

УДК 621.311.22

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО УРОВНЯ В ЗОНЕ АКТИВНОГО ГОРЕНИЯ НА СОДЕРЖАНИЕ ОКСИДОВ АЗОТА И БЕНЗ(А)ПИРЕНА В ПРОДУКТАХ СГОРАНИЯ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ. ЧАСТЬ 3. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОБРАЗОВАНИЯ ПАУ В ХАРАКТЕРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗОНАХ ФАКЕЛА**

**М.С. Иваницкий**

**Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ»  
в г. Волжском, Россия**

**Резюме:** В статье представлены результаты численного моделирования влияния характерных температур факела зоны активного горения на содержание (полициклических ароматических углеводородов) ПАУ, представленных бенз(а)пиреном, в уходящих газах пылеугольного котла БКЗ-75-39 ФБ. Выполнено исследование интенсивности воздействия адиабатической температуры на распределение теплообмена в топочном устройстве котлоагрегата. Установлена степень изменения поглощательной способности топочной среды в условиях влияния безразмерной температуры газов на выходе из зоны активного горения. Выполнена оценка концентраций бенз(а)пирена в пределах температурной зоны (менее 1000 К) пылеугольного факела. На основе полученных результатов определена функциональная зависимость содержания бенз(а)пирена в уходящих газах котла БКЗ-75-39 ФБ от безразмерной температуры продуктов сгорания на выходе из топочной камеры.

**Ключевые слова:** паровые котлы, пылеугольный факел, 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 3. THE INTENSITY OF THE FORMATION PAHs IN THE TYPICAL TEMPERATURE ZONES OF THE TORCH**

**M.S. Ivanitskiy**

**Volzhsy Branch of the National Research University  
«Moscow Power Engineering Institute», Russia**

**Abstract:** The article presents the results of numerical simulation of the influence of the characteristic temperature of the torch zone of active burning on concentrations of PAHs, represented by benz(a)pyrene in flue gases of coal-fired boiler BKZ-75-39 FB. The research of the intensity of effect of adiabatic temperature on the distribution of heat exchange in furnace of boiler device. The degree of change of absorption capacity of the combustion environment in terms of the effects of the dimensionless gas temperature at the exit from the zone of active combustion. Estimated concentrations of benzpyrene within the temperature zone (less than 1000 K) dust-coal torch. Based on the obtained results we determined the functional dependence of the content of benz(a)pyrene in exhaust gases of the boiler BKZ-75-39 FB from the dimensionless temperature of the combustion products at the exit of the combustion chamber.

**Keywords:** steam boilers, pulverized coal torch, benzpyrene.

### Введение

Горение в топочных устройствах энергетических котлов угольного топлива сопровождается образованием в продуктах сгорания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ). Современные аналитические методы индикации позволяют идентифицировать в уходящих газах более 27 представителей ПАУ. Необходимо отметить, что наибольшее негативное воздействие на окружающую среду из представленных соединений оказывает бенз(а)пирен (БП). На интенсивность генерации БП в дымовых газах значительное воздействие оказывают условия сжигания топлива, среди которых определяющим является температурный уровень в зоне активного горения (ЗАГ) топочной камеры котла. Отметим, что температура в ЗАГ определяется, в том числе, внутритопочными мероприятиями, реализуемыми в процессе эксплуатации котлов теплогенерирующих систем электроэнергетического комплекса. Режимные мероприятия, основанные на рециркуляции продуктов сгорания, ступенчатом сжигании топлива, подводе вторичного воздуха в топку применяют на действующих тепловых электростанциях для улучшения экологических показателей работы энергоблоков (повышение интенсивности выгорания продуктов химического недожога – монооксида углерода, ПАУ) и регулирования параметров перегретого пара на выходе из котлоагрегата [1–3].

Целью данной работы является исследование влияния характерных температур зоны активного горения на интенсивность образования ПАУ, представленных бенз(а)пиреном, в пылеугольном факеле котла БКЗ-75-39 ФБ.

