

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО УРОВНЯ В ЗОНЕ АКТИВНОГО ГОРЕНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА И БЕНЗ(А)ПИРЕНА В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. ЧАСТЬ 1. СЖИГАНИЕ КРЕКИНГ-МАЗУТА В ПАРОВОМ КОТЛЕ БКЗ-420-140 НГМ

М.С. Иваницкий

Национальный исследовательский университет «МЭИ» в г. Волжском, Россия
mseiv@yandex.ru

***Резюме:** В статье представлены результаты численного моделирования влияния температурного уровня в зоне активного горения на содержание оксидов азота и бенз(а)пирена в продуктах сгорания крекинг-мазута для котла БКЗ-420-140 НГМ, работающего под наддувом. Получены важные характеристики топочного процесса для регулирования удельного выхода токсичных веществ в дымовых газах. Обработка полученных результатов моделирования позволила получить новые математические соотношения для расчета концентрации бенз(а)пирена в уходящих газах косвенным способом на основе содержания оксидов азота в продуктах сгорания. Разработанные математические соотношения могут применяться в практике проведения пуско-наладочных мероприятий для настройки режимов работы котельных установок с минимальными выбросами вредных соединений в атмосферу.*

***Ключевые слова:** крекинг-мазут, системы теплоснабжения, выбросы бенз(а)пирена.*

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 1. BURNING CRACKED FUEL OIL IN A STEAM BOILER BKZ-420-140 NGM

M.S. Ivanitskiy

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

***Abstract:** The article presents the results of numerical simulation of the influence of the temperature level in the zone of active combustion in the contents of nitrogen oxides and benz(a)pyrene in the combustion products of cracking of fuel oil for the boiler BKZ-420-140 NGM operating under boost. Obtained important characteristics of the combustion process for regulation of the specific release of toxic substances in flue gases. Processing of the obtained simulation results allowed us to obtain new mathematical correlations to calculate the concentration of benz(a)pyrene in exhaust gases in an indirect way based on the content of nitrogen oxides in the combustion products. Developed mathematical relationships can be used in the practice of commissioning actions for configuration of operating modes of boiler plants with minimal emissions of harmful compounds into the atmosphere.*

Key words: *cracked fuel oil, district heating system, the emissions of benz(a)pyrene.*

Введение

В условиях сжигания органического топлива в котлах на тепловых электрических станциях (ТЭС) образуются токсичные продукты сгорания. Известно, что основными марками используемых мазутов на отечественных станциях являются топочные продукты М40 и М100. В последнее время для снижения финансовых издержек производства тепловой и электрической энергии генерирующие компании стремятся снизить расход топлива. Одним из возможных вариантов сбережения является применение более калорийного и дешевого топлива. Приведенный вариант характеризуется непроектным и требует дополнительного обоснования в части обеспечения заданных режимных параметров, экологических показателей работы и предельно допустимых концентраций (ПДК) токсичных соединений в воздухе атмосферы при рассеивании выбросов котельных установок [1–4].

Улучшение топочного процесса в газомазутных котлах организуется использованием малоэмиссионных форсунок и горелочных устройств, регулированием вредных выбросов технологическими первичными мероприятиями, основанными на оптимизации подачи вторичного, третичного воздуха, газов рециркуляции, нестехиометрического горения топлива [5–7]. Данные о влиянии температурных параметров на концентрацию бенз(а)пирена (БП) в уходящих газах энергетических котлов практически отсутствуют, что обуславливает актуальность настоящего исследования.

Для определения возможности использования крекинг-мазута на электростанции с учетом снижения уровня выбросов оксидов азота (NO_2) и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), представленных бенз(а)пиреном, в атмосферу выполнено моделирование режимов загрузки газомазутного котла БКЗ-420-140 НГМ Волжской ТЭЦ-2 Волжского производственного подразделения ООО «ЛУКОЙЛ-Волгоградэнерго».

