

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ НА ВЫХОД БЕНЗ(А)ПИРЕНА В ПРОЦЕССЕ СЖИГАНИЯ УГЛЯ

М.С. ИВАНИЦКИЙ

Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском

В статье представлены расчетные данные о содержании бенз(а)пирена в выбросах пылеугольных котлов, реализующих схемы сжигания угля с рециркуляцией дымовых газов. В условиях изменения доли рециркуляции и уровня присосов холодного воздуха в газоздушный тракт определены концентрации бенз(а)пирена в уходящих газах. Приведены данные для организации и нормального функционирования пылеугольных котлов с надежным выходом шлака и золы из топочной камеры. Представлены рекомендации выбора температуры и расхода рециркулирующих газов в целях обеспечения экологической безопасности работы угольного энергоблока.

Ключевые слова: рециркуляция дымовых газов, бенз(а)пирен, пылеугольный котел.

Введение

В процессе сжигания угольного топлива в топочных устройствах пылеугольных котлов тепловых электрических станций (ТЭС) в атмосферу поступает значительное количество вредных компонентов дымовых газов: оксиды азота, серы, углерода, сажа, зола, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ). Сжигание топлива без достаточного количества кислорода в зоне активного горения способствует образованию продуктов химического недожога. ПАУ относятся к компонентам недожога и обладают канцерогенными свойствами. Наиболее агрессивными канцерогенными веществами являются бенз(а)пирен, пирен, антрацен. В условиях горения угля на ТЭС выбросы БП могут быть нормированы в случае превышения концентрации в воздухе атмосферы выше значений среднесуточного уровня предельно допустимой концентрации. Для сокращения выбросов БП применяются режимно-технологические мероприятия по наладке топочного процесса для регулирования температурного уровня в зоне активного горения. Рециркуляция дымовых газов используется для стабилизации и оптимизации выхода токсичных компонентов сгорания. Наиболее часто рециркуляция применяется в целях сокращения выбросов оксидов азота. Механизмы образования и степень воздействия режимно-технологических мероприятий на эффективность снижения БП в продуктах сгорания органического топлива представлены в работах [1-7].

Численное исследование

Пылеугольный прямоточный котел ПК-37 (энергоблок СКР-100) рассчитан на суперсверхкритические параметры пара $P_0 = 28,4$ МПа, $t_0 = 610$ °С с промежуточным перегревом пара при $P_{пе} = 4,8$ МПа, $t_{пе} = 604$ °С. Корпус котла выполнен в башенной компоновке. Высота котла составляет 129 м [8].

Основным топливом является уголь Кузнецкого месторождения, класс Г и Д, возможно использование непроектных видов углей. Для установления возможности применения режимно-технологических мероприятий на основе рециркуляции дымовых газов для обеспечения экологических нормативных показателей рассмотрим варианты сжигания угля Донецкого месторождения в котле с ТШУ, горение Березовского угля в

топке котла с ЖШУ. Одним из ограничений использования рециркуляции в пылеугольных котлах являются высокозольные топлива с выходом летучих компонентов $v^{\Gamma} > 25\%$. Химический состав угольного топлива на рабочую массу Донецкого месторождения класса А, штыб, СШ: W=8,5 %; A=30,2 %; S=1,6 %; C=56,4 %; H=1,1 %; O=1,7 %; N=0,5 %; $Q_H^P = 19,97$ МДж/кг; Березовского месторождения класса Б2, Р: W=33,0 %; A=4,7 %; S=0,2 %; C=44,2 %; H=3,1 %; O=14,4 %; N=0,4 %; $Q_H^P = 15,66$ МДж/кг.

В качестве варьируемых режимных параметров используется коэффициент избытка воздуха в диапазоне 1,15÷1,25. Нагрузка котла варьируется постоянная. Ступенчатое сжигание топлива и подача влаги в виде жидкости или пара в топочную камеру не производится. Режимные показатели работы котла ПК-37 приняты согласно данным [8]. Температура уходящих газов составляет 155 °С.

Концентрация БП в сухих дымовых газах котлов за золоуловителями при факельном сжигании углей $C_{БП}^T$, приведенная к избытку воздуха в газах $\alpha = 1,4$, определяется по формуле

$$C_{БП}^T = \frac{A \cdot Q_H^P}{e^{1,5\alpha}} \cdot \prod_{i=1}^N K_i, \quad (1)$$

где A – коэффициент, характеризующий конструкцию нижней части топки в зависимости от вида шлакоудаления (для котлов с твердым шлакоудалением $A = 0,521$); Q_H^P – низшая теплотворная способность топлива на рабочую массу, МДж/кг; α – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах на выходе из топочной камеры; $\prod_{i=1}^N K_i = K_{Д} \cdot K_{ЗУ}$ – произведение коэффициентов для учета влияния нагрузки котла и степени улавливания БП золоуловителями. Погрешность методики составляет не более 20% [9].

Усредненный коэффициент избытка воздуха в топочной камере с учетом ввода в первичный воздух газов рециркуляции рассчитывается по выражению

$$\alpha = \frac{\alpha_{\Gamma} + R\alpha_{yx}}{1 + R}, \quad (2)$$

где R – доля газов рециркуляции; α_{Γ} – коэффициент избытка воздуха в горелочном устройстве; α_{yx} – коэффициент избытка воздуха в газах рециркуляции.

В табл.1–2 представлены данные различных соотношений долей рециркулирующих газов, концентраций кислорода в продуктах сгорания для обеспечения предельных выбросов БП от пылеугольного энергоблока. Температура газов рециркуляции составляет 400 °С. В табл. 1 коэффициент избытка воздуха в топке варьировался в пределах $\alpha_{\Gamma} = 1,15 - 1,25$, доля газов рециркуляции изменялась в диапазоне $R = 0,1 - 0,2$. Присосы воздуха в воздухоподогревателе варьировались в диапазоне $\Delta\alpha_{БП} = 0,03 - 0,05$. В табл. 2 коэффициент избытка воздуха в топке варьировался в пределах $\alpha_{\Gamma} = 1,15 - 1,20$, доля газов рециркуляции варьировалась в диапазоне $R = 0,1 - 0,2$, присосы холодного воздуха в воздухоподогревателе изменялись в пределах от 0,02 до 0,1.

Таблица 1

Соотношения долей рециркулирующих газов и концентраций кислорода
в продуктах сгорания котла с ТШУ

Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах	Коэффициент избытка воздуха без учета присосов		Коэффициент избытка воздуха в топочной камере после ввода газов рециркуляции, α_T^{PC}					
	$\Delta\alpha_{вп}=0,03$	$\Delta\alpha_{вп}=0,05$	$R = 0,1$ $\alpha_T = 1,2$	$R = 0,1$ $\alpha_T = 1,2$	$R = 0,15$ $\alpha_T = 1,2$	$R = 0,15$ $\alpha_T = 1,2$	$R = 0,2$ $\alpha_T = 1,2$	$R = 0,1$ $\alpha_T = 1,25$
1,30	1,27	1,25	1,206	1,205	1,209	1,207	1,211	1,250
1,35	1,32	1,30	1,211	1,209	1,216	1,213	1,220	1,258
1,40	1,37	1,35	1,215	1,213	1,222	1,220	1,228	1,267
1,45	1,42	1,40	1,220	1,218	1,229	1,226	1,237	1,275
1,50	1,47	1,45	1,225	1,223	1,235	1,233	1,250	1,283
1,55	1,52	1,50	1,229	1,227	1,242	1,239	1,258	1,292
1,60	1,57	1,55	1,234	1,232	1,248	1,246	1,267	1,300

Таблица 2

Соотношения долей рециркулирующих газов и концентраций кислорода
в продуктах сгорания котла с ЖШУ

Коэффициент избытка воздуха в уходящих газах	Коэффициент избытка воздуха без учета присосов		Коэффициент избытка воздуха в топочной камере после ввода газов рециркуляции, α_T^{PC}					
	$\Delta\alpha_{вп}=0,02-0,05$	$\Delta\alpha_{вп}=0,06-0,10$	$R = 0,1$ $\alpha_T = 1,15$	$R = 0,1$ $\alpha_T = 1,15$	$R = 0,15$ $\alpha_T = 1,2$	$R = 0,15$ $\alpha_T = 1,2$	$R = 0,2$ $\alpha_T = 1,2$	$R = 0,17$ $\alpha_T = 1,25$
1,40	1,36	1,30	1,169	1,164	1,221	1,213	1,227	1,257
1,45	1,41	1,35	1,174	1,168	1,227	1,220	1,235	1,265
1,50	1,45	1,43	1,177	1,175	1,233	1,230	1,242	1,276
1,55	1,53	1,49	1,185	1,181	1,243	1,238	1,255	1,285
1,60	1,57	1,54	1,188	1,185	1,248	1,244	1,262	1,292
1,65	1,61	1,55	1,192	1,186	1,253	1,246	1,268	1,294
1,70	1,65	1,58	1,195	1,189	1,259	1,250	1,275	1,298

