

Оглавление

Введение.....	2
1. Расчет продуктов сгорания твердого и жидкого топлив	4
1.1 Состав и технические характеристики топлив	4
1.2 Расчет процесса горения топлив.....	4
2. Расчет продуктов сгорания природного газа.....	5
2.1 Состав и технические свойства газа	5
2.2 Реакции горения газа	6
2.3 Объемы продуктов сгорания	7
3. Определение необходимого расхода топлива при заданной мощности энергоблока.....	8
4. Расчет выбросов вредных веществ с дымовыми газами паротурбинных энергоблоков.....	8
4.1 Объем дымовых газов (м ³), выбрасываемых в атмосферу	8
4.2 Выбросы твердых частиц.....	8
4.3 Выбросы оксидов серы	8
4.4 Выбросы оксидов азота.....	9
5. Типовые примеры расчета.....	10
Список рекомендуемой литературы.....	13
Приложение	14

Введение

При выработке тепла на тепловых электростанциях России структура топливного баланса представлена следующим образом: доля природного газа составляет порядка 60%, угля и мазута соответственно 30% и 10%. При этом мазут используется только для растопки котлов и подсветки при сжигании низкорекреационных углей. Прогнозируемое сокращение поставок природного газа на действующие электростанции потребует увеличения доли угля в теплоэнергетике. При этом основное сокращение объемов газа приходится именно на Европейскую часть России, где приблизительно 70% электростанций работают на газомазутном топливе. Оптимальное сочетание газа и угля на ТЭС определяется не только экономическими, но и экологическими факторами, с учетом существенных преимуществ в аспекте защиты окружающей среды [1]

Увеличение доли угля в топливном балансе, особенно в центральных регионах России, при высокой фоновой загазованности потребует введения более совершенных мер по предупреждению роста загрязнения атмосферы вредными выбросами.

На ряде электростанций вместо расчетных марок углей вынужденно сжигаются несколько марок или их смеси. В большинстве случаев одна из сжигаемых марок угля является базовой (ее доля превышает 50-60%). В группу взаимозаменяемых углей с учетом особенностей оборудования ТЭС и ресурсной базы углей, в том числе входят березовский (Канско-Ачинский угольный бассейн) и Подмосковский.

Применительно к энергетическим объектам с паротурбинными блоками на твердом, жидком и газообразном топливе, газотурбинным энергоблокам приведены технические характеристики различных видов энергетического топлива, основные стехиометрические уравнения процессов горения горючих составляющих и метод расчета продуктов полного горения топлива и содержания в них вредных веществ: оксидов серы, азота, твердых частиц с использованием информационных материалов [3-6]. Метод имеет упрощенный по сравнению с оригиналом [2] вид, адаптированный для получения исходных данных для выполнения дальнейших разработок по решению экологических проблем ТЭС.

При превышении допустимого уровня выбросов вредных веществ согласно ГОСТ Р 50831-95 для котельных агрегатов, регламентирующего содержание окислов серы, твердых частиц и оксидов азота в дымовых газах, возникает необходимость в рассмотрении наиболее эффективных технологических методов сжигания топлива для уменьшения образования оксидов азота и серы в пылеугольных и газомазутных котлах и очистки

Оглавление

дымовых газов с помощью аппаратов по золоулавливанию, десульфуризации и сокращению выбросов оксидов азота.

Приведены типовые примеры расчета валого выброса в атмосферу загрязняющих продуктов при эксплуатации паротурбинных энергоблоков на твердом и газообразном топливе.