Численное исследование и моделирование

Концентрация оксидов азота, $\text{NO}_2^M, \text{г/м}^3$, в продуктах сгорания мазута рассчитывалась по выражению [8]

$$\begin{aligned} \text{NO}_2^M = & 2,05 \times 10^{-3} K_{\Gamma} \left\{ \left(24,3 \times \exp \left(0,19 \times \frac{\bar{T}_{\text{заг}} - 1650}{100} \right) - 12,3 \right) \times \left(\exp \left(q_{\text{заг}}^{\text{отр}} \right) - 1 \right) \times \right. \\ & \times \left(15,1 - 131,7 (\alpha_{\text{заг}} - 1,09)^4 + 72,3 (\alpha_{\text{заг}} - 1,09)^3 + 73,0 (\alpha_{\text{заг}} - 1,09)^2 + 2,8 (\alpha_{\text{заг}} - 1,09) \right) \times \tau_{\text{заг}} + \\ & \left. + \Delta \text{NO}_2^{\text{ПДК}} \right\}, \end{aligned} \quad (1)$$

где K_{Γ} – коэффициент, характеризующий конструкцию горелочного устройства; $\bar{T}_{\text{заг}}$ – среднеинтегральная температура продуктов сгорания в зоне активного горения (ЗАГ), К; $q_{\text{заг}}^{\text{отр}}$ – отраженный тепловой поток в ЗАГ, МВт/м^2 ; α – коэффициент избытка воздуха; $\tau_{\text{заг}}$ – время пребывания продуктов сгорания в ЗАГ; $\Delta \text{NO}_2^{\text{ПДК}}$ – слагаемое, учитывающее количество топливных оксидов азота.

Температура на выходе из зоны активного горения $T_{\text{заг}}$, К, находилась методом последовательных приближений по уточненному выражению [9]:

$$T_{\text{заг}} = \frac{T_{\text{ад}}}{1 + M\tilde{W}^{0,3} \left(\frac{C_0 \Psi F \varepsilon_{\text{T}} T_{\text{ад}}^3}{\Phi B_{\text{p}} (V_{\text{c}})_{\Gamma}} \right)^{0,6}}, \quad (1)$$

или в безразмерной форме:

$$\Theta^{-1} = M\tilde{W}^{0,3} \left(\frac{1}{\text{Bo}} \right)^{0,6} + 1, \quad (2)$$

где $T_{\text{ад}}$ – адиабатическая температура горения крекинг-мазута, К; M – параметр, учитывающий влияние на интенсивность теплообмена относительного уровня расположения горелок, степени забалластированности топочных газов; \tilde{W} – эффективное значение критерия поглощательной способности Бугера; $C_0 = 5,67 \times 10^{-11}$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, кВт/(м²·К⁴); ΨF – произведение коэффициента эффективности экранов на суммарную поверхность, ограничивающую ЗАГ, м²; ε_m – коэффициент теплового излучения топки в ЗАГ; Φ – коэффициент сохранения тепла; B_{p} – расчетный расход топлива, кг/с; $(V_{\text{c}})_{\Gamma}$ – суммарная теплоемкость продуктов сгорания 1 кг топлива, МДж/(кг·°С); Θ – безразмерная температура уходящих газов на выходе из топки; Bo – критерий радиационного теплообмена Больцмана.

Горючие характеристики крекинг-мазута, соответствующие СТО 001 48599-023-2010, равны: W=3,0%, A=0,3%, S=1,2%, C=81,2%, H=11,1%, O+N=3,2%, теплотворная способность топлива 41,22 МДж/кг.