В табл.3 представлены численные данные, характеризующие содержание БП в уходящих газах котла с ТШУ и ЖШУ для 6 вариантов влияния режимных параметров

подвода газов рециркуляции и первичный воздух горелочного устройства. В качестве варьируемых режимных параметров принимались различные сочетания коэффициента избытка воздуха в продуктах сгорания и долей газов рециркуляции. При расчетах концентраций, приведенных в табл. 3, содержание БП в дымовых газах не учитывалось. Получены результаты расчетного снижения концентрации БП при реализации природоохранных мероприятий на основе рециркуляции дымовых газов в схемах с твердым и жидким шлакоудалением.

Таблица 3

Содержание бенз(а)пирена в уходящих газах котлов с ТШУ и ЖШУ

$C_{\text{БП}}^{\text{ТШУ}}, \text{мкг/м}^3$					
$R = 0,1$ $\alpha_{\Gamma} = 1,2$ $\Delta\alpha_{\text{ВП}} = 0,03$	$R = 0,1$ $\alpha_{\Gamma} = 1,2$ $\Delta\alpha_{\text{ВП}} = 0,05$	$R = 0,15$ $\alpha_{\Gamma} = 1,2$ $\Delta\alpha_{\text{ВП}} = 0,03$	$R = 0,15$ $\alpha_{\Gamma} = 1,2$ $\Delta\alpha_{\text{ВП}} = 0,05$	$R = 0,2$ $\alpha_{\Gamma} = 1,2$ $\Delta\alpha_{\text{ВП}} = 0,03$	$R = 0,1$ $\alpha_{\Gamma} = 1,25$ $\Delta\alpha_{\text{ВП}} = 0,05$
1,704	1,707	1,697	1,692	1,702	1,596
1,692	1,697	1,679	1,669	1,687	1,577
1,682	1,687	1,664	1,649	1,669	1,555
1,669	1,674	1,647	1,627	1,654	1,537
1,657	1,662	1,632	1,596	1,637	1,519
1,647	1,652	1,615	1,577	1,622	1,498
1,634	1,639	1,600	1,555	1,605	1,480
$\Delta C_{\text{БП}}^{\text{ТШУ}}, \%$					
4,1	4,0	5,7	8,1	5,7	7,3
$C_{\text{БП}}^{\text{ЖШУ}}, \text{мкг/м}^3$					
$R = 0,1$ $\alpha_{\Gamma} = 1,15$ $\Delta\alpha_{\text{ВП}} = 0,04$	$R = 0,1$ $\alpha_{\Gamma} = 1,15$ $\Delta\alpha_{\text{ВП}} = 0,05$	$R = 0,15$ $\alpha_{\Gamma} = 1,2$ $\Delta\alpha_{\text{ВП}} = 0,04$	$R = 0,15$ $\alpha_{\Gamma} = 1,2$ $\Delta\alpha_{\text{ВП}} = 0,05$	$R = 0,2$ $\alpha_{\Gamma} = 1,2$ $\Delta\alpha_{\text{ВП}} = 0,04$	$R = 0,17$ $\alpha_{\Gamma} = 1,25$ $\Delta\alpha_{\text{ВП}} = 0,05$
1,030	1,033	0,948	0,960	0,939	0,898
1,017	1,027	0,939	0,950	0,929	0,888
1,013	1,016	0,932	0,935	0,919	0,873
1,001	1,007	0,917	0,925	0,901	0,861
0,997	1,001	0,911	0,917	0,892	0,852
0,991	0,999	0,904	0,914	0,884	0,849
0,987	0,995	0,896	0,908	0,874	0,844
$\Delta C_{\text{БП}}^{\text{ЖШУ}}, \%$					
4,3	3,7	5,5	5,4	6,9	6,0

Увеличение коэффициента избытка воздуха в диапазоне от 1,27 до 1,57 способствует снижению концентрации БП на 4,1%. Максимальный выход БП равный, 1,707 мкг/м³, соответствует режиму горения в топочной камере с ТШУ для $\alpha_{\Gamma} = 1,2$, $R = 0,1$. Минимальное содержание БП, равное 0,844 мкг/м³, наблюдается в процессе сжигания угля в топке с ЖШУ при $\alpha_{\Gamma} = 1,2$, $R = 0,15$.