1. Расчет продуктов сгорания твердого и жидкого топлив

1.1 Состав и технические характеристики топлив

Таблица 1. Характеристики топлива

Район добычи, месторождение	Состав рабочей массы топлива, %							Теплота сгорания $Q_{нр}^p$, МДж/кг	Выход летучих веществ, %
	W _p	A _p	S _p	C _p	H _p	N _p	O _p		
Канско-ачинский Б2	33.0	4.7	0.2	44.2	3.1	0.4	14.4	15.66	48
Подмосковный Б2	32.0	28.6	2.7	26.0	2.1	0.4	8.2	9.34	50
Печорский ЖР Воркутинское	5.5	23.6	0.8	59.6	3.8	1.3	5.4	23.2	33
Донецкий АШ	8.5	22.9	1.7	63.8	1.2	0.6	1.3	22.6	3.5
Горючие сланцы	13.0	40.0	1.6	24.1	3.1	0.1	3.7	10.9	90
Фрезервный торф	50.0	6.3	0.1	24.7	2.6	1.1	15.2	8.1	70
Мазут высокосернистый	3.0	0.1	2.8	83.0	10.4	0.7		38.9	-
Древесина	40.0	0.6	-	30.3	3.6	0.4	25.1	10.2	85

1.2 Расчет процесса горения топлив

Элемент горения, (на рабочую массу)	Стехиометрические уравнения продукты горения на 1 кмоль	Количество кислорода на 1 кг горючего элемента
Углерод	$C + O_2 = CO_2$, 12кг C + 32кг O ₂ = 44кг CO ₂	(8 / 3) C _p
Углерод	$2C + O_2 = 2CO$, 24кг C + 32кг O ₂ = 56кг CO	(4 / 3)C _p
Водород	$2H + O_2 = 2 H_2O$, 4кг H ₂ + 32кг O ₂ =36кг H ₂ O	8 H _p
Сера(горючая)	$S + O_2 = SO_2$, 32кг S +32кг O ₂ = 64кг SO ₂	1 S _p

Количество кислорода (кг), требующееся для сжигания 1 кг рабочего топлива

$$\{(8 / 3) C_p + 8 H_p + S_p - O_p\} / 100$$

Объемное количество кислорода м³ (плотность кислорода при нормальных условиях 1.429 кг/ м³)

$$V_{O_2} = 0.01 (1.866 C_p + 5.56 H_p + 0.75 S_p - 0.7 O_p)$$

[Оглавление](#)

Теоретический расход окислителя, м³/кг

$$V_{ок} = 100V_{O_2} / O_{2ок}$$

$O_{2ок}$ – объемное содержание кислорода в окислителе, %

Объем теоретически необходимого воздуха (м³) для сжигания 1 кг топлива

$$V_o = 0.0889 (C_p + 0.375 S_p) + 0.265 H_p - 0.0333 O_p$$

Действительный расход воздуха (м³) на 1 кг твердого топлива определяется из следующего выражения

$$V_v = \alpha_t V_o, \text{ где } \alpha_t - \text{избыток воздуха в топке.}$$

Теоретический объем продуктов сгорания, м³/кг

$$V_{\Gamma} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O},$$

$$V_{RO_2} = 0.0186 (C_p + 0.375 S_p)$$

$$V_{N_2} = 0.79 V_o + 0.008 N_p$$

Полный объем водяных паров образуется в результате горения водорода, испарения влаги топлива, влагосодержания атмосферного воздуха, для жидкого топлива с учетом пара на распыливание.

$$V_{H_2O} = 0.111 H_p + 0.0124 W_p + 0.00124 d_r V_{ок} + 1.24 G_{ф}$$

d_r - влагосодержание окислителя, г/м³ (может быть принят равным 13 г/ м³)

$G_{ф}$ - удельный расход пара на распыливание жидкого топлива (от 0.03 до 1 кг/кг в зависимости от типа форсунки)

2. Расчет продуктов сгорания природного газа

2.1 Состав и технические свойства газа

Таблица 2

	Состав газа по объему	Объемная теплота сгорания низшая сухого газа, МДж/м ³

Природные газы\ месторождения:	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	H ₂ S	
Ставропольское	98.0	0.4	0.2	-	-	1.3	0.1	-	35.7
Оренбургское	82.7	4.9	1.65	0.92	1.92	4.33	1.34	2.23	36.0
Ухтинское	88.0	1.9	0.2	0.3	-	9.3	0.3	-	33.3
	CO	H ₂	H ₂ O	CO ₂	N ₂	H ₂ S	COS		Теплота сгорания МДж / м ³
Синтез-газ	65.0	25.6	-	5.1	3.3	0.8	0.2		2.8