В процессе моделирования рассмотрены различные нагрузки котла с реализацией режимно-технологических мероприятий по ограничению выбросов NO₂ и БП посредством использования рециркуляции продуктов сгорания и подвода пара в топочную камеру котла. Определение концентраций NO₂ и БП в уходящих газах котлоагрегата выполнялось в соответствии с нормативными документами [8, 10]. Расчетные значения удельного выхода оксидов азота и БП в дымовых газах котла БКЗ-420-140 НГМ представлены в табл. 1. Показатели, приведенные в табл. 1 через дробь рассчитывались в условиях использования доли газов рециркуляции $R=10\%$, степени парового распыла $g=0$.

Полученные результаты, представленные в табл.1, характеризовали значимую степень воздействия рециркуляции продуктов сгорания и парового распыла мазута. Для режима работы котла с $\alpha=1,06$, концентрация NO₂ в уходящих газах снизилась на 33,4 %, при дальнейшем росте до $\alpha=1,15$ общая степень уменьшения выхода оксидов азота составила 32%.

На рис. 1–4 показаны результаты моделирования режимных характеристик топочного процесса парового котла БКЗ-420-140 НГМ для параметров степени рециркуляции газов $R=0-10\%$, паротопливного соотношения $g=0-0,05$, коэффициента избытка воздуха в топке $\alpha=1,01-1,15$, относительной паровой нагрузки $\bar{D}=0,5-1,0$, что в абсолютных значениях составляет от 210 до 420 т/ч.

Удельный выход NO_2 и БП в дымовых газах парового котла БКЗ-420-140 НГМ в условиях доли газов рециркуляции $R=10\%$ и парового распыла $g = 0,03$

Параметр / тип котла	Газомазутный, под наддувом					
	1,04	1,06	1,08	1,10	1,12	1,15
Коэффициент избытка воздуха, α	1,04	1,06	1,08	1,10	1,12	1,15
Объем мокрых продуктов сгорания, $\text{м}^3 / \text{кг}$	11,55/ 9,94	11,75/ 10,13	11,96/ 10,34	12,15/ 10,54	12,36/ 10,75	12,66/ 10,95
Концентрация NO_2 в уходящих газах, $\text{мг}/\text{м}^3$	284/ 428	269/ 404	256/ 382	245/ 363	234/ 346	221/ 325
Удельный выход NO_2 , K_{NO_2} , $\text{мг}/\text{МДж}$	1,220/ 1,855	1,180/ 1,778	1,140/ 1,712	1,110/ 1,655	1,090/ 1,605	1,050/ 1,543
Концентрация БП в уходящих газах, $\text{мкг}/\text{м}^3$	0,382/ 0,202	0,231/ 0,159	0,141/ 0,097	0,085/ 0,059	0,052/ 0,036	0,024/ 0,017
Удельный выход БП, $K_{\text{БП}}$, (10^4), $\text{нг}/\text{МДж}$	11,490	7,212	4,519	2,828	1,769	0,873
Среднеинтегральная температура в зоне активного горения, $\bar{T}_{\text{заг}}$, К	1767/ 1961	1745/ 1933	1723/ 1906	1702/ 1879	1682/ 1854	1652/ 1817
Адиабатическая температура горения крекинг-мазута, $T_{\text{ад}}$, К	2034/ 2257	2008/ 2225	1983/ 2193	1959/ 2163	1935/ 2133	1902/ 2091
Время пребывания газов в топке, $\tau_{\text{заг}}$, с	1,192/ 1,074	1,187/ 1,072	1,182/ 1,069	1,178/ 1,067	1,173/ 1,065	1,166/ 1,061

Обсуждение результатов

На рис. 1 показана зависимость удельного выхода БП в уходящих газах котла БКЗ-420-140 НГМ от времени пребывания газов в топочном устройстве.

Анализ рис. 1 показал, что для исследуемых условий горения крекинг-мазута в результате увеличения $\tau_{\text{заг}}$ от 1,073 до 2,146 с выход БП в продуктах сгорания снизился на 27,8 % и равен $6,576 \cdot 10^{-4}$ $\text{нг}/\text{МДж}$.