### Численное моделирование

Температура на выходе из зоны активного горения  $T_{\text{заг}}$ , К, рассчитывается по выражению [4]

$$T_{\text{заг}} = \frac{T_{\text{ад}}}{1 + M \text{В} \bar{\alpha}^{0,3} \left( \frac{1}{\text{Bo}} \right)^{0,6}}, \quad (1)$$

где  $\text{Bo} = \frac{\phi B_p (V_c)_T}{C_0 \psi F \epsilon_T T_{\text{ад}}^3}$  критерий радиационного теплообмена Больцмана.

В частном случае выражение (1) принимает зависимость

$$T_{\text{заг}} = \frac{\beta_{\text{сг}} Q^r}{(V_c)_T} - \frac{T_{\text{ад}}}{11 \text{Bo}^2}, \quad (2)$$

здесь  $T_{\text{ад}}$  – адиабатическая температура горения угля, К;  $\bar{T}_{\text{заг}}$  – среднеинтегральная температура продуктов сгорания в зоне активного горения (ЗАГ), К;  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха;  $M$  – параметр, учитывающий влияние на интенсивность теплообмена относительного уровня расположения горелок, степени забалластированности топочных газов;  $\text{В} \bar{\alpha}$  – эффективное значение критерия поглощательной способности Бугера;  $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-11}$  коэффициент излучения абсолютно черного тела, кВт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $\psi F$  – произведение коэффициента эффективности экранов на суммарную поверхность, ограничивающую ЗАГ, м<sup>2</sup>;  $\epsilon_m$  – коэффициент теплового излучения топки в ЗАГ;  $\phi$  – коэффициент сохранения тепла;  $B_p$  – расчетный расход топлива, кг/с;  $(V_c)_T$  – суммарная теплоемкость продуктов сгорания, МДж/(кг·°С);  $\beta_{\text{сг}}$  – степень сгорания топлива;  $\Theta = T_{\text{заг}} / T_{\text{ад}}$  – безразмерная температура уходящих газов на выходе из топки.

Горючие характеристики березовского угля марки Б2, который является основным топливом котла БКЗ-75-39 ФБ, равны соответственно:  $W=33,0\%$ ,  $A=4,7\%$ ,  $S=0,2\%$ ,  $C=44,2\%$ ,  $H=3,1\%$ ,  $O=14,4\%$ ,  $N=0,4\%$ ;  $V^{\text{daf}} = 48\%$  – выход летучих компонентов; теплотворная способность топлива 15,66 МДж/кг.

В процессе моделирования рассмотрены различные нагрузки котла с реализацией режимно-технологических мероприятий по ограничению выбросов БП в окружающую среду. Оценка концентраций БП в уходящих газах котлоагрегата с учетом воздействия внутритопочных факторов выполнена на основании рекомендаций РД 153-34. 1-02. 316-2003.

На интенсивность образования и конверсию продуктов недожога значительное влияние оказывают температура факела и концентрация кислорода в топке котла. В качестве основного параметра зонального деления факела принимают его температуру. По длине факел разделяется на пять сечений, каждое из них характеризуется конкретной температурой. Схема зонального разделения факела ( $L/D_a$  – относительная длина факела;  $L$  – длина факела, м;  $D_a$  – диаметр амбразуры горелки, м) показана на рис. 1.

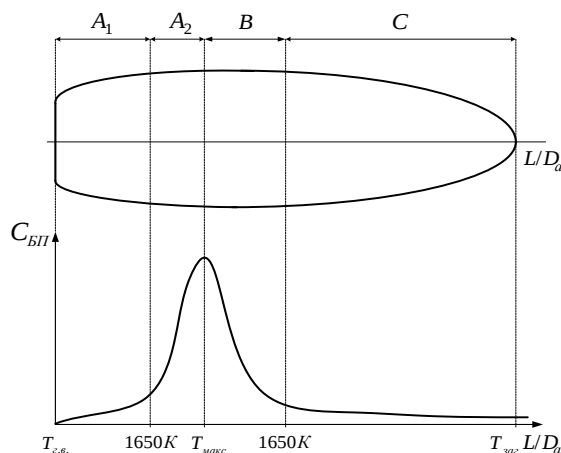


Рис. 1. Температурные зоны пылеугольного факела

В первом сечении температура факела принимается равной температуре горячего воздуха. Второе и четвертое сечения отождествляют нижнюю и верхнюю границы образования значимого количества токсичных соединений. В приведенных сечениях температура составляет 1650 К [5–7].

