	9,27	34,87	44,14	988,70	6,36	2,21	0,12	34,93	1,85	45,47	1018,50
				(%)	21	79	100	100	13,99	4,85	0,26	76,82	4,08	100	100

П р и м е ч а н и е – Предполагается, что сера входит в каменный уголь в виде FeS₂, окисляющегося по уравнению FeS₂ + 2,5O₂ = FeO + 2SO₂. Поэтому расход кислорода на окисление Fe в золе составит 0,25 S (S – количество серы, моль). При избытке воздуха против теоретического расхода кислорода составляет: O = nO_м; N = nN_м. Кислород, избыточный против теоретического переходит в продукты сгорания неиспользованным. Количество его составляет: O₂ = O_м×(n-1).

2.8 Определение температуры горения топлива

Под температурой горения понимают температуру, которую приобретают продукты сгорания за счет тепла, выделенного при сжигании топлива.

Различают температуру горения действительную:

$$T_d = \frac{Q_n^p + Q_{фв} + Q_{фт} - q_{дисс} - q_{пот} - q_{о.с.}}{V_{пс} \cdot c_{пс}}, \quad (32)$$

теоретическую

$$T_t = \frac{Q_n^p + Q_{фв} + Q_{фт} - q_{дисс}}{V_{пс} \cdot c_{пс}} \text{ и} \quad (33)$$

калориметрическую:

$$T_k = \frac{Q_n^p + Q_{фв} + Q_{фт}}{V_{пс} \cdot c_{пс}}, \quad (34)$$

где Q_n^p - теплота сгорания топлива, кДж/м³ или кДж/кг;

$Q_{фв}$ и $Q_{фт}$ - соответственно физическое тепло подогретых воздуха и топлива, кДж/м³ или кДж/кг;

$q_{дисс}$ - тепло, затраченное на диссоциацию продуктов сгорания, кДж/м³ или кДж/кг;

$q_{пот}$ - потери тепла вследствие химического и механического недожога, кДж/м³ или кДж/кг;

$q_{о.с.}$ - потери тепла в окружающую среду, кДж/м³ или кДж/кг;

$V_{пс}$ - объем продуктов сгорания, образующихся при сгорании единицы топлива, м³/м³ или м³/кг;

$c_{пс}$ - теплоемкость продуктов сгорания, кДж/м³К.

Точно определить T_d практически невозможно, так как нельзя точно учесть влияние потерь тепла в окружающую среду. Весьма трудоемким является также и определение теоретической температуры горения T_t [4], которая бывает необходима в некоторых теплотехнических расчетах, например, при определении средней температуры печи. Сложность расчета T_t связана с необходимостью учета диссоциации продуктов сгорания при высоких температурах. Для приближенных расчетов T_t можно воспользоваться I-t диаграммой, предложенной П. Розинем и Р. Фелингом [4]. Однако для температур, развивающихся в рабочем пространстве нагревательных печей, диссоциация CO₂ и H₂O незначитель-

на, поэтому теоретическую температуру горения можно считать равной калориметрической.

Если воздух и топливо подаются в зону горения без предварительного подогрева, то формула (34) принимает вид:

$$T_k = \frac{Q_H^p}{V_{nc} \cdot c_{nc}} \quad (35)$$

Сложность определения калориметрической температуры по формуле (36) заключается в том, что теплоемкость продуктов сгорания зависит от температуры, которую требуется определить.

Определение T_k производится либо графическим способом [2], либо аналитически методом последовательных приближений и интерполяции. Сущность метода заключается в следующем. После преобразования формулы (35) получаем:

$$\frac{Q_H^p}{V_{nc}} = T_k \cdot c_{nc} = I_k \quad (36)$$

где $I_k = \frac{Q_H^p}{V_{nc}}$ – энтальпия продуктов сгорания, соответствующая калориметрической температуре, кДж/м³.

Рассчитав Q_H^p и V_{nc} , определяем величину I_k . Далее задаемся предполагаемой температурой горения T_1 и определяем энтальпию продуктов сгорания, соответствующую этой температуре:

$$I_1 = \frac{CO_2 \cdot i_{CO_2} + H_2O \cdot i_{H_2O} + SO_2 \cdot i_{SO_2} + N_2 \cdot i_{N_2} + O_2 \cdot i_{O_2}}{100}, \quad (37)$$

где CO_2 ; H_2O ; SO_2 , N_2 ; O_2 – содержание компонентов в продуктах сгорания, % об.

$i_{CO_2}, i_{H_2O}, i_{SO_2}, i_{N_2}, i_{O_2}$ – энтальпии составляющих продуктов сгорания, соответствующие предполагаемой температуре T_1 , кДж/м³.

Значения энтальпий некоторых газов приведены в таблице 8 [5].

Полученное значение I_1 сравниваем с I_k , и если $I_1 < I_k$, то задаемся другим значением $T_2 = T_1 + 100K$ и т.д. до тех пор, пока не получим $I_{n+1} > I_k$, рисунок 1.

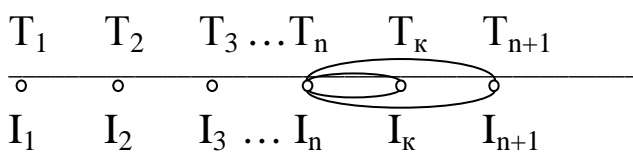


Рисунок 1– Схема расчета T_k .

Как видно из рисунка 1, искомая калориметрическая температура находится в интервале $T_n - T_{n+1} = 100\text{K}$ и может быть определена по интерполяционной формуле, полученной следующими несложными рассуждениями: повышение температуры на $T_n - T_{n+1} = 100\text{K}$ соответствует повышению энтальпии на $(I_{n+1} - I_n)$, а повышение температуры на $(T_k - T_n)$ – повышению энтальпии на $(I_k - I_n)$, то есть

$$\frac{I_{n+1} - I_n}{100} = \frac{I_k - I_n}{T_k - T_n}, \text{ откуда}$$

$$T_k = T_n + \frac{I_k - I_n}{I_{n+1} - I_n} \cdot 100. \quad (38)$$

Калориметрическую температуру можно приближенно определять также графическим методом с помощью I - t диаграмм (рисунок 2), построенных С.Г. Тройбом [2]. Для пользования I - t диаграммами необходимо определить калориметрическую энтальпию продуктов сгорания, кДж/м^3 ,

$$I_k = \frac{Q_H^p + Q_{\text{фв}} + Q_{\text{фг}}}{V_{\text{пс}}}, \quad (39)$$

где Q_H^p – теплота сгорания топлива, кДж/м^3 ;

$Q_{\text{фв}}$ – физическое тепло подогретого воздуха, кДж/м^3 ;

$$Q_{\text{фв}} = L_v^d \cdot I_v;$$

$Q_{\text{фг}}$ – энтальпия топлива, кДж/м^3 ; $Q_{\text{фг}} = I_T$;

I_v – энтальпия подогретого воздуха, кДж/м^3 ;

и содержание воздуха в продуктах горения (%):

$$l = \frac{L_g^d - L_g^0}{V_{\text{пс}}} \cdot 100. \quad (40)$$

Таблица 8 – Энтальпия газов

Темпе- ратура, °C	Энтальпия газов, кДж/м ³									
	CO ₂	H ₂ O	Воздух	N ₂	O ₂	H ₂	CO	SO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	171,3	150,0	130,0	130,0	132,3	129,2	130,2	182,0	160,9	210,1
200	360,6	302,4	261,9	261,6	267,2	259,6	261,5	379,2	349,4	465,9
300	563,9	418,7	395,7	394,6	409,4	390,6	395,7	589,5	563,2	759,5
400	777,1	623,4	533,0	530,1	551,4	521,7	532,2	810,2	800,7	1080,0
500	1001,1	690,2	672,4	667,8	699,6	654,0	671,0	1037,9	1060,2	1447,0
600	1236,4	964,3	814,7	389,4	850,8	785,9	802,2	1272,4	1341,8	1830,5
700	1475,1	1143,0	959,0	950,9	1004,5	919,5	960,7	1510,7	1549,5	2233,8
800	1718,8	1328,9	1106,9	1098,7	1160,5	1086,9	1110,3	1751,8	1968,3	2675,5
900	1967,5	1526,8	1259,4	1247,7	1320,3	1041,3	1261,1	1997,6	2300,3	2991,2
1000	2219,5	1721,0	1412,3	1399,3	1479,7	1330,2	1414,4	2243,6	2647,0	3564,8
1100	2476,6	1910,9	1564,9	1553,8	1629,0	1469,6	1570,1	2655,5	-	-
1200	2732,8	2113,6	1721,7	1708,3	1802,5	1614,5	1726,3	2738,3	-	-
1300	2992,4	2321,1	1879,5	1862,8	1970,2	1758,5	1926,8	2994,9	-	-
1400	3256,3	2536,3	2038,6	2021,9	2133,4	1904,2	2042,8	3246,2	-	-
1500	3520,0	2750,9	2272,6	2180,6	2298,2	2072,5	2199,8	3497,4	-	-
1600	3784,6	2977,4	2355,6	2337,6	2463,2	2200,3	2361,5	3747,4	-	-
1700	4049,7	3204,6	2515,5	2496,7	2629,8	2350,5	2521,8	4005,3	-	-
1800	4316,8	3430,4	2677,2	2660,0	2801,5	2505,5	2683,9	4262,4	-	-
1900	4584,8	3656,1	2836,3	2818,7	2974,9	2658,7	2847,2	4932,3	-	-
2000	4852,7	3889,7	3000,4	2980,7	3146,6	2813,7	3007,9	4651,7	-	-
2100	5124,8	4127,5	3162,4	3142,7	3315,3	2970,2	3174,2	5024,4	-	-
2200	5397,0	4362,8	3321,1	3309,0	3485,7	3132,3	3337,5	5284,0	-	-
2300	5669,2	4601,5	3510,3	3472,3	3661,1	3291,8	3502,4	5539,4	-	-
2400	5937,2	4840,1	3650,2	3636,4	3838,2	3452,6	3667,8	5799,0	-	-
2500	6213,5	5078,8	3820,6	3802,2	4012,3	3615,5	3834,8	6054,4	-	-
2600	6481,4	5325,8	3983,5	3968,8	4191,2	3779,1	4002,7	6309,8	-	-
2700	6753,6	5564,5	4151,8	4131,3	4362,8	3940,0	4166,9	6569,4	-	-

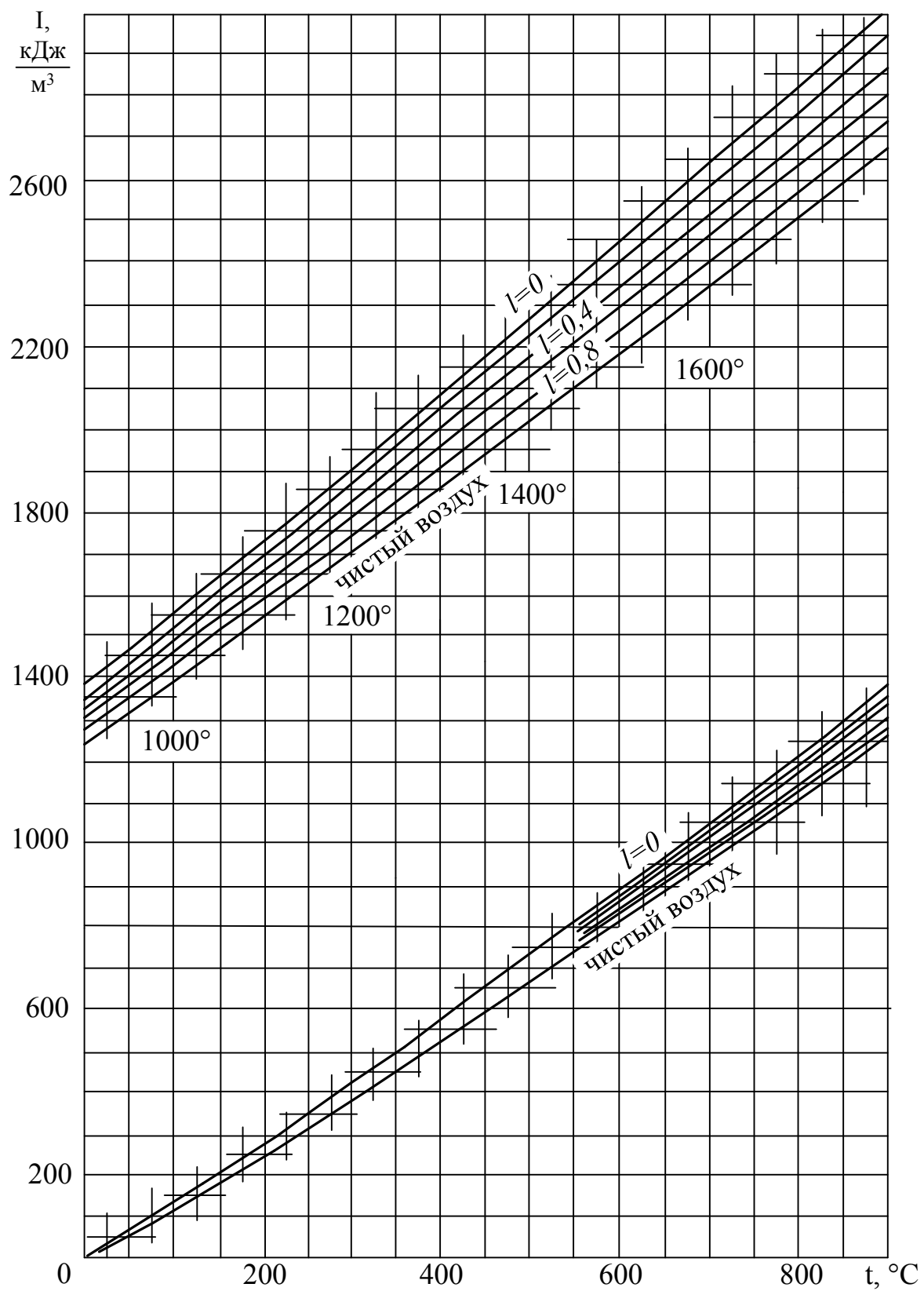


Рисунок 2 – I-t диаграмма.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самохвалов Г.В. Учебно-методическое пособие по проектированию металлургических печей. – Новокузнецк: Изд. СМИ, 1971. – 132 с.
2. Арсеев А.В. Сжигание природного газа. – М.: Металлургия, 1963. – 407 с.
3. Линчевский В.П. Топливо и его сжигание. – М.: Металлургиздат, 1959. – 398 с.
4. Филимонов Ю.П., Старк С.Б., Морозов В.А. металлургическая теплотехника. Т. 2. – М.: Металлургия, 1974. – 519 с.
5. Расчеты нагревательных печей. / Под. ред. Н.Ю. Тайца. – Киев: Техника, 1955. – 264 с.

Учебное издание

Составители:

Михайличенко Татьяна Алексеевна
Стерлигов Владислав Викторович

РАСЧЕТ ГОРЕНИЯ ТОПЛИВА

Методические рекомендации
к проведению практических занятий и выполнению ВКР
для студентов, обучающихся по направлениям подготовки
150400 «Металлургия»,
280700 «Техносферная безопасность»,
140100 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Издано в полном соответствии с авторским оригиналом

Подписано в печать

Формат бумаги 60x84 1/16. Бумага писчая. Печать офсетная.

Усл. печ. л. Уч.-изд. л. Тираж экз. Заказ

ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный индустриальный
Университет»

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.

Издательский центр СибГИУ