Обработка полученных результатов позволила аппроксимировать графическую зависимость $K_{\text{БП}} = f(\tau_{\text{заг}})$, приведенную на рис. 1, степенной функцией с коэффициентом корреляции $R^2 = 1$ вида

$$K_{\text{БП}} = 9,414\tau_{\text{заг}}^{-0,47}. \quad (3)$$

Рост $\tau_{\text{заг}}$ в топке котла способствовал уменьшению содержания БП в уходящих газах на 0,55 %. Максимальный отраженный тепловой поток в ЗАГ $q_{\text{заг}}^{\text{отр}}$ составил 0,287 $\text{МВт}/\text{м}^2$, для номинального режима работы котла, в условиях нагрузки котлоагрегата, равной $\bar{D} = 0,5$, не более 0,144 $\text{МВт}/\text{м}^2$.

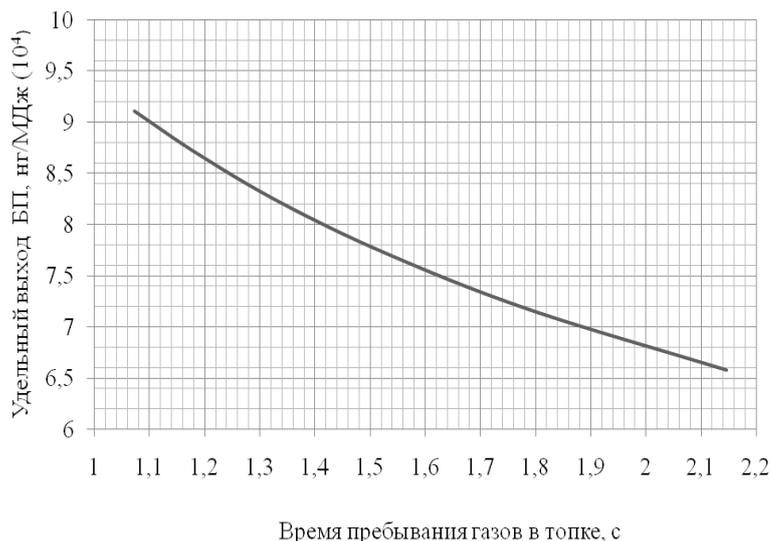


Рис. 1. Зависимость изменения удельного выхода БП от времени пребывания газов в топке котла БКЗ-420-140 НГМ для переменных режимов работы в диапазоне нагрузки от $0,5D$ до D .

Расчеты показали, что максимальная приземная концентрация БП в воздухе атмосферы составляет не более 19 нг/м^3 , что значительно превышает ПДК, установленную на уровне 1 нг/м^3 .

График влияния среднеинтегральной температуры в ЗАГ на содержание БП в продуктах сгорания крекинг-мазута в условиях $R = 10\%$, $g = 0,03$ показан на рис. 2. Повышение температуры от 1652 до 1767 К приводило к увеличению концентрации БП в уходящих газах на $93,7\%$, что в абсолютных величинах роста составило от $0,024$ до $0,382 \text{ мкг/м}^3$. При этом в случае сгорания топлива без применения рециркуляции продуктов сгорания и парового распыла мазута содержание БП в дымовых газах увеличивалось от $0,017$ до $0,202 \text{ мкг/м}^3$, что для условий сжигания с $\alpha = 1,15$, характеризовалось снижением выхода всей группы ПАУ, включая БП, в $1,89$ раза (табл. 1).

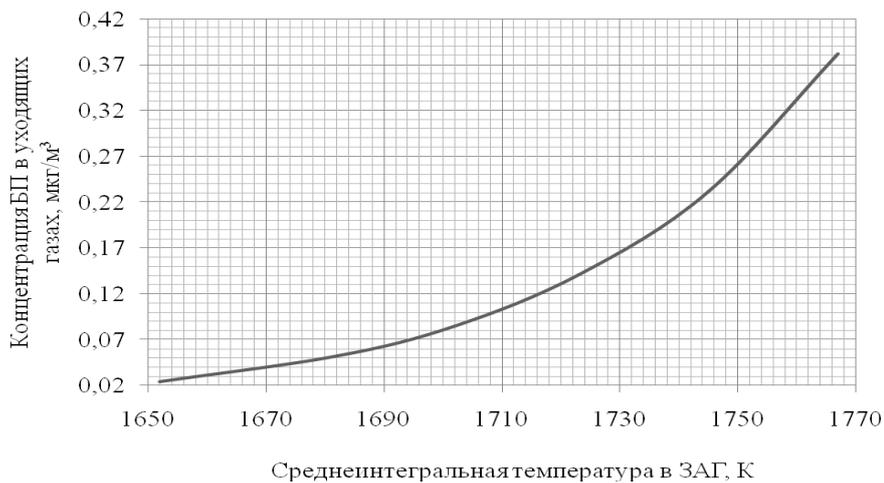


Рис. 2. Влияние среднеинтегральной температуры в ЗАГ на концентрацию БП в уходящих газах при $R=10\%$, $g = 0,03$

По результатам обработки полученных результатов моделирования топочных характеристик графическая зависимость $C_{\text{БП}} = f(\bar{T}_{\text{заг}})$, показанная на рис. 1, аппроксимирована полиномом 3-ей степени с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,999$ вида

$$C_{\text{БП}} = 2 \times 10^{-7} \bar{T}_{\text{заг}}^3 - 0,001 \bar{T}_{\text{заг}}^2 + 1,827 \bar{T}_{\text{заг}} - 1014. \quad (4)$$

Отметим, что при снижении коэффициента избытка воздуха в топке до значений, близких к стехиометрическому горению, концентрация БП и NO_2 существенно возрастает. Максимальное содержание БП для режимных условий $R = 10\%$, $g = 0,05$, $\alpha = 1,01$ составило 713 нг/м^3 (табл. 2.).

Таблица 2

Удельный выход NO_2 и БП в уходящих газах парового котла
БКЗ-420-140 НГМ в условиях $R=10\%$, $g=0,05$

Параметр / тип котла	Газомазутный, под наддувом			
Коэффициент избытка воздуха, α	1,00	1,01	1,02	1,03
Объем сухих продуктов сгорания, $\text{м}^3 / \text{кг}$	9,53	9,63	9,73	9,83
Концентрация NO_2 в уходящих газах, нг/м^3	489	472	456	442
Удельный выход NO_2 , K_{NO_2} , мг/МДж	2,043	1,991	1,943	1,897
Концентрация БП в уходящих газах, $C_{\text{БП}}$, мкг/м^3	0,713	0,555	0,432	0,337
Удельный выход БП, $K_{\text{БП}}$, (10^4) , нг/МДж	2,912	2,309	1,811	1,451
Среднеинтегральная температура в зоне активного горения, $\bar{T}_{\text{заг}}$, К	2021	2005	1990	1976
Адиабатическая температура горения крекинг-мазута, $T_{\text{ад}}$, К	2325	2308	2291	2274
Время пребывания газов в топке, $\tau_{\text{заг}}$, с	1,079	1,078	1,076	1,075

Выявлено, что в приведенных условиях моделирования характеристик топочной камеры время пребывания продуктов сгорания в ЗАГ изменилось в пределах от 1,061 до 1,079 с. Для режимов стехиометрического горения $\alpha \approx 1$ время пребывания газов в топке практически постоянное, причем концентрация БП изменилась от 337 до 555 нг/м^3 , содержание NO_2 в уходящих газах в процессе роста $\tau_{\text{заг}}$ повысилось на 9,6 % (табл. 2.).

На рис. 3 показана зависимость удельного выхода БП от удельного содержания NO_2 в уходящих газах котла БКЗ-420-140 НГМ. Установлена нелинейная взаимосвязь удельных выбросов $K_{\text{БП}} = f(K_{\text{NO}_2})$. Приведенная характеристика процесса сжигания крекинг-мазута может быть использована в условиях проведения промышленных пуско-наладочных

мероприятий и для настройки режимов горения в котельных установках с низкими выбросами токсичных соединений.

Анализ рис. 3 показал, что в условиях повышения удельного выхода NO_2 содержание БП в дымовых газах возросло на 23,9 %. Таким образом, увеличение выхода оксидов азота на 1% способствовало возрастанию содержания БП в уходящих газах на 0,52 %.

Графическая зависимость $K_{\text{БП}} = f(K_{\text{NO}_2})$, показанная на рис. 3, аппроксимирована полиномом 2-ой степени с коэффициентом корреляции $R^2 = 1$ вида

$$K_{\text{БП}} = -0,634K_{\text{NO}_2}^2 + 4,299K_{\text{NO}_2} + 3,314 . \quad (5)$$

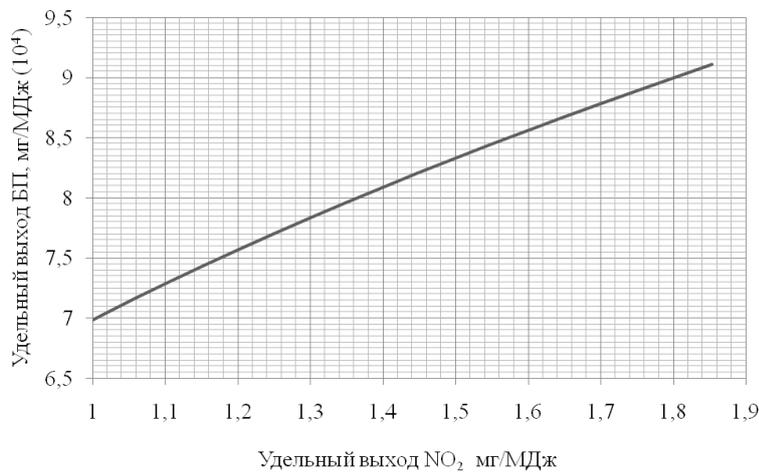


Рис. 3. Зависимость удельного выхода БП от удельного содержания NO_2 в уходящих газах котла БКЗ-420-140 НГМ при $R=0\%$, $g=0,03$, $\alpha=1,05$, $T_{\text{заг}}=1947\text{ К}$

График зависимости удельного содержания NO_2 от адиабатической температуры горения крекинг-мазута в ЗАГ для параметров $R = 0\%$, $g = 0$ показан на рис. 4.

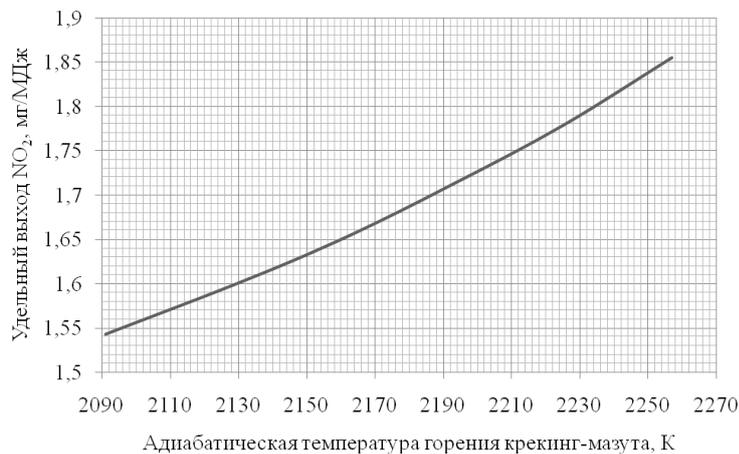


Рис. 4. Удельный выход NO_2 в зависимости от адиабатической температуры в ЗАГ при $R=0\%$, $g=0$

Увеличение адиабатической температуры в ЗАГ от 2091 до 2257 К характеризовало повышение удельного выхода NO_2 от 1,543 до 1,855 мг/МДж, что в концентрационном выражении составило рост от 325 до 428 мг/м³. Вследствие того, что конверсионные процессы, связанные с догоранием NO_2 , заканчиваются в топочной камере, концентрация оксидов азота в продуктах сгорания для приведенных режимов работы котла превышает нормативный удельный выброс, соответствующий 250 мг/м³.

Выводы

В условиях моделирования топочного процесса горения крекинг-мазута в котле БКЗ-420-140 НГМ получены важные характеристики зоны активного горения для управления технологическим процессом генерирования электрической и тепловой энергии с минимальным выходом NO_2 и БП. Выявлено, что в результате стехиометрического сжигания крекинг-мазута среднеинтегральная температура дымовых газов в ЗАГ топочной камеры достигает значений более 2000 К, что позволяет находить существенные резервы в сокращении выхода всей группы ПАУ, включая БП.

Определена степень воздействия доли газов рециркулирующих газов и парового распыла крекинг-мазута на повышение интенсивности образования БП в диапазоне изменения относительной паровой нагрузки котла $\bar{D} = 0,5 - 1,0$.

Установлена взаимосвязь между удельными выходами БП и NO_2 в продуктах сгорания крекинг-мазута, получены математические зависимости для определения удельного выхода БП от времени пребывания газов, концентрации БП от среднеинтегральной температуры в ЗАГ топки котла БКЗ-420-140 НГМ.

Литература

1. Липов Ю.М., Самойлов Ю.Ф., Виленский Т.В. Компонка и тепловой расчет парового котла: Учебное пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1988. 298 с.
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. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. РД 153-34. 02. 304-2003. Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций. М.: ОАО «ВТИ», 2003.
9. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод)/ Издание третье, переработанное и дополненное. Санкт-Петербург, 1998. 257 с.

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 s.: 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 arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2012. №27(46). S. 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 arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2012. №28(47). S. 143 – 150.
4. Ivanickij M.S., Griga A.D. Opredelenie koncentracii benz(a)pirena v dymovyh gazah kotel'nyh ustanovok i sposob avtomaticheskogo regulirovanija processa gorenija // Jenergosberezhenie i vodopodgotovka. 2013. №3(83). S. 52 – 56.
5. Zrojchikov N.A., Lyskov M.G., Prohorov V.B. i dr. Optimizacija rezhimov szhiganija mazuta v topkah kotlov bol'shoj moshhnosti // Teplojenergetika. 2007. №6. S. 23 – 26.
6. Tajmarov M.A., Egorov V.A. Issledovanie shem szhiganija mazuta na kotle TGM-84B s ispol'zovaniem mehanicheskikh forsunok // Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta. 2012. T. 15, № 10. S. 96 – 97.
7. Tajmarov M.A., Kuvshinov N.E., Chikljaev D.E. i dr. Regulirovanie vybrosov oksidov azota pri szhiganii mazuta v kotlah // Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy jenergetiki. 2016. № 3 – 4. S. 40 – 44.
8. RD 153-34. 02. 304-2003. Metodicheskie ukazanija po raschetu vybrosov oksidov azota s dymovymi gazami kotlov teplovyh jelektrostancij. M.: ОАО «ВТИ». 2003.
9. Teplovoj raschet kotlov (Normativnyj metod). Izdanie tret'e, pererabotannoe i dopolnennoe. Sankt-Peterburg, 1998. 257 s.
10. RD 153-34. 1-02. 316-2003. Metodika rascheta vybrosov benz(a)pirena v atmosferu parovymi kotlami jelektrostancij. M.: ОАО «ВТИ». 2003.

Author of the publication

Ivanitskiy Maxim Sergeevich – 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

03 июля 2017 г.