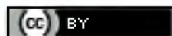


ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И КОМПЛЕКСЫ



УДК 621.311.22

DOI:10.30724/1998-9903-2023-25-2-3-11

МАССОВЫЕ ВЫБРОСЫ ПОЛИЦИКЛИЧЕСКИХ АРОМАТИЧЕСКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ СЖИГАНИИ ТОПЛИВА В КОТЛАХ ТЭС

Иваницкий М.С.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
в г. Волжском, Россия

ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-8779-5453>, msei@yandex.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ данного исследования заключается в установлении технологических показателей выбросов бенз(а)пирена в атмосферу для оценки степени негативного влияния энергетических предприятий на окружающую среду и разработке на этой основе первичных (воздухоохранных) мероприятий, проведении инвентаризации выбросов загрязняющих веществ, сбора и подготовке исходной экологической информации для эффективной реализации в отечественной теплоэнергетике принципов технологического нормирования выбросов. ЦЕЛЬ. Рассмотрены технологические особенности образования полициклических ароматических углеводородов, в частности бенз(а)пирена, в топках энергетических котлов, сжигающих органическое топливо. Определены режимные факторы, значительно влияющие на интенсивность образования бенз(а)пирена как наиболее канцерогенной и мутагенной примеси в дымовых газах. В рамках внедрения принципов технологического нормирования загрязняющих маркерных веществ энергетические предприятия должны определять массовую эмиссию высокотоксичных продуктов сгорания для улучшения экологических показателей топочных процессов и установления технологических показателей выбросов. МЕТОДЫ. Определение массовых выбросов полициклических ароматических углеводородов выполнено с применением методов математической статистики, обработки экологической информации, системного анализа данных и обработки полученных результатов. РЕЗУЛЬТАТЫ. Разработаны аналитические выражения для определения содержания бенз(а)пирена в продуктах сгорания каменного угля и антрацита. Определены значения массовых выбросов бенз(а)пирена для проведения инвентаризации и обоснования технологического нормирования канцерогенных и мутагенных веществ на энергетических предприятиях. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные результаты рекомендуется использовать для предварительной оценки содержания бенз(а)пирена в дымовых газах котлов на энергетических предприятиях на стадии сбора и подготовки информации для введения технологического нормирования высокотоксичных веществ и оценки технологических показателей выбросов.

Ключевые слова: тепловые электрические станции; технологическое нормирование выбросов; полициклические ароматические углеводороды; бенз(а)пирен; массовые выбросы.

Для цитирования: Иваницкий М.С. Массовые выбросы полициклических ароматических углеводородов при сжигании топлива в котлах ТЭС // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.25. № 2. С.3-11. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-3-11.

MASS EMISSIONS OF POLYCYCLIC AROMATIC HYDROCARBONS DURING FUEL COMBUSTION IN THERMAL POWER PLANT BOILERS

MS. Ivanitskiy

Volzhsy Branch of the National Research University

«Moscow Power Engineering Institute», Russia
ORCID*: <http://orcid.org/0000-0002-8779-5453>, mseiv@yandex.ru

Abstract: *RELEVANCE* of this study lies in the establishment of technological indicators of emissions of benz(a)pyrene into the atmosphere to assess the degree of negative impact of energy enterprises on the environment and the development on this basis of primary (air protection) measures, inventory of emissions of pollutants, collection and preparation of initial environmental information for the effective implementation of the principles of technological regulation of emissions in the domestic thermal power industry. *THE PURPOSE.* The technological features of the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons, in particular benz(a)pyrene, in the furnaces of power boilers burning organic fuel are considered. The regime factors significantly influencing the intensity of the formation of benz(a)pyrene as the most carcinogenic and mutagenic impurity in flue gases have been determined. As part of the implementation of the principles of technological rationing of polluting marker substances, energy enterprises should determine the mass emission of highly toxic combustion products to improve the environmental performance of combustion processes and establish technological emission indicators. *METHODS.* Determination of mass emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons was carried out using methods of mathematical statistics, processing of environmental information, system analysis of data and processing of the results obtained. *RESULTS.* Analytical expressions have been developed to determine the content of benz(a)pyrene in the combustion products of coal and anthracite. The values of mass emissions of benz(a)pyrene for inventory and justification of technological rationing of carcinogenic and mutagenic substances at energy enterprises have been determined. *CONCLUSION.* The results obtained are recommended to be used for a preliminary assessment of the content of benz(a)pyrene in the flue gases of boilers at power plants at the stage of collecting and preparing information for the introduction of technological rationing of highly toxic substances and the assessment of technological emission indicators.