На рис.1 показана схема рециркуляции дымовых газов в первичный воздух пылеугольного энергоблока с котлом ПК-37.

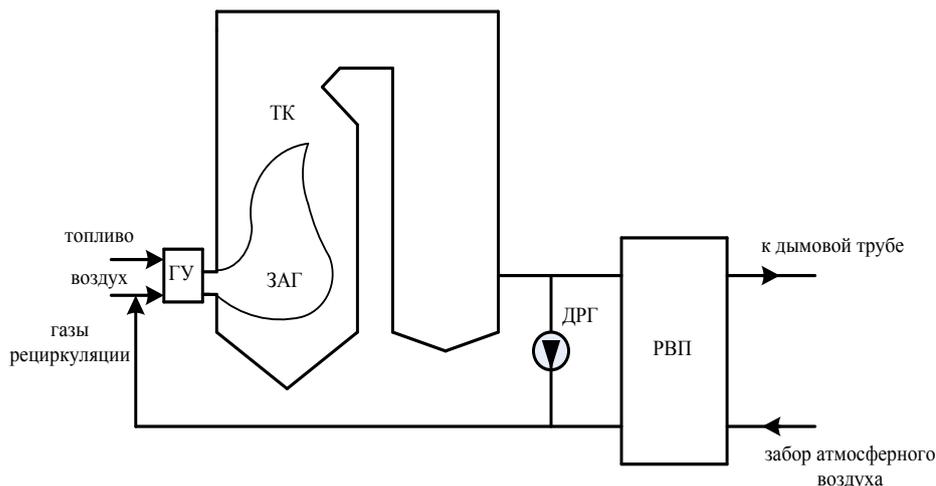


Рис. 1. Схема рециркуляции дымовых газов пылеугольного энергоблока с котлом ПК-37 в первичный воздух: ТК – топочная камера; ГУ – горелочное устройство; ДРГ – дымосос рециркулирующих газов; РВП – регенеративный воздухоподогреватель; ЗАГ – зона активного горения

Выбор оптимальной температуры рециркулирующих газов основан на допустимом уровне снижения температуры продуктов сгорания в зоне активного горения топочной камеры и перегретого пара. В условиях значимых долей подвода газов рециркуляции в первичный воздух (30% и более) температура в зоне активного горения понижается, что не позволяет обеспечить надежный уровень параметров вырабатываемого пара, приводит к увеличению механического недожога топлива и, как следствие, к повышению интенсивности шлакования, загрязнения амбразур горелок и конвективных поверхностей нагрева топочной камеры. Подвод газов рециркуляции в первичный воздух обеспечивает максимально эффективное смешивание уходящих газов и горячего воздуха, подаваемого в топку котла для сжигания топлива. Рециркуляция продуктов сгорания приводит к перестройке газового факела и значимому снижению его температуры, особенно для режимов рециркуляции $R \geq 35\%$. Поэтому определение оптимальной доли подвода рециркулирующих продуктов сгорания проводится экспериментально для условий, приведенных в режимной карте конкретного котла.

Анализ данных, полученных по результатам расчета, показывает, что увеличение доли рециркулирующих газов экспоненциально влияет на снижение выхода БП. Увеличение доли рециркуляции с 10 до 20 % способствует сокращению выбросов БП на 13 %. Отметим, что для диапазона от 10 до 15 % снижение выхода БП составляет 7 %, при изменении R от 15 до 20 % сокращение концентрации достигает 6 %. Таким образом, с увеличением доли подвода рециркулирующих газов интенсивность их влияния на сокращение выхода БП от пылеугольных котлов снижается.

На рис. 2 приведена диаграмма зависимости влияния варианта режимных параметров газов рециркуляции на степень снижения выхода БП в продуктах сгорания пылеугольного котла ПК-37. Данные представлены для вариантных типов конструкций нижней радиационной части и системы твердого (черный цвет) и жидкого (белый цвет) шлакоудаления.