2.2 Реакции горения газа

Горючие элементы	Химическая формула реакций окисления	Объем кислорода для сгорания 1 м ³ , м ³	Объемы продуктов сгорания на 1 м ³		
			V _{RO₂}	V _{H₂O}	V _{N₂}
CO	CO + 0.5 O ₂ = CO ₂	0.5 CO/100	CO/100		0.79 V _O
H ₂	H ₂ + 0.5O ₂ = H ₂ O	0.5 H ₂ /100		H ₂ /100	
CH ₄	CH ₄ + 2 O ₂ = 2 CO ₂ + 2H ₂ O	2 CH ₄ /100	CH ₄ /100	2CH ₄ /100	
C _m H _n	C _m H _n + (m+n/4) O ₂ = mCO ₂ + n/2 H ₂ O	$\frac{(m+n/4)C_mH_n}{100}$	$\frac{mC_mH_n}{100}$	$\frac{n/2C_mH_n}{100}$	
H ₂ S	H ₂ S + 1.5O ₂ = SO ₂ + H ₂ O	1.5 H ₂ S/100	H ₂ S/100	H ₂ S/100	

Теоретическое количество воздуха (м³) необходимое для сжигания 1 м³ сухого газообразного топлива

$$V_o = 0.0476 [0.5 CO + 0.5 H_2 + 1.5 H_2S + (m+n/4) C_mH_n - O_2]$$

Объем трехатомных газов (м³)

$$V_{RO_2} = 0.01 (CO_2 + CO + H_2S + mC_mH_n)$$

Теоретический объем азота

$$V_{N_2} = 0.79V_o + 0.01N_2$$

Теоретический объем водяных паров

$$V_{H_2O} = 0.01 (H_2 + H_2S + n/2 C_m H_n + 0.0124 d \gamma) + 0.0161 V_o$$

$d\gamma$ - влагосодержание газообразного топлива, г/м³

2.3 Объемы продуктов сгорания

Выход продуктов полного сгорания при $\alpha_{ух} > 1$ на 1 кг твердого и жидкого топлива (на 1 м³ газообразного топлива), м³/кг (м³/м³)

$$V_{\Gamma} = V_{RO_2} + V_{N_2} + V_{H_2O} + (\alpha_{ух} - 1) V_o$$

Выход водяных паров, м³/кг (м³/м³)

$$V_{H_2O} = V_{OH_2O} + 0.00124 d (\alpha_{ух} - 1) V_o$$

Для воздуха $d = 13$ г/м³

$$V_{H_2O} = V_{OH_2O} + 0.0161 (\alpha_{ух} - 1) V_o$$

Действительный объем продуктов больше с учетом избытка воздуха в газовом потоке.

При работе газового котла под наддувом избыток воздуха сохраняется неизменным по всему газовому тракту.

При работе котла под разрежением, создаваемым дымососами, происходит подсос холодного воздуха в газовый тракт. В этом случае избыток воздуха $\alpha_{ух}$ имеет две составляющие, одна из которых характеризует избыток воздуха, необходимый для полного сгорания топлива, вторая – это присосы холодного воздуха в газоходах, которые нормируются. Получение реального значения $\alpha_{ух}$ связано с выполнением измерительных операций по анализу состава дымовых газов.

Приближенный расчет $\alpha_{ух}$ можно осуществить по формуле

$$\alpha_{ух} = RO_2 \text{ макс.} / RO_2$$

RO_2 – относительное содержание сухих трехатомных газов в продуктах сгорания % ,

$$RO_2 = 100 (V_{RO_2} / V_{сг})$$

RO_2 макс., % изменяется в следующих пределах:

Для твердого топлива 18-20

Для мазута 16-17

Для природного газа 11-13

3. Определение необходимого расхода топлива при заданной мощности энергоблока

Расчет расхода топлива производится по заданной мощности энергоблока $N_{\text{э}}$ и принятому значению КПД брутто в соответствии с установленными техническими характеристиками энергетического объекта и результатами его эксплуатации, корректирующими значения КПД.

$$(B_{\text{т}} \times Q_{\text{рн}}) \text{КПД бр} = N_{\text{э}}$$

4. Расчет выбросов вредных веществ с дымовыми газами паротурбинных энергоблоков

4.1 Объем дымовых газов (м³), выбрасываемых в атмосферу

$$V_{\text{дг}} = B_{\text{т}} \{ V_{\text{г}} + (\alpha_{\text{ух}} - 1) V_{\text{о}} \} (T_{\text{ух}} + 273) / 273, B_{\text{т}}, \text{кг/с}$$

4.2 Выбросы твердых частиц

При отсутствии эксплуатационных данных по содержанию горючих в уносе количество выбрасываемых твердых частиц определяется по формуле

$$M_{\text{з}} = 0.01 B_{\text{т}} \{ a_{\text{ун}} A_{\text{р}} + q^{\text{МЕХ}} (Q_{\text{рн}} / 32.7) \}$$

Средняя теплота сгорания горючих в уносе равна 32.7, МДж / кг, $A_{\text{р}}$ – зольность топлива, %

$a_{\text{ун}}$ – доля летучей золы ; доля золы, удаляемой через холодную воронку котла при твердом золоудалении (10-20%) или из ванны под топкой при жидком шлакоудалении (40-60%).

Топки с жидким шлакоудалением применяются в основном при сжигании слабореакционных топлив (с низким выходом летучих, например Донецкий АШ), с умеренными значениями температуры плавления золы $t_{\text{з}} < 1300-1350 \text{ C}$, влажности $W_{\text{р}} < 20\%$ и зольности топлива $A_{\text{р}} < 25\%$.

$q_{\text{мех}}$ – потери теплоты с механической неполнотой сгорания топлива для антрацита – 5.0%,

каменного угля 0.5-2.0%, бурого угля 0.5%, газа и мазута менее 0.1%.

4.3 Выбросы оксидов серы

Валовый и максимально разовый выбросы оксидов серы SO_2 и SO_3 в пересчете на SO_2

$$M_{\text{so2}} = 20 B_{\text{т}} S_{\text{р}} (1 - \beta) , \text{г/с}$$

V_T - расход топлива, кг/с

$S_p, \%$ (1 кг S_p + 32/32 кг O_2 = 64/32 кг SO_2)

β - доля оксидов серы, связываемых летучей золой

Топливо	Численные значения β
Канско-ачинские угли	0.5
Остальные угли	0.2
Сланцы	0.5
Торф	0.15

4.4 Выбросы оксидов азота

Расчет содержания оксидов азота в дымовых газах вызывает определенные сложности, поскольку в процессе горения топлива их образование (термических из молекулярного азота воздуха, топливных из азота, содержащегося в топливе, так называемых быстрых при реакции молекулярного азота воздуха с углеводородными радикалами) зависит от ряда факторов, в том числе от температуры горения, времени пребывания продуктов сгорания в зоне генерации оксидов азота и других.

Для определения валового выброса оксидов азота можно ориентироваться на их значения, полученные по эксплуатационным данным.

Значения оксидов азота для котлов

Вид топлива	Способ шлакоудаления	Концентрация NO_x , мг\ мз
Каменный уголь	жидкое шлакоудаление	1300
Каменный уголь	сухое шлакоудаление	1100
Мазут		1320
Газовое топливо		1500

Массовый выброс оксидов азота в пересчете на NO_2 в единицу времени равен

для твердого топлива $M_{NO_2} = C_m V_T V_T$

для газового топлива

$M_{NO_2} = C_{V_{NO_2}} V_T V_T / \rho \cdot 1000$, г/с

V_T - объем выхлопных газов при сжигании 1 м³ топлива с избытком воздуха $\alpha > 1$, р г

- плотность кг/ м³ сухого газообразного топлива, $V_{гт}$ – количество топлива, кг/с

Для ГТУ $V_{гт}$ – количество топлива, сжигаемого в камере сгорания ГТУ.

C_m - массовая концентрация NO_2 при концентрации O_2 в выхлопных газах - 15%.

[Оглавление](#)

Если концентрация NO_2 приведена в объемной концентрации ppm, то имеем соотношение $C_{m\text{NO}_2} = 2.053 C_{v\text{NO}_2}$

Массовый выброс оксидов азота в пересчете на диоксид азота можно рассчитать следующим образом

$$M_o = B_T Q_n^p K_{\text{NO}_x}, \text{ г/с}$$

K_{NO_x} – удельный выброс оксидов азота NO_x в пересчете на NO_2 , г/МДж

Характеристики котла			Вид топлива					
D т/ч	P _{пе} МПа	t _{пе} С	Каменный уголь		Бурый уголь		Мазу т	Газ
			V > 22%	V < 22%	W < 3.8	3.8 < W < 6		
160-220	9.8	560	0.25	-	0.22	0.2	0.12	-
210-820	13.8	560	0.25	-	0.22	0.2	0.12	-
640-670	13.8	545	0.28	0.28	0.22	0.2	0.13	0.13
950-2650	26.5	545	0.28	0.28	0.25	0.2	0.13	0.13

D - паропроизводительность котла

P_{пе}, t_{пе} - давление и температура перегрева пара

Удельные выбросы вредных веществ сравниваются с нормативными значениями (Приложение 1)

при t = 0 С, P = 0.1013 МПа, $\alpha_{yx} = 1.4$

При превышении полученных результатов относительно нормативных должны быть разработаны меры по приведению их к соответствию.

5. Типовые примеры расчета

Вариант 1. Определить массовый выброс NO_x при эксплуатации ГТУ

Задано:

$$N_{\text{э}} = 180 \text{ МВт}$$

КПД бр. – 27%

$$Q_n^p = 50 \times 10^3 \text{ кДж/кг (природный газ – 100% метан)}$$

Концентрация NO_x в выхлопных газах 150 мг/м³

Расчет

$$B_T = 180 \times 10^3 / 50 \times 10^3 \times 0.27 = 13.3 \text{ кг/с}$$

Объем выхлопных газов при сжигании 1 м³ природного газа (CH_4 - 100%) при избытке воздуха за камерой сгорания = 2.4 составит $V_{\Gamma} = 23.4 \text{ м}^3/\text{м}^3$, плотность метана = 0.72 кг/м³

Массовый выброс оксидов азота составит

$$M_{\text{NOx}} = 0.150 \times 13.3 \times 10^3 \times 23.4 / 0.72 = 63.9 \text{ г/с}$$

Вариант 2. Определить массовый выброс NOx для паротурбинного энергоблока на природном газе

Задано:

$$N_{\text{э}} = 300 \text{ МВт}$$

КПД бр. - 40%

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 50 \times 10^3 \text{ кДж/кг (природный газ – 100\% CH}_4\text{)}$$

Концентрация NOx в дымовых газах 1500 мг/м³

Расчет

$$B_{\text{T}} = 300 \times 10^3 / 50 \times 10^3 \times 0.4 = 15 \text{ кг/с}$$

Объем дымовых газов при избытке воздуха $\alpha_{\text{ух}} = 1.4$, $V_{\text{Г}} = 14.5 \text{ м}^3/\text{м}^3$

Массовый выброс оксидов азота

$$M_{\text{NOx}} = 1.5 \times 14.5 \times 15 \times 10^3 / 0.72 = 450 \text{ г/с}$$

Вариант 3. Определить массовые выбросы золы, оксидов серы, азота для паротурбинного энергоблока на подмосковном угле

Задано

$$N_{\text{э}} = 300 \text{ МВт}$$

КПД брутто - 33%

$$Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 9.34 \text{ МДж/кг}$$

Технические свойства подмосковного угля таблица 1.

Потеря тепла от неполноты сгорания топлива

механической - 0.5 %

Температура уходящих газов 150⁰ С

Массовая концентрация NOx в дымовых газах 800 мг /м³

Расчет

$$B_{\text{T}} = 300 / 0.33 \times 9.34 = 97 \text{ кг/с}$$

Теоретическое количество воздуха, необходимое для горения топлива

$$V_{\text{о}} = 0.0899 (C_{\text{р}} + 0.375 S_{\text{р}}) + 0.265 H_{\text{р}} - 0.0333 O_{\text{р}} = 2.7 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Теоретический объем продуктов сгорания

$$V_{\text{Г}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}} = 0.0186 (C_{\text{р}} + 0.375 S_{\text{р}}) + 0.79 V_{\text{о}} + 0.008 H_{\text{р}} + 0.111 H_{\text{р}} + 0.0124 W_{\text{р}} + 0.0161 V_{\text{о}} = 2.9 \text{ м}^3/\text{с}$$

Объем дымовых газов, выбрасываемых в атмосферу

$$V_{yx} = B_T [V_{\Gamma} + (\gamma_{yx} - 1) V_o] (T_{yx} + 273) / 273 = 639 \text{ м}^3/\text{с} \quad \gamma_{yx} = 1.5$$

Разовый выброс золы

$$M_{\text{золы}} = 0.01 B_T [a_{\text{yn}} A_p + q_{\text{мех}} (Q_H / 32.7)] = 23670 \text{ г/с}, \quad a_{\text{yn}} = 0.85,$$

Разовый выброс SO_2

$$M_{\text{SO}_2} = 0.02 B_T S_p (1 - 0.2) = 4190 \text{ г/с},$$

Разовый выброс NO_x

$$M_{\text{NO}_x} = C_{\text{mNO}_x} V_{yx} = 511 \text{ г/с}$$

Список рекомендуемой литературы

1. Гаврилов Е.И. Экологические проблемы энергетики // Электроэнергетика России на рубеже XXI века и перспективы ее развития.: Сборник докл.. ОАО ЭНИН, 1999. С. 213-223.
2. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) . М.: Энергия , 1973.
3. Белов С.В., Барбинов Ф.А., Козьяков А.Ф. Охрана окружающей среды. М.: Высшая школа. 1991. 319с.
4. Резников М.И., Липов Ю.М. Котельные установки электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1987. 288с.
5. Повышение экологической безопасности тепловых электростанций// Учебное пособие/ Абрамов А.И. [и др.] М.,: МЭИ, 2001. 378 с.
6. Теоретические основы теплотехники// Теплотехнический эксперимент //Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1998. 362с.

Таблица

Нормативы удельных выбросов в атмосферу, принятые по ГОСТ 50831-95 в России

Топливо	Тепловая мощность новых установок,	Нормативы выбросов, мг/м ³
Оксиды азота		
Газообразное	<300	125
	>300	125
Жидкое	<300	250
	>300	250
Твердое: бурый уголь каменный	<300	300/300
	>300	300/-
	<300	470/640
	>300	350/570
Оксиды серы		
Твердое	<249	1400-950
	250-299	700
	>300	700
Жидкое	<249	1400-950
	250-299	700
	>300	700
Твердые частицы		
Твердое	<300	150(0,6)
	>300	50(<0,6)
Жидкое	<300	150-250(0,6-2,5)
	>300	50-150 (0.6-2.5)
	<300	250 (> 2,5)
	>300	150(>2,5)

Примечания: 1. Числитель - твердое шлакоудаление, знаменатель - жидкое шлакоудаление.
2, В скобках указаны значения приведенной зольности Ап, % • кг/МДж.