Keywords: *thermal power plants; benz(a)pyrene; technological regulation of emissions; polycyclic aromatic hydrocarbons; mass emissions.*

For citation: Ivanitskiy MS. Mass emissions of polycyclic aromatic hydrocarbons during fuel combustion in thermal power plant boilers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2023; 25(2): 3-11. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-2-3-11.

Введение

В отечественной теплоэнергетике до 2024 года запланирована реализация новой концепции природоохранной деятельности, основанной на технологическом нормировании загрязняющих выбросов в атмосферный воздух и внедрении на энергетических предприятиях наилучших доступных технологий (НДТ). В соответствии с данным подходом энергетические предприятия по степени отрицательного воздействия на атмосферный воздух разделены на IV категории. В рамках реализации принципов технологического нормирования к объектам I категории со значительным негативным воздействием отнесено порядка 300 энергетических предприятий, которые должны определять нормативы допустимых выбросов высокотоксичных веществ, веществ характеризующихся канцерогенными и мутагенными свойствами, например, некоторые представители полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), а также обеспечить непрерывный контроль выбросов вредных (загрязняющих) веществ для каждого источника загрязнения атмосферы. Вместе с тем, согласно задачам выполнения национального проекта «Экология» снижение негативного воздействия на окружающую среду является приоритетным направлением развития и совершенствования энергетической отрасли [1].

В работах [1, 2] рассматриваются технические и экономические проблемы, а также возможные риски, возникающие при внедрении НДТ на российских тепловых электрических станциях. Предложено использование норм общего действия для более комплексной оценки негативного влияния вредных выбросов энергетических предприятий на окружающую среду. Обоснована необходимость практической реализации НДТ на объектах энергетики с учетом полученного практического опыта применения различных способов сжигания органического топлива и эксплуатации высокоэффективных газоочистных установок и систем.

В работе [3, 4] приведены методические подходы для установления энергетическими предприятиями технологических показателей выбросов в условиях реализации принципов технологического нормирования и внедрения наилучших доступных технологий, а также уточнения регламентных требований реализации принципов технологического нормирования и выбора НДТ на энергетических предприятиях.

Образование ПАУ, в том числе бенз(а)пирена (БП) при сжигании твердого топлива в основном объясняется наличием технологических условий, характеризующихся низкой температурой процесса горения органического топлива и недостатком подвального воздуха. Расчет выбросов БП в дымовых газах котлов паропроизводительностью 30 т/ч и более выполняется на основе нормативной методики СО 153-34.02.316-2003. При этом расчетная оценка эмиссии БП учитывает влияние режимных факторов и теплотехнических характеристик органического топлива. В связи с этим при определении выбросов БП учитывается влияние коэффициента избытка воздуха, нагрузка котла, режимно-технологические характеристики и параметры топочного процесса, а также степень задержки БП газоочистных аппаратах. Погрешность определения выбросов БП составляет 20 %.

В работах [5, 6] представлены результаты применения методики аналитического определения полициклических ароматических углеводородов в газовых пробах. Описаны технологические условия отбора пробы, а также проблемы индикации и другие сложности детектирования примесей представителей ПАУ в газовой пробе при сжигании органического топлива в топках котлов различной тепловой мощности. Следует отметить, что в силу имеющихся сложностей проведения аналитического контроля содержание БП в продуктах сгорания на ТЭС используются методы расчетного определения массовых выбросов высокотоксичных веществ.

Системы технологического контроля и учета выбросов предполагает наличие возможности сбора данных о массовых выбросах в атмосферу продуктов сгорания, поиска технологических решений, направленных на оптимизацию процесса сжигания топлива, улучшения экологических показателей топочных процессов, снижения воздействия на атмосферный воздух вредных выбросов тепловых электрических станций. Даны рекомендации по выбору компонентов газоаналитических систем для организации непрерывного мониторинга выбросов на энергетических предприятиях [7, 8].

Результаты анализа показывают, что при определении степени негативного влияния энергетических предприятий на окружающую среду необходимо учитывать токсичность дымовых газов. Для оценки токсичности компонентов сгорания топлива на практике используется показатель суммарной вредности дымовых газов. Следует отметить, что при определении суммарной токсичности продуктов сгорания не учитывается вклад канцерогенных представителей ПАУ, оказывающих отрицательное воздействие на атмосферный воздух. При этом содержание отдельных представителей ПАУ в уходящих газах свидетельствует о незавершенