

УДК 662.613

UDC 662.613

05.00.00 Технические науки

Engineering sciences

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ
ЭФФЕКТИВНОГО ГОРЕНИЯ
МАЛОСУРНИСТОГО МАЗУТА**

**DETERMINATION OF PARAMETERS FOR
EFFICIENT COMBUSTION OF LOW-SULFUR
FUEL OIL**

Попкова Оксана Сергеевна
канд. техн. наук, доцент кафедры «ТОТ»,
РИНЦ SPIN-код: 4884-0466,
Author ID: 635243
oksiniy@mail.ru

Popkova Oksana Sergeevna
Cand.Tech.Sci., associate Professor
oksiniy@mail.ru

Файзуллина Азалия Ильгизовна
магистрант
faizullinamyau@gmail.com

Faizullina Azaliya Ilgizovna
graduate student
faizullinamyau@gmail.com

Гильфанов Камилъ Хабибович
д.т.н., профессор, зав. кафедры «АТПП»,
Author ID: 153151
kamil.gilfanov@yandex.ru
*Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Казанский государственный
энергетический университет», Казань, Россия*

Gilfanov Kamil Habibovich
Doct.Tech.Sci., professor, head of the Department
«ATPP», Author ID: 153151
kamil.gilfanov@yandex.ru
*Federal state budgetary educational institution of
higher professional education «Kazan state power
engineering University», Kazan, Russia.*

В статье приведен расчет горения жидкого топлива, в котором определяется расход воздуха на горение топлива, затем количество и состав продуктов горения – дымовых газов, образующихся в результате горения топлива и температура дымовых газов

The article presents the calculation of combustion of liquid fuel, which is determined by the air consumption for combustion of fuel, then the number and the composition of combustion products – flue gas resulting from burning fuel and the flue-gas temperature

Ключевые слова: ТОПЛИВО; ПРОДУКТЫ СГОРАНИЯ; ТЕПЛОТЕХНИКА; МАЗУТ

Keywords: FUEL, COMBUSTION PRODUCTS, HEAT ENGINEERING, FUEL OIL

Doi: 10.21515/1990-4665-132-101

Продукты сгорания оказывают определяющее влияние на энергетические и экономические показатели различных теплотехнических установок. Однако помимо этих продуктов при сгорании образуется и ряд других веществ, которые вследствие их малого количества не учитываются в энергетических расчетах, но определяют экологические показатели топок, печей, тепловых двигателей и других устройств современной теплотехники.

В первую очередь к числу экологически вредных продуктов сгорания следует отнести так называемые токсичные газы. Токсичными являются вещества, оказывающие негативные воздействия на организм человека и

окружающую среду. Основными токсичными веществами являются оксиды азота NO, оксид углерода CO, различные углеводороды CH, сажа и соединения, содержащие свинец и серу.

Промышленные виды топлива горят в результате химических реакций окисления их горючей части кислородом воздуха. Из-за большого объема горящего топлива, невозможно рассматривать горение единичной жидкой капли [6]. Поэтому первой задачей расчета горения является определение расхода воздуха на горение топлива. Затем определяют количество и состав продуктов горения – дымовых газов, образующихся в результате горения топлива, и, наконец, находят температуру дымовых газов.

Первый этап этих расчетов – определение расхода кислорода. Расход кислорода рассчитывают исходя из стехиометрических соотношений реакций окисления отдельных компонентов горючей части топлива, их атомных и молекулярных масс, где для жидкого топлива эти расчеты ведут по соотношениям массы веществ. Отношение действительного расхода воздуха G_d к теоретическому G_t называют коэффициентом избытка воздуха и обозначают буквой α :

$$\alpha = G_d / G_t \quad (1)$$

Значение α зависит от вида топлива и степени совершенства топочного устройства. Наибольшая полнота смешения с воздухом достигается у газового топлива. Поэтому его можно сжечь с минимальным избытком воздуха: $\alpha = 1,05 \dots 1,1$. Мазут при сжигании распыляют специальными форсунками, что обеспечивает образование развитой поверхности взаимодействия диспергированных капель мазута с воздухом. Однако даже в тонкодиспергированном мазуте не удается достичь идеального (молекулярного) смешения его капель с воздухом. Поэтому для сжигания мазута требуется повышенный избыток воздуха: $\alpha = 1,1 \dots 1,2$.

Несколько больший избыток воздуха необходим при сжигании пылевидного топлива – $\alpha = 1,2 \dots 1,25$. Наименее развитая поверхность взаимодействия с воздухом образуется при сжигании твердого кускового топлива. Поэтому здесь избытки воздуха значительны: $\alpha = 1,4 \dots 1,8$.

Далее при расчете горения топлива определяют количество и состав дымовых газов, образующихся в результате этого процесса. Они также получаются из стехиометрических соотношений реакций взаимодействия горючих составных частей топлива с кислородом воздуха с учетом закона равенства массы реагирующих веществ и продуктов реакции. В составе и количестве дымовых газов, естественно, учитывается (к продуктам реакции плюсятся) избыточный кислород, весь азот и влага, вовлеченная с воздухом.

Третьим этапом расчета горения является определение температуры горения топлива и требуемого избытка воздуха. Различают теоретическую (калориметрическую) и практическую температуры горения топлива. Максимальная калориметрическая температура развивается при сжигании топлива с $\alpha = 1$.

В большинстве случаев топливо не сгорает до полной степени окисления его горючих составных частей – в дымовых газах наряду с CO_2 и H_2O появляются продукты неполного сгорания CO и H_2 с соответствующим понижением тепловых эффектов процесса горения. Вследствие этого появляются потери тепла от химического недожога топлива. Затем часть тепла теряется через ограждающие конструкции топчного устройства [3,3].

Кроме потерь тепла, часть его передается нагреваемому материалу непосредственно так называемой прямой отдачей, т.е. излучением, минуя нагрев дымовых газов, температура которых и по этой причине не может превосходить температуры горения t_n всегда ниже калориметрической t_k (теоретической). Факторы, которые обуславливают снижение

теоретической температуры горения топлива при его сжигании в котельных и промышленных тепловых установках, учитывают калориметрическим коэффициентом η_k .

$$t_n = t_k \cdot \eta_k \quad (2)$$

Для топок паровых котлов в зависимости от степени экранирования поверхности нагрева котла η_k колеблется в пределах 0,15...0,5.

Калориметрическую температуру горения топлива с приемлемой для инженерных расчетов точностью определяют из уравнения теплового баланса горения 1кг твердого или жидкого топлива:

$$Q_n^p + V_b^0 \cdot C_b \cdot t_b \cdot \alpha + C_T t_T = V_d^0 \cdot C_d \cdot t_k \cdot \alpha \quad (3)$$

где Q_n^p – низшая теплотворность топлива, кДж/кг; V_b^0 – теоретический расход воздуха на горение 1кг топлива, м³/кг; C_b – теплоемкость воздуха, $C_b = 1,3$ кДж/м³ С; t_b – температура воздуха, поступающего на горение топлива, С; t_T – температура топлива, поступающего на горение; C_T – теплоемкость топлива; V_d^0 – теоретическое количество продуктов горения от сжигания 1кг топлива, нм³/кг; C_d – теплоемкость дымовых газов. Для проектных расчетов допустимо пользоваться приближенными формулами:

$$C_d = 0,25 + 0,000014t_d \quad (4)$$

$$C_d = 0,323 + 0,000018t_d \quad (5)$$

где t_d – температура продуктов горения (дымовые газы), С [4].

Практически подогревают перед сжиганием только мазут. Твердое топливо и природный газ не подогревают и, следовательно, в этих случаях величиной $C_T \cdot t_T$ можно пренебречь. Если уравнением (3) пользуются для определения калориметрической температуры горения топлива t_k , то поскольку от t_k зависит и C_d , это уравнение решают методом последовательного приближения.

Уравнением (3) можно воспользоваться для двух целей: если по условию задания известна требуемая практическая температура в печи t_n ,

то предварительно рассчитав по уравнению (2) калориметрическую температуру t_k , определяют затем по уравнению (3) необходимый избыток воздуха, решая уравнение (3) относительно α . Если же, наоборот, заданной величиной является коэффициент избытка воздуха α , обусловленный видом топлива и типом топочного устройства, то из уравнений (2), (3) определяют возможную температуру пламени $t_{п}$. Уравнение (3) указывает также возможные пути повышения калориметрической температуры t_k . Это снижение избытка воздуха и подогрев воздуха, используемого на горение топлива, а также подогрев жидкого топлива. Уравнение (3) показывает, что повышение практической температуры горения достижимо, прежде всего, за счет снижения тепловых потерь.

Приведем расчет горения малосернистого мазута, сжигаемого в выносной топке

В качестве исходных данных возьмем:

1. Состав мазута по справочным данным на рабочую массу (%):

$$C^P=85,3; H^P=10,2; N^P=0,3; O^P=0,4; S^P=0,5; W^P=3; A^P=0,3.$$

2. Влагосодержание воздуха, согласно климатологическим таблицам и $H-d$ диаграмме, $d=10$ г на 1кг сухого воздуха.

3. Требуемая практическая температура горения $t_{п}=1050$ С (1323 К).

Целью работы является определить влагосодержание, энтальпию дымовых газов и расход воздуха на горение топлива.

Расчет ведем по стехиометрическим соотношениям химических уравнений реакций окисления горючих составных частей топлива [1]. Результаты расчета приведены в таблице 1, 2 столбец строки 1-7. Для упрощения расчет будем вести для 100 кг топлива. В этом случае количество отдельных составных частей топлива в 100 кг будет численно равно процентным соотношениям его состава. Плотности продуктов горения являются справочными величинами. Числа столбца 5 (строка 8) суммируют с учетом минусового знака у кислорода топлива

(строка 5, столбец 5), так как кислород, содержащийся в составе топлива, участвует в окислении горючих частей последнего. Поэтому на величину кислорода, содержащегося в составе топлива, уменьшается количество кислорода, вовлекаемого из атмосферного воздуха в процесс горения. Азот и влага являются негорючими веществами. Поэтому они без изменения количества (влага в виде водяных паров) переходят в состав дымовых газов, что условно обозначено стрелками в столбец 3 (строки 4 и 7). Отношение 77:23 в строке 9 соответствует процентному содержанию азота и кислорода в атмосферном воздухе по массе. Множитель 0,001 в строке 10 соответствует переводу граммов в килограммы.

Итог, подсчитанный в строке 11, определяет количество продуктов горения (столбец 18, 19) и расход воздуха (столбец 20, 21) при теоретическом количестве воздуха, без его избытка ($\alpha=1$), когда весь кислород участвует в реакциях процесса горения. Практически для повышения степени химической полноты горения в процесс вводят некоторое избыточное количество воздуха, характеризуемое коэффициентом избытка воздуха. Его значения рассчитывают из теплового баланса процесса горения 1кг топлива, имея в виду необходимость достижения требуемой практической температуры горения топлива.

Используем уравнение теплового баланса (3) для процесса горения 1кг топлива:

$$Q_H^P + L_B^0 \cdot C_B \cdot t_B \cdot \alpha + C_T t_T = L_D^0 \cdot C_D \cdot t_K \cdot \alpha, \quad (6)$$

где для мазута по справочным данным $Q_H^P = 41\ 450$ кДж/кг); $L_B^0 = 1358,9 : 100 = 13,59$ кг/кг (по табл. 1, столбец 20, строка 11); $C_B = 1,005$ кДж/(кг С); температуру воздуха, принимаем $t_B = 100$ С (при сжигании мазута воздух обязательно подогревают до 100...150 С. При сжигании топлива в печах также часто используют подогретый воздух из

зоны остывания печей); температуру топлива, принимаем $t_T=100$ С (мазут подогревают до 80...100 С для обеспечения необходимой дисперсности капель); C_T – теплоемкость топлива (мазута) определяют по формуле:

$$C_T = 1,74 + 0,00252t_T, \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°С)}; \quad (7)$$

$$C_T = 1,74 + 0,00252 \cdot 100 = 1,992 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°С)};$$

L_d^0 – теоретическое количество продуктов горения 1кг топлива.

Согласно расчету горения $L_d^0 = 1458,58:100=14,6$ кг на 1 кг топлива (табл. 1, столбец 18, строка 11); t_k – калориметрическая температура горения, °С.

Её находят по формуле:

$$t_k = t_{\Pi}/\eta_k, \quad (8)$$

где t_{Π} – требуемая практическая температура горения, назначаемая по условиям технологии. Для нашего расчета $t_{\Pi}=1050$ С; η_k – калориметрический коэффициент процесса горения (коэффициент прямой отдачи). Для топочных устройств можно принимать $\eta_k=0,9$.

Тогда:

$$t_k = \frac{1050}{0,9} = 1170 \text{ °С};$$

C_d –теплоемкость продуктов горения по массе (дымовых газов).Она может быть подсчитана как средневзвешенная теплоемкость газовой смеси по известным формулам термодинамики.

Для проектных расчетов допустимо также пользоваться приближенной формулой теплоемкости дымовых газов по массе (кДж/(кг С)):

$$C_d = 1,05 + 0,0006t_d, \quad (9)$$

Принимая в нашем случае $t_k=t_d=1170$ С, получаем:

$$C_d = 1,05 + 0,0006 \cdot 1170 = 1,115 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°С)}.$$

Из уравнения (6) находим:

$$\alpha = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + t_{\text{т}} \cdot C_{\text{т}}}{L_{\text{д}}^{\text{о}} \cdot C_{\text{д}} \cdot t_{\text{к}} - L_{\text{в}}^{\text{о}} \cdot C_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}}} = \frac{41450 + 100 \cdot 1,992}{14,6 \cdot 1170 \cdot 1,115 - 13,59 \cdot 1,005 \cdot 100} = 2,3. \quad (10)$$

При этом избытке воздуха продолжим расчет горения топлива (табл. 1, строки 12-15) [1].

Если дымовые газы предназначены для использования в качестве теплоносителя в сушилке, то возникает необходимость дополнительно определить их влагосодержание $d_{\text{д}}$ и энтальпию $I_{\text{д}}$. Вычисляем влагосодержание дымовых газов:

$$d_{\text{д}} = \frac{G_{\text{H}_2\text{O}} \cdot 1000}{L_{\text{сд}}}, \quad (11)$$

где $G_{\text{H}_2\text{O}}$ – масса водяных паров в дымовых газах, отнесенная на 1 кг топлива; в нашем случае она равна 1,257 кг (табл. 1, столбец 10, строка 15); $L_{\text{сд}}$ – масса сухих дымовых газов от сжигания 1 кг топлива;

$$L_{\text{сд}} = L_{\text{д}} - G_{\text{H}_2\text{O}}. \quad (12)$$

В нашем случае $L_{\text{сд}} = \frac{3324,9 - 125,7}{100} = 30,99$ кг.

Тогда, $d_{\text{д}} = \frac{1,257 \cdot 1000}{30,99} = 40,6$ г. на 1 кг сухих газов.

Энтальпию продуктов горения, отнесенную к 1 кг сухих дымовых газов, определяют по формуле:

$$H_{\text{д}} = \frac{Q_{\text{н}}^{\text{р}} + L_{\text{в}}^{\text{о}} \cdot C_{\text{в}} \cdot t_{\text{в}} \cdot \alpha + C_{\text{т}} \cdot t_{\text{т}}}{L_{\text{сд}}} \quad (13)$$

$$L_{\text{в}}^{\text{о}} \cdot \alpha = 31,26 \text{ м}^3/\text{м}^3,$$

Тогда, $H_{\text{д}} = \frac{41450 + 199 + 31,26 \cdot 1,005 \cdot 1000}{30,99} = 1445,3$ кДж на 1 кг сухих газов.

По значениям $d_{\text{д}}$ и $H_{\text{д}}$ находят на $H - d$ диаграмме точку, соответствующую состоянию дымовых газов [5].

Приведённая методика позволяет определить параметры, необходимая для горения топлива.

Литература

1. Михайловский В. П., Мартемьянова Э. Н., Ушаков В. В. Расчеты горения топлив, температурных полей и тепловых установок технологии бетонных и железобетонных изделий. Учебное пособие, – 2011. 264 – с.
2. Гушин С. Н. Расчеты горения топлив. – Книга. –1995.48 – с.
3. Равич М. Б. Эффективность использования топлива. – Книга. –1977. 344 – с.
4. Зельдович Я. Б., Бернблатт Г. И., Либрович В. Б. Математическая теория горения и взрыва. – Книга. –1980. 478 – с.
5. Колесников Т. М., Попов В.М., Кукин П.П., Протасов В. В., Северенчук П. Н., Шульга Л. В., Юшин В. В. Теория горения и взрыва. Учебное пособие для бакалавра. – 2015. 435 – с.
6. Кочнева О.С., Павлов Г.И., Сахабутдинов Ж.М. Экспериментально-теоретические исследования нестационарного взаимодействия горящей капли с акустическим потоком газа в трубе// Вестник казанского технологического университета, 2007, №3, с. 137-143.

References

1. Mihajlovskij V. P., Martem'janova Je. N., Ushakov V. V. Raschety gorenija topliv, temperaturnyh polej i teplovyh ustanovok tehnologii betonnyh i zhelezobetonnyh izdelij. Uchebnoe posobie, – 2011. 264 – s.
2. Gushhin S. N. Raschety gorenija topliv. – Kniga. –1995.48 – s.
3. Ravich M. B. Jeffektivnost' ispol'zovanija topliva. – Kniga. –1977. 344 – s.
4. Zel'dovich Ja. B., Bernblatt G. I., Librovich V. B. Matematicheskaja teorija gorenija i vzryva. – Kniga. –1980. 478 – s.
5. Kolesnikov T. M., Popov V.M., Kukin P.P., Protasov V. V., Severenchuk P. N., Shul'ga L. V., Jushin V. V. Teorija gorenija i vzryva. Uchebnoe posobie dlja bakalavra. – 2015. 435 – s.
6. Kochneva O.S., Pavlov G.I., Sahabutdinov Zh.M. Jeksperimental'no-teoreticheskie issledovanija nestacionarnogo vzaimodejstvija gorjashhej kapli s akusticheskim potokom gaza v trube// Vestnik kazanskogo tehnologicheskogo universiteta, 2007, №3, s. 137 - 143.

Таблица 1. Расчет горения малосернистого мазута (на 100 кг)

№ n/ n	Ход расчета		Удельный расход кислорода, на 1 кг горючего элемента	Расход кислорода, кг, на 100 кг топлива	Удельное количество теплоты горения	Плотность горения, кг/м ³	Состав и количество продуктов горения при нормальных условиях												Расход воздуха	
							CO ₂		H ₂ O		SO ₂		N ₂		O ₂		всего			
	Элементарный состав топлива, % по массе	Реакция горения					кг	м ³	кг	м ³	кг	м ³	кг	м ³	кг	м ³	кг	м ³	кг	м ³
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	C ^p – 85,3	C+O ₂ = CO ₂	2,67	85,3*2,67=227,7	3,67	1,977	313	158,3	-	-	-	-	-	-	-	-	313,05	158,34	-	-
2	H ^p – 10,2	H ₂ +5O ₂ = H ₂ O	8	10,2*8=81,6	9	0,805	5	-	91,8	114,04	-	-	-	-	-	-	91,8	114,04	-	-
3	S ^p – 0,5	S+ O ₂ = SO ₂	1	0,5*1=0,5	2	2,86	-	-	-	-	1,0	0,35	-	-	-	-	1,0	0,35	-	-
4	N ^p – 0,3	N _r → N _d	-	-	-	1,25	-	-	-	-	-	-	0,3	0,24	-	-	0,3	0,24	-	-
5	O ^p – 0,4	-	-	(-0,4)	-	1,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	A ^p – 0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	W ^p - 3	W _r → W _d	-	-	-	0,805	-	-	3	3,73	-	-	-	-	-	-	3	3,73	-	-
8	Итого:		-	309,45	-	-	313,05	158,34	94,8	117,77	1,0	0,35	0,3	0,24	-	-	409,15	267,7	-	-
9	Расчет:		-	-	-	1,25	-	-	-	-	-	-	1035,98	828,79	-	-	1035,98	828,79	-	-
10	При α=1 N ₂ =1035,98 кг		-	-	-	0,805	-	-	13,45	16,71	-	-	-	-	-	-	13,45	16,71	-	-
	При d=10г на кг сухого воздуха		-	-	-	0,805	-	-	13,45	16,71	-	-	-	-	-	-	13,45	16,71	-	-
	H ₂ O=13,45кг		-	-	-	0,805	-	-	13,45	16,71	-	-	-	-	-	-	13,45	16,71	-	-
11	Итого при α=1		-	-	-	-	313,05	158,34	108,45	134,48	1,0	0,35	1036,3	829,03	-	-	1458,58	1122,2	1358,9	1051
12	При α=2,3G _d =711,7 кг		-	-	-	1,43	-	-	-	-	-	-	-	-	402,3	281,3	402,3	281,3	-	-
13	N ₂ =2382,6 кг		-	-	-	1,25	-	-	-	-	-	-	2382,6	1906,1	-	-	2382,6	1906,1	-	-
14	H ₂ O=30,9 кг		-	-	-	0,805	-	-	30,9	38,4	-	-	-	-	-	-	30,9	38,4	-	-
15	Итого при α=2,3		-	-	-	-	313,05	158,34	127,5	156,15	1,0	0,35	2382,9	1906,3	402,3	281,3	3224,9	2502,4	3125	2417
16	Количество сухих дымовых газов		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3099,2	-	-	-