



УДК 526.35

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО УРОВНЯ
В ЗОНЕ АКТИВНОГО ГОРЕНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА И
БЕНЗ(А)ПИРЕНА В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК
СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. ЧАСТЬ 2. ГОРЕНИЕ МАЗУТА
В ВОДОГРЕЙНОМ КОТЛЕ КВ-ГМ-100(116,3/150)**

М.С. Иваницкий

**Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ»,
в г. Волжском, Россия
mseiv@yandex.ru**

Резюме: В статье представлены расчетные экологические показатели котла КВ-ГМ-100 (116,3/150), сжигающего высокосернистый мазут, полученные на основе моделирования характеристик топочного процесса. Выполнен анализ влияния времени пребывания продуктов сгорания в топке, среднеинтегральной температуры в зоне активного горения, адиабатической температуры горения топлива на интенсивность образования оксидов азота и бенз(а)пирена в уходящих газах. Получены новые математические зависимости для расчета концентраций токсичных компонентов дымовых газов на основе температурных и временных параметров топочного процесса и продуктов сгорания мазута.

Ключевые слова: высокосернистый мазут, горение, бенз(а)пирен.

**MODELING THE IMPACT OF TEMPERATURE LEVEL IN THE ZONE OF ACTIVE
COMBUSTION IN THE CONTENTS OF NITROGEN OXIDES AND BENZ(A)PYRENE
IN THE COMBUSTION PRODUCTS OF BOILER PLANTS HEATING SYSTEMS.
PART 2. BURNING OIL HOT WATER BOILER KV-GM-100(116,3/150)**

M.S. Ivanitskiy

**Volzhsky Branch of the National Research University
«Moscow Power Engineering Institute», Volzhsky, Russia
mseiv@yandex.ru**

Abstract: The article presents the estimated environmental performance of the boiler KV-GM-100 (116,3/150) burning high-sulphur oil received on the basis of modeling of characteristics of the combustion process. The analysis of the influence of the residence time of combustion products in the furnace, the average integral temperature in the zone of active combustion, the adiabatic combustion temperature of the fuel on the intensity of the formation of nitrogen oxides and benzpyrene in flue gases. The resulting new mathematical dependences for calculation of the concentrations of toxic components of flue gases based on temperature and time parameters of the combustion process and combustion products of fuel oil.

Keywords: high-sulphur fuel oil, combustion, benzpyrene.

Введение

Сжигание мазута в котлах систем теплоснабжения городов способствует образованию в продуктах сгорания оксидов азота, серы, углерода и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Повышение эффективности сжигания мазута в топочных камерах котлов, в том числе, основано на определении механизмов и степени воздействия режимных мероприятий на температурный уровень в зоне активного горения (ЗАГ). В зависимости от рабочего состава топочных мазутов и температурных характеристик работы камеры сжигания котла концентрацию оксидов азота (NO_2) и бенз(а)пирена (БП) в продуктах сгорания определяют на основе нормативных расчетных методик и моделирования процессов сжигания топлива, экспериментальной индикацией с помощью портативных газоанализаторов, газовых и жидкостных хроматографов [1÷3].

Результаты оптимизации режимов работы и исследования схем сжигания мазута на котлах различной мощности с использованием механических и других типов форсунок с учетом обеспечения экологических показателей представлены в работах [4÷7]. При этом практически отсутствуют данные об уровне и характере совместного изменения выбросов оксидов азота, серы и БП при сжигании высокосернистого мазута в энергетических котлах.

Определение эффективности сжигания высокосернистого мазута в системах теплоснабжения г. Волжского и исследование уровня выбросов NO_2 , сернистого ангидрида (SO_2) и БП в атмосферу городских и прилегающих территорий выполнено на основе моделирования режимов работы водогрейного газомазутного котла КВ-ГМ-100(116,3/150) Волжской ТЭЦ Волжского производственного подразделения ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоградэнерго».