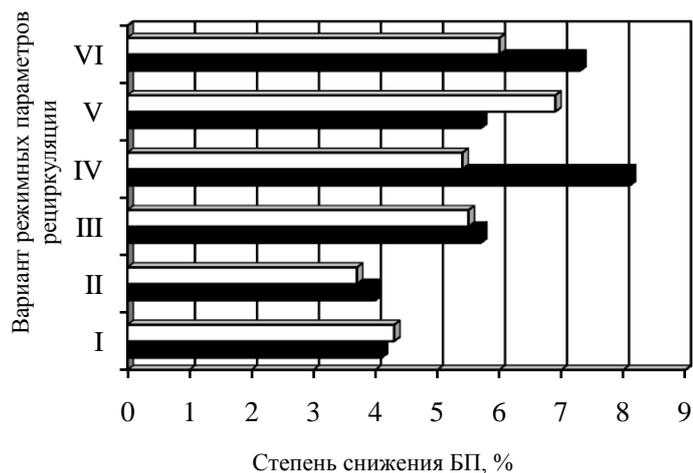


Рис. 2. Диаграмма степени снижения выхода БП в продуктах сгорания пылеугольного котла ПК-37 в зависимости от варианта режимных параметров газов рециркуляции

- I – $\alpha=1,206-1,234; R=0,1; \alpha_{\Gamma}=1,2; \Delta\alpha_{\text{ВП}}=0,03; \text{ТШУ};$
 $\alpha=1,169-1,195; R=0,1; \alpha_{\Gamma}=1,15; \Delta\alpha_{\text{ВП}}=0,03; \text{ЖШУ};$
- II – $\alpha=1,205-1,232; R=0,1; \alpha_{\Gamma}=1,2; \Delta\alpha_{\text{ВП}}=0,05; \text{ТШУ};$
 $\alpha=1,164-1,189; R=0,1; \alpha_{\Gamma}=1,15; \Delta\alpha_{\text{ВП}}=0,05; \text{ЖШУ};$
- III – $\alpha=1,209-1,248; R=0,15; \alpha_{\Gamma}=1,2; \Delta\alpha_{\text{ВП}}=0,03; \text{ТШУ};$
 $\alpha=1,221-1,259; R=0,15; \alpha_{\Gamma}=1,2; \Delta\alpha_{\text{ВП}}=0,03; \text{ЖШУ};$
- IV – $\alpha=1,207-1,246; R=0,15; \alpha_{\Gamma}=1,2; \Delta\alpha_{\text{ВП}}=0,05; \text{ТШУ};$
 $\alpha=1,213-1,250; R=0,15; \alpha_{\Gamma}=1,2; \Delta\alpha_{\text{ВП}}=0,05; \text{ЖШУ};$
- V – $\alpha=1,211-1,267; R=0,2; \alpha_{\Gamma}=1,2; \Delta\alpha_{\text{ВП}}=0,03; \text{ТШУ};$
 $\alpha=1,227-1,275; R=0,2; \alpha_{\Gamma}=1,2; \Delta\alpha_{\text{ВП}}=0,03; \text{ЖШУ};$
- VI – $\alpha=1,250-1,300; R=0,2; \alpha_{\Gamma}=1,25; \Delta\alpha_{\text{ВП}}=0,05; \text{ТШУ};$
 $\alpha=1,257-1,298; R=0,17; \alpha_{\Gamma}=1,25; \Delta\alpha_{\text{ВП}}=0,05; \text{ЖШУ};$

Обсуждение результатов

Проведенный анализ показал, что выбросы БП для различных соотношений доли рециркулирующих газов и концентраций кислорода в уходящих газах сокращаются во всем диапазоне исследуемых вариантов параметров. Максимальный выброс БП, равный 4,72 г/ч, наблюдается для варианта сжигания топлива в котле с ТШУ в режиме $\alpha_{\Gamma} = 1,2, R = 0,1$. Несмотря на незначительный массовый выход БП, продукты сгорания обладают высокой токсичностью вследствие его канцерогенной активности.

Необратимый теплообмен в ЗАГ приводит к значительному отбору тепла от факела к пылегазовоздушной смеси и способствует снижению его температуры. Наличие кислорода в рециркулирующих газах приводит к увеличению среднего избытка воздуха в топочной камере и, как следствие, сокращению выхода БП, что объясняется интенсификацией протекания химических реакций окисления углерода топлива, следовательно, приводит к более полному выгоранию угля, при этом затраты тепла на нагрев воздуха в ЗАГ не учитываются. Наиболее оптимальный диапазон температуры газов рециркуляции находится в пределах 350 – 400 °С при доле

рециркуляции не более 30%. Компонентный состав продуктов сгорания угля также влияет на расход рециркулирующих газов, особенно для высокосольного и влажного топлива. С ростом значений W и оптимальное значение доли газов рециркуляции снижается, что объясняется увеличением выхода золы и дополнительным расходом тепла факела на испарение влаги топлива, дополнительно способствует снижению температуры в ЗАГ и интенсификации процесса шлакования в нижней радиационной части топочной камеры при ЖШУ, а следовательно, показателей надежности пылеугольного котла.