В зоне  $A_1$  температура изменяется от температуры горячего воздуха  $T_{г.в.}$  до 1650 К, происходит деструкция и разложение углеводородов топлива и завершаются процессы смесеобразования, начинается активное выгорание продуктов реакции.

В зоне  $A_2$  происходит выгорание значительной части газообразных и твердых продуктов неполного сгорания. Температура изменяется в пределах от 1650 К до  $T_{макс}$ , где  $T_{макс}$  – максимальная температура горения, К.

В зоне  $B$  температура снижается от  $T_{макс}$  до 1650 К и наблюдается практическое завершение процессов горения топлива.

В зоне  $C$  температура варьируется от 1650 К до  $T_{заг}$ . Происходит завершение конверсионных процессов основных продуктов горения [5, с. 8].

На рис. 2–4 представлены результаты моделирования режимных характеристик топочного процесса в пылеугольном котле БКЗ-75-39 ФБ.

### Обсуждение результатов

На рис. 2 показана зависимость концентрации БП в отходящих газах от безразмерной температуры на выходе из зоны активного горения котлоагрегата БКЗ-75-39 ФБ.

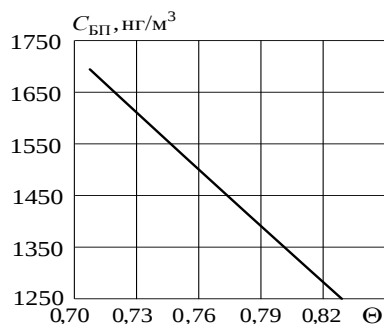


Рис. 2. Изменение концентрации БП в уходящих газах от безразмерной температуры на выходе из зоны активного горения топочной камеры

Обработка полученных результатов позволила аппроксимировать графическую зависимость  $C_{BP} = f(\Theta)$  в виде уравнения с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,9981$ :

$$C_{BP} = 4317 - 3712\Theta, \text{ при } \Theta = 0,708 \div 0,830. \quad (5)$$

Анализ показывает, что в случае увеличения температуры на выходе из ЗАГ на 1% концентрация БП уменьшается в среднем на  $30 \text{ нг/м}^3$ . В рассмотренном варианте температура на выходе из ЗАГ составила 1643 К, ее значение получено при параметре, учитывающем влияние на интенсивность теплообмена относительного уровня расположения горелочных устройств,  $M=0,5$ . Рассмотренная область безразмерной температуры  $\Theta$ , показанная на рис. 2, характеризует зону дожигания продуктов неполного сгорания и завершения конверсионных процессов в топочной камере и предполагает режимно-технологическое воздействие подвода вторичного воздуха для интенсификации окислительных реакций.

Результаты моделирования, приведенные на рис. 3, характеризуют распределение радиационного теплообмена и показателей поглощательной способности топочной среды для котельной пылеугольной установки БКЗ-75-39 ФБ с учетом вариативных уровней относительного расположения горелок и степени забалластированности топочных газов  $M$ .

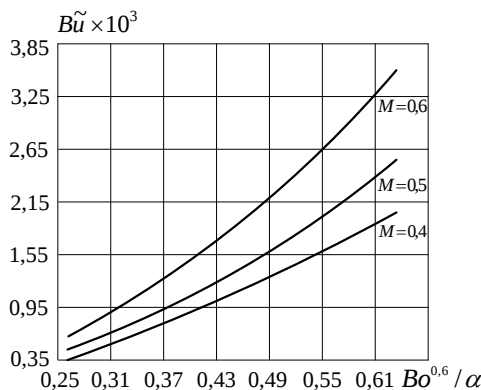


Рис. 3. Влияние критерия радиационного теплообмена на уровень поглощательной способности топочной среды для различных относительных уровней расположения горелок и степени забалластированности топочных газов

Отметим, что уменьшение параметра  $M$  учитывает перераспределение радиационного теплообмена и поглощательной способности топочной среды. Приведенные

варианты параметра  $M$  указывают на возможность подавления образования ПАУ в зонах пылеугольного факела за счет изменения положения ядра горения, характеризующего максимальную температуру газов в топке.

Графическая зависимость на рис. 4 демонстрирует изменение интенсивности радиационного теплообмена в топке пылеугольного котла от влияния адиабатической температуры горения топлива с учетом пересчета на коэффициент избытка воздуха в горелочном устройстве.

Оценки показывают, что при изменении параметра  $M$  от 0,4 до 0,5 поглощательная способность топочной среды увеличивается от  $1,83 \cdot 10^{-3}$  до  $2,46 \cdot 10^{-3}$ , при дальнейшей перестройке факела  $B_{\text{в}}$  возрастает на 36,6%. Таким образом, в приведенном случае повышение температуры факела непосредственно улучшает условия выгорания продуктов недожога, включая БП.

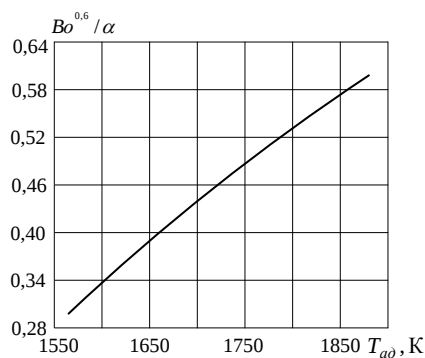


Рис. 4. Изменение интенсивности радиационного теплообмена в топке пылеугольного котла от влияния адиабатической температуры горения топлива

Анализ рис. 4 показывает, что в условиях увеличения адиабатической температуры от 1565 до 1881 К коэффициент, характеризующий интенсивность радиационного теплообмена в топочной камере котла БКЗ-75-39 ФБ, повышается в пределах от 0,190 до 0,457. Отметим, что данные моделирования топочного процесса показывают относительно низкий уровень адиабатической температуры при горении угля. Для обеспечения стабильного воспламенения и фронта горения в этом случае возможно применение внутритопочных мероприятий по подсветке факела мазутом или природным газом, что дополнительно позволит сократить химический недожог топлива, обусловленный наличием в продуктах сгорания монооксида углерода и ПАУ.

Расчетами установлено, что в рассмотренных температурных зонах факела  $B$  и  $C$  наблюдается конверсия продуктов горения пылевоздушной смеси, в частности ПАУ. В значительной степени окислительные процессы при химическом недожоге зависят от концентрации кислорода  $O_2$  в расчетном сечении. Оценки показывают, что в приведенных условиях колебания  $O_2$  в зоне практического завершения процессов горения, равные 0,8%, способствуют увеличению выхода БП более чем на 5,7%.

### Выводы

Расчитаны показатели радиационного теплообмена и поглощательной способности топочной среды в условиях сгорания пылевоздушной смеси с учетом изменения интенсивности воздействия адиабатической температуры в пылеугольном котлоагрегате БКЗ-75-39 ФБ.

Установлена возможность исключения ПАУ в продуктах сгорания топлива посредством реализации в характерных температурных зонах пылеугольного факела внутритопочных мероприятий дожигания продуктов неполного сгорания, основанных на

подводе вторичного воздуха в зону  $B$ , характеризующую практическое завершение стадии горения, или в начальную зону  $C$  для интенсификации конверсионных процессов.

Результаты позонного расчета факела топочной камеры аппроксимированы математической зависимостью для определения содержания БП от безразмерной температуры на выходе из топочной камеры котла БКЗ-75-39 ФБ и использования при разработке режимных карт в процессах наладки малотоксичных режимов сжигания березовского угля марки Б2.

### Литература

1. Иваницкий М.С. Содержание токсичных продуктов в уходящих газах перспективных угольных энергоблоков 660 и 1060 МВт // Энергобезопасность и энергосбережение. 2016. № 4. С. 5–9.
2. Иваницкий М.С., Грига А.Д. Перевод пылеугольных котлов на сжигание природного газа для сокращения выбросов бенз(а)пирена в воздушный бассейн // Вестник МЭИ. 2015. № 2. С. 79–82.
3. Иваницкий М.С. Суммарная агрессивность газовых выбросов пылеугольных котлов, обусловленная компонентами неполного сгорания // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. № 5 (97). С. 70–75.
4. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). Издание третье, переработанное и дополненное. Санкт-Петербург: ЦКТИ, ВТИ, 1998. 257 с.
5. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. Москва, Ленинград: АН СССР, ИФХ. 1947. 142 с.
6. Brorstron-Lunden E., Lindsleog A. Degradation of PAH during simulated stack gas sampling / E. Brorstron-Lunden, A. Lindsleog // Environmental Science and Technology. 1985. V. 19. № 4. P. 313–316.
7. Longwell J.P. The formation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combustion. // 19 Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 1982. P. 1339–1350.
8. Frenklach M., Clary D.W., Yuan T. et al. Mechanism of soot formation in acetylene-oxygen mixtures // Combustion Science and Technology. 1986. V. 50. № 1–3. P. 79–115.
9. Тумановский А.Г., Ольховский Г.Г. Пути совершенствования угольных ТЭС России // Электрические станции. 2015. № 1. С. 67–73.
10. Сомова Е.В., Шварц А.Л., Вербовецкий Э.Х. Создание пылеугольного энергоблока на ультрасверхкритические параметры пара в рамках европейского проекта AD-700 // Энергетик. 2015. № 2. С. 39–43.

### 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. Ivanickij M.S. Soderzhanie toksichnyh produktov v uhodjashhih gazah perspektivnyh ugot'nyh jenergoblokov 660 i 1060 MVt // Jenergobezopasnost' i jenergoberezenie. 2016. No. 4. P. 5–9.
2. Ivanickij M.S., Griga A.D. Perevod pyleugol'nyh kotlov na szhiganie prirodnogo gaza dlja sokrashhenija vybrosov benz(a)pirena v vozdushnyj bassejn // Vestnik MJeI. 2015. No. 2. P. 79–82.
3. Ivanickij M.S. Summarnaja agressivnost' gazovyh vybrosov pyleugol'nyh kotlov, obuslovlennaja komponentami nepolnogo sgoranija // Jenergoberezenie i vodopodgotovka. 2015. No. 5 (97). P. 70–75.
4. Teplovoj raschet kotlov (Normativnyj metod). Izdanie tret'e, pererabotannoe i dopolnennoe. Sankt-Peterburg: CKTI, VTI, 1998. 257 p.
5. Zel'dovich Ja.B., Sadovnikov P.Ja., Frank-Kameneckij D.A. Okislenie azota pri gorenii. Moskva, Leningrad: ANSSR, IFH. 1947. 142 p.

6. Brorstron-Lunden E., Lindsleog A. Degradation of PAH during simulated stacle gas sampling / E. Brorstron-Lunden, A. Lindsleog // *Environmental Science and Technology*. 1985. V. 19. No. 4. P. 313–316.
7. Longwell J.P. The formation of polycyclic aromatic hydrocarbons by combustion // 19 Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute. 1982. P. 1339–1350.
8. Frenklach M., Clary D.W., Yuan T. et al. Mechanism of soot formation in acetylene-oxygen mixtures // *Combustion Science and Technology*. 1986. V. 50. No. 1–3. P. 79–115.
9. Tumanovskij A.G., Ol'hovskij G.G. Puti sovershenstvovaniya ugol'nyh TJeS Rossii // *Jelektricheskie stancii*. 2015. No.1. P. 67–73.
10. Somova E.V. Sozdanie pyleugol'nogo jenergobloka na ul'trasverhkriticheskie parametry para v ramkah evropejskogo proekta AD-700 / E.V. Somova, A.L. Shvarc, Je.H. Verboveckij // *Jenergetik*. 2015. No. 2. P. 39–43.

**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 мая 2017 г.*