Численное моделирование

Температура на выходе из зоны активного горения $T_{\text{заг}}$, К находилась методом последовательных приближений (предварительно принимая $T_{\text{ад}}$ в пределах 1300–2100 К) по выражению [8]

$$T_{\text{заг}} = T_{\text{ад}} \frac{\text{Bo}^{0,6}}{\text{Bo}^{0,6} + M\text{Вд}^{0,3}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{ад}}$ – адиабатическая температура горения мазута, К; Bo – критерий радиационного теплообмена Больцмана; M – параметр, учитывающий влияние на интенсивность теплообмена относительного уровня расположения горелок, степени забалластированности топочных газов (для газомазутных котлов, принимается 0,4).

Критерий радиационного теплообмена Больцмана рассчитывался по известной формуле [8]

$$\text{Bo} = \frac{10^{11} \phi B_p (Vc)_r}{5,67 \psi F \varepsilon_T T_{\text{ад}}^3}, \quad (2)$$

здесь $5,67 \cdot 10^{-11}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, кВт/(м²·К⁴); ϕ – коэффициент сохранения тепла; B_p расчетный расход мазута, кг/с; $(Vc)_r$ – суммарная теплоемкость продуктов сгорания 1 кг топлива, МДж/(кг °С); ψF – произведение коэффициента эффективности экранов на суммарную поверхность, ограничивающую ЗАГ, м²; ε_T – коэффициент теплового излучения топки в ЗАГ.

Критерий радиационного теплообмена Больцмана также определялся на основе безразмерной температуры продуктов сгорания на выходе из топочной камеры и параметра – M , учитывающего влияние на интенсивность теплообмена относительного уровня расположения горелок, степени забалластированности топочных газов, по уточненному выражению

$$Bo = \left(\frac{M}{\Theta^{-1} - 1} \right)^{5/3}, \quad (3)$$

где Θ – безразмерная температура продуктов сгорания на выходе из топочной камеры котла.

На рис. 1 показана зависимость изменения безразмерной температуры на выходе из топки Θ – от критерия радиационного теплообмена Больцмана Bo .

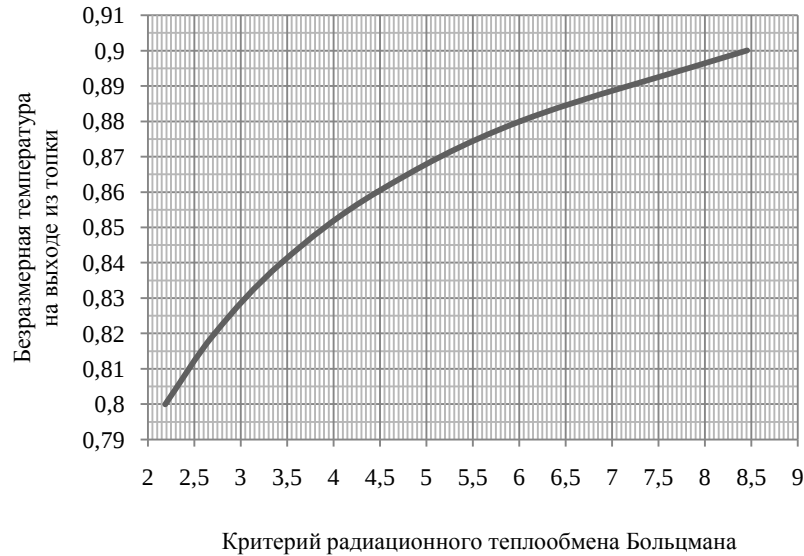


Рис. 1. Зависимость безразмерной температуры на выходе из топки Θ от критерия радиационного теплообмена Больцмана Bo

Анализ рис. 1 показал, что безразмерная температура на выходе из топки котла существенно влияет на интенсивность радиационного теплообмена в камере сгорания котла. В пределах изменения $\Theta = 0,8 \div 0,9$ уровень теплообмена в топочном устройстве повышается в 4 раза, что подтверждает важность учета характеристик ЗАГ в целях обеспечения эффективной организации процесса сжигания топлива.

Эффективное значение критерия поглощательной способности Бугера $B\tilde{u}$ определялось по формуле [8]

$$B\tilde{u} = 1,6 \ln \left(\frac{1,4Bu^2 + Bu + 2}{1,4Bu^2 - Bu + 2} \right), \quad (4)$$

где $Bu = kps$ – критерий поглощательной способности Бугера; k – коэффициент поглощения топочной среды, $1/(м \cdot МПа)$; p – давление в топочной камере, МПа; s – эффективная толщина излучающего слоя, м.

Концентрация оксидов азота в продуктах сгорания мазута для водогрейных котлов учитывает среднеинтегральную температуру $\bar{T}_{заг}$, коэффициент избытка воздуха $\alpha_{заг}$, время пребывания продуктов сгорания в ЗАГ $\tau_{заг}$, топливный азот $\Delta NO_2^{ТПЛ}$ и рассчитывалась по методике [9]. Расчет содержания БП в продуктах сгорания малозольного мазута выполнялся по отраслевой методике [10].

Рабочий состав высокосернистого мазута, принятый для режимного моделирования топочного процесса, соответствует ГОСТ 10585-2013: $W=0,3\%$, $A=0,048\%$, $S=2,76\%$, $C=84\%$, $H=11,1\%$, $O=2\%$, $N=0,7\%$, теплотворная способность мазута 40,086 МДж/кг,

содержание сероводорода H_2S не более 4,8 ppm. Технические характеристики для моделирования топочного процесса в номинальном режиме: расход топлива на котел $B_p = 3,1 \text{ кг/с}$; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,01 \div 1,06$; присосы холодного воздуха $\Delta\alpha = 0,08$; температура мазута, подаваемого в топку, равна 115°C ; теплота, вносимая в топочную камеру с воздухом $Q_{\text{возд}} = 0,431 \text{ МДж/кг}$; суммарная теплоемкость продуктов сгорания мазута $(Vc)_r = 7,72 \cdot 10^{-3} \text{ МДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$.

Расчетные концентрации NO_2 , SO_2 , БП в дымовых газах и характеристические температуры в ЗАГ котла КВ-ГМ-100(116,3/150), сжигающего малозольный мазут, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Концентрация NO_2 , SO_2 , БП в дымовых газах водогрейного котла

КВ-ГМ-100(116,3/150)

Параметр / тип котла	Водогрейный, газомазутный					
Коэффициент избытка воздуха, α	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06
Концентрация NO_2 в уходящих газах, мг/м^3	209	219	221	232	238	245
Концентрация БП в уходящих газах, мкг/м^3	124	120	116	112	108	104
Концентрация SO_2 в уходящих газах, мг/м^3	2957	2903	2851	2800	2752	2705
Среднеинтегральная температура в зоне активного горения, $\bar{T}_{\text{заг}}$, К	1885	1906	1909	1929	1940	1951
Адиабатическая температура горения мазута, $T_{\text{ад}}$, К	2170	2194	2220	2233	2245	2267
Температура на выходе из зоны активного горения, $T_{\text{заг}}$, К	1281	1289	1293	1300	1306	1311
Время пребывания газов в топке, $\tau_{\text{заг}}$, с	1,049	1,027	1,016	0,995	0,980	0,966

На рис. 2 показана зависимость изменения удельного выхода БП в уходящих газах котла КВ-ГМ-100(116,3/150) от удельного содержания NO_2 в выходном сечении топочного устройства. Анализ рис. 2 позволил сделать вывод, что для горения высокосернистого мазута в результате увеличения α от 1,01 до 1,06 концентрация NO_2 в уходящих газах повышается на 14,7% до значения 245 мг/м^3 . Увеличение концентрации БП в уходящих газах на 1% приводит к сокращению содержания NO_2 в продуктах сгорания на 0,92%.

В ходе расчетных исследований установлено, что концентрация SO_2 в продуктах сгорания мазута значительно (на 26,0–32,3%) превышает нормативные выбросы, ограниченные для котлов, сжигающих мазут, значением 2000 мг/м^3 , что в удельных показателях составляет $0,875 \text{ г/МДж}$ для котлоагрегатов, введенных в эксплуатацию до 31 декабря 2000 года. Содержание сернистого ангидрида при $\alpha = 1,04$ составляет 2800 мг/м^3 , повышение коэффициента избытка воздуха от 1,01 до 1,06 приводит к снижению концентрации SO_2 в уходящих газах на 8,5%. По результатам экспериментальных замеров температура уходящих газов составила 180°C на номинальном режиме работы, при этом объемная концентрация сернистого ангидрида соответствовала 0,0923%. Расчетная температура точки росы для концентрации $\text{SO}_3 = 0,00369\%$ равна 155°C . Приземная концентрация сернистого ангидрида в районе санитарно-защитной зоны электростанции

при работе одного котла КВ-ГМ-100(116,3/150) составила не более $0,016 \text{ мг/м}^3$. Очистка уходящих газов от соединений серы в технологическом процессе не осуществлялась.

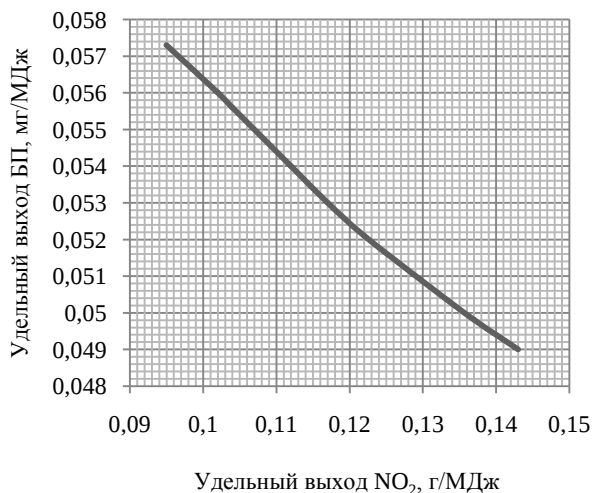


Рис. 2. Удельный выход БП в зависимости от удельного содержания NO_2 в уходящих газах

Обработка полученных результатов моделирования топочных процессов позволила установить функциональную зависимость $K_{\text{БП}} = f(K_{\text{NO}_2})$ (рис. 2) и аппроксимировать её

полиномом 4-й степени с коэффициентом корреляции $R^2 = 1$ в виде выражения

$$K_{\text{БП}} = -1018K_{\text{NO}_2}^4 + 501K_{\text{NO}_2}^3 - 90,87K_{\text{NO}_2}^2 + 7,025K_{\text{NO}_2} - 0,136. \quad (5)$$

Зависимость концентрации соединений БП в продуктах сгорания мазута от относительной тепловой производительности котла КВ-ГМ-100 (116,3/150) показана на рис. 3. Максимальный выход компонентов БП, равный 240 мкг/м^3 , характеризует номинальный режим работы котла, минимальная концентрация БП в уходящих газах составляет 104 мкг/м^3 .

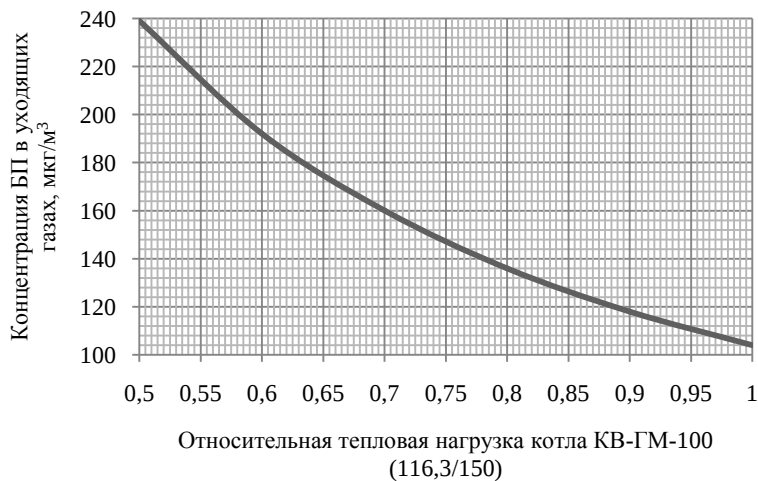


Рис. 3. Концентрация БП в уходящих газах котла КВ-ГМ-100 (116,3/150) в зависимости от относительной тепловой нагрузки

На граф. 2÷5 показаны результаты моделирования режимных характеристик топочного процесса водогрейного котла КВ-ГМ-100 (116,3/150).

Увеличение относительной тепловой нагрузки водогрейного котла положительно влияет на сокращение выхода БП. В условиях повышения тепловой мощности от $0,5\bar{Q}$ до $\bar{Q}$ концентрация БП в дымовых газах снизилась в 2,4 раза (табл. 2).

Таблица 2

Режимные характеристики топочного процесса водогрейного котла
КВ-ГМ-100(116,3/150)

Параметр / тип котла	Водогрейный, газомазутный				
Относительная тепловая нагрузка, $\bar{Q}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Отраженный тепловой поток, $q_{\text{заг}}^{\text{отр}}$, МВт / м ²	0,103	0,124	0,145	0,165	0,186
Удельный выход NO_2 , K_{NO_2} , г/МДж	0,067	0,077	0,088	0,099	0,111
Концентрация NO_2 в уходящих газах, мг/м ³	134	155	177	199	222
Удельный выход БП, $K_{\text{БП}}$, мг/МДж	0,119	0,096	0,080	0,068	0,059
Температура на выходе из зоны активного горения, $T_{\text{заг}}$, К	1105	1156	1201	1241	1278

Эксплуатация котельного оборудования на номинальной нагрузке способствует качественному процессу смесеобразования и, как следствие, более полному выгоранию топлива, что непосредственно влияет на уменьшение выбросов БП в продуктах сгорания (рис. 3).

По результатам обработки полученных результатов моделирования топочных характеристик графическая зависимость $C_{\text{БП}} = f(\bar{Q})$ (рис. 3) была аппроксимирована степенной функцией с коэффициентом корреляции $R^2 = 1$:

$$C_{\text{БП}} = 104 \cdot \bar{Q}^{-1,2}. \quad (6)$$

На рис. 4 показана зависимость влияния отраженного теплового потока на время пребывания продуктов сгорания в ЗАГ топочной камеры котла КВ-ГМ-100 (116,3/150).

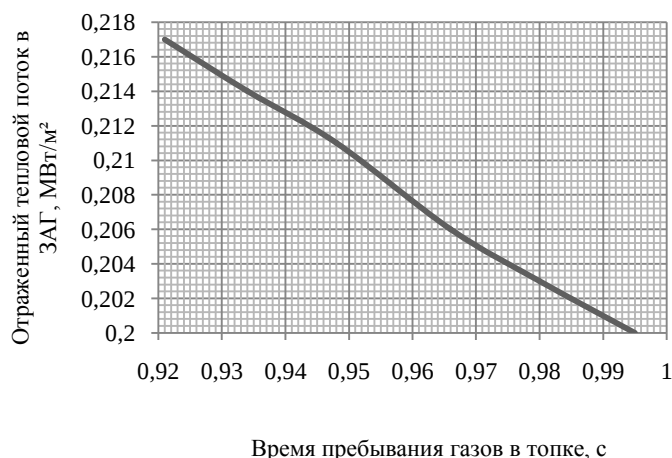


Рис. 4. Влияние отраженного теплового потока на время пребывания продуктов сгорания в ЗАГ топочной камеры котла

Затягивание процесса горения мазута позволяет снизить содержание NO_2 в уходящих газах. Уменьшение теплового потока в ЗАГ на 1% повышает время пребывания газов в топочной камере на 10 мс. Режимное регулирование выбросов оксидов азота и БП связано с подводом в топочную камеру (отводом из камеры) дополнительной энергии от предварительного подогрева мазута (частичное или полное предварительное смесеобразование), рециркуляции продуктов сгорания, впрыска в топочную камеру влаги в виде жидкости или пара. Установлено, что значимый уровень сокращения загрязняющих атмосферу веществ достигается за счет использования режимов, основанных на прямом или косвенном воздействии на температуру в ЗАГ котла, при этом достигается снижение концентрации БП в продуктах сгорания в 2–5 раз.

Зависимость удельного выхода оксидов азота от отраженного теплового потока в ЗАГ показан на рис. 5.

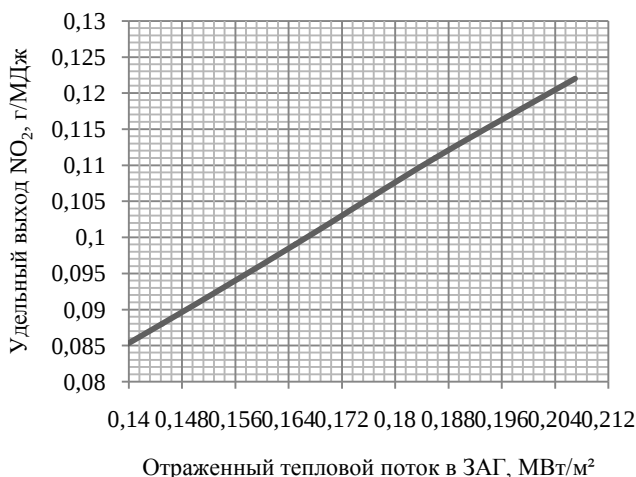


Рис. 5. Удельный выход оксидов азота в зависимости от отраженного теплового потока в ЗАГ

Увеличение отраженного теплового потока в ЗАГ в диапазоне от 0,140 до 0,207 МВт/м² привело к повышению удельного выхода NO_2 на 30,3%, что объясняется ростом тепловыделения в топочной камере и интенсивности образования термических оксидов азота. Максимальный тепловой поток характеризовался в данных условиях номинальным режимом работы водогрейного котла.

Выводы

Определена среднеинтегральная температура дымовых газов в ЗАГ и адиабатная температура горения мазута в топочном процессе водогрейного котла КВ-ГМ-100 (116,3/150) в пределах эксплуатационных режимных нагрузок. Показано, что в условиях увеличения температуры в зоне активного горения топки котла содержание БП в продуктах сгорания мазута снижается, что объясняется повышением общего уровня тепловыделения и полноты выгорания мазута в топочной камере.

Установлена упрощенная математическая зависимость для расчета критерия Больцмана Bo с учетом безразмерной температуры топочных газов на выходе из котла Θ и относительного положения факела по высоте топочной камеры M .

Получены новые данные о содержании в продуктах сгорания водогрейных котлов ПАУ, представленных бенз(а)пиреном, для разработки малоэмиссионных режимов работы и составления на их основе режимных карт эксплуатации энергоустановок.

По результатам обработки результатов численного эксперимента установлены зависимости содержания БП в уходящих газах от удельного выхода оксидов азота и

тепловой нагрузки энергоустановки, пригодные в процессе эксплуатации водогрейных котельных установок для проведения пуско-наладочных мероприятий и настройки режимов эффективного сжигания топлива.

Литература

1. Липов Ю.М., Самойлов Ю.Ф., Виленский Т.В. Компоновка и тепловой расчет парового котла: учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 298 с.: ил.
2. Иваницкий М.С., Грига А.Д., Фокин В.М. и др. Физико-химические процессы механизмов образования бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 27 (46). С. 28–33.
3. Иваницкий М.С., Грига А.Д., Грига С.А. и др. Построение модели для определения концентрации бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива в котельных установках систем теплоснабжения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 28 (47). С. 143–150.
4. Зройчиков Н.А., Лысков М.Г., Прохоров В.Б. и др. Оптимизация режимов сжигания мазута в топках котлов большой мощности // Теплоэнергетика. 2007. № 6. С. 23–26.
5. Таймаров М.А., Егоров В.А. Исследование схем сжигания мазута на котле ТГМ-84Б с использованием механических форсунок // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 10. С. 96–97.
6. Таймаров М.А., Кувшинов Н.Е., Чикляев Д.Е. и др. Регулирование выбросов окислов азота при сжигании мазута в котлах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 3–4. С. 40–44.
7. Тугов А.Н., Супранов В.М., Изюмов М.А. и др. Оценка возможности перевода котлов ТП-108 на сжигание природного газа и мазута // Теплоэнергетика. 2017. № 3. С. 68–76. DOI: 10.1134/S0040363617030092
8. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание третье, переработанное и дополненное. Санкт-Петербург. 1998. 257 с.
9. РД 153-34. 02. 304-2003. Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций. М.: ОАО «ВТИ». 2003.
10. РД 153-34. 1-02. 316-2003. Методика расчета выбросов бенз(а)пирена в атмосферу паровыми котлами электростанций. М.: ОАО «ВТИ». 2003.

Автор публикации

Иваницкий Максим Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика и теплотехника» филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: mseiv@yandex.ru

References

1. Lipov Ju.M., Samojlov Ju.F., Vilenskij T.V. Komponovka i teplovoj raschet parovogo kotla. Uchebnoe posobie dlja vuzov. M.: Jenergoatomizdat, 1988. 298 p.: il.
2. Ivanickij M.S., Griga A.D., Fokin V.M. i dr. Fiziko-himicheskie processy mehanizmov obrazovanija benz(a)pirena pri szhiganii uglevodorodnogo topliva. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitektarno-stroitel'nogo universiteta. 2012. No. 27 (46). P. 28–33.
3. Ivanickij M.S., Griga A.D., Griga S.A. i dr. Postroenie modeli dlja opredelenija koncentracii benz(a)pirena pri szhiganii uglevodorodnogo topliva v kotel'nyh ustanovkah sistem teplosnabzhenija. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitektarno-stroitel'nogo universiteta. 2012. No. 28 (47). P. 143. 150.
4. Zrojchikov N.A., Lyskov M.G., Prohorov V.B. i dr. Optimizacija rezhimov szhiganiya mazuta v topkakh kotlov bol'shoj moshhnosti. Teplojenergetika. 2007. No. 6. P. 23–26.

5. Tajmarov M.A., Egorov V.A. Issledovanie shem szhiganiya mazuta na kotle TGM-84B s ispol'zovaniem mehanicheskikh forsunok // Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta. 2012. V. 15. No. 10. P. 96–97.

6. Tajmarov M.A., Kuvshinov N.E., Chikljaev D.E. i dr. Regulirovanie vybrosov okislov azota pri szhiganii mazuta v kotlah. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki. 2016. No. 3-4. P. 40–44.

7. Tugov A.N., Supranov V.M., Izjumov M.A. i dr. Ocenka vozmozhnosti perevoda kotlov TP-108 na szhiganie prirodnogo gaza i mazuta. Teplojenergetika. 2017. No. 3. P. 68–76. DOI: 10.1134/S0040363617030092.

8. Teplovoj raschet kotlov (Normativnyj metod). Izdanie tret'e, pererabotannoe i dopolnennoe. Sankt-Peterburg. 1998. 257 p.

9. RD 153-34. 02. 304-2003. Metodicheskie ukazaniya po raschetu vybrosov oksidov azota s dymovymi gazami kotlov teplovyh jelektrostantsij. M.: OAO «VTI». 2003.

10. RD 153-34. 1-02. 316-2003. Metodika rascheta vybrosov benzpirena v atmosferu parovymi kotlami jelektrostantsij. M.: OAO «VTI». 2003.

Author of the publication

Maxim S. Ivanitskiy – Cand. Sci. (Techn.), Assoc. prof. of the department “Heat and power engineering and thermal engineering” (HPETE), Branch of the National Research University “Moscow Power Engineering Institute” (MPEI).

Поступила в редакцию

24 июля 2017 г.