Необходимость обеспечения температуры жидкого шлака не позволяет масштабно применять рециркуляцию продуктов сгорания для системного регулирования эксплуатационных параметров пылеугольного энергоблока. Отметим, что котлы с ТШУ, в сравнении с ЖШУ, обладают более высокими технико-экономическими показателями, в первую очередь за счет сокращения потерь тепла с физической теплотой шлаков.

Следует отметить, что рециркуляция газов в условиях горения топлива позволяет регулировать оптимальные режимы работы пылеугольного энергоблока в целях обеспечения экономичных вариантов и экологической безопасности функционирования ТЭС.

Выводы

Использование рециркуляции дымовых газов в схемах пылеугольных котлов в значительной степени позволяет регулировать температурный уровень факела и экологические показатели в отношении токсичных и канцерогенных выбросов от энергоустановки. В рассмотренных условиях применения рециркулирующих газов от 10 до 20 % максимальная степень снижения выхода БП составила 13%. При этом степень воздействия рециркулирующих газов на интенсивность образования БП в продуктах сгорания пылеугольных котлов в значительной мере ограничивается их температурой, количеством подвода и компонентным составом. Для систем твердоуголошлакоудаления рециркуляция используется в силу менее жестких ограничений по температуре шлакования в отличие от систем жидкого шлакоудаления.

Summary

The article shows the calculated data on the content of benz(a)pyrene in the emissions of coal-fired boilers, implementing the schematic of coal combustion with flue gas recirculation. In terms of changes in the share of recycling and the level of suction cold air the concentrations of benz(a)pyrene in exhaust gases. The data for the organization and normal functioning of coal-fired boilers with reliable slag and ash from the combustion chamber. Recommendations the choice of parameters of recirculating gases in order to ensure environmental safety of operation of coal power.

Keywords: recirculation of flue gases, benz (a)pyrene, coal-fired boiler.

Литература

1. Иваницкий М.С., Грига А.Д. Определение концентрации бенз(а)пирена в дымовых газах котельных установок и способ автоматического регулирования процесса горения // Энергосбережение и водоподготовка. 2013. №3(83). С.52–56.
2. Грига А.Д., Иваницкий М.С. Определение содержания бенз(а)пирена в дымовых газах котельных установок малой мощности // Альтернативная энергетика и экология. 2013. №14(136). С.67–70.

3.Иваницкий М.С., Грига А.Д. Определение предельно допустимых концентраций нитропроизводных полиароматических соединений, образующихся в топках котлов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013.№11-12. С.17–23.

4.Иваницкий М.С., Грига А.Д., Васильева Ю.В. Построение модели расчета концентрации бенз(а)пирена в дымовых газах энергетических котлов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2014. №5-6. С. 43–47.

5.Грига А.Д., Иваницкий М.С. Определение содержания бенз(а)пирена в уходящих газах камеры сгорания газовой турбины // Вестник Воронежского государственного технического университета. Серия «Энергетика». 2014. №10. Т.5. С.86–88.

6.Иваницкий М.С. Корреляционный анализ взаимного влияния оксидов азота, углерода и бенз(а)пирена на суммарную токсичность уходящих газов котлов. Часть 1. Энергетические котлы большой мощности // Альтернативная энергетика и экология. 2015. №17-18(181-182). С.138-142.

7.Иваницкий М.С. Суммарная токсичность продуктов сгорания при работе пылеугольных котлов ТЭЦ // Альтернативная энергетика и экология. 2015.№17-18(181-182). С.148-152.

8.ТумановскийА.Г., Ольховский Г.Г. Пути совершенствования угольных ТЭС России // Электрические станции. 2015. №1. С. 67–73.

9.РД 153-34. 1-02. 316-2003. Методика расчета выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций. Введ. 01.07.03. Москва, 2003. 4 с.

Поступила в редакцию

15 июля 2016 г.

Иваницкий Максим Сергеевич – канд. техн.наук., доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском.Тел.: 8(8443)21-01-60, 8(937)7259111.Е-mail: mseiv@yandex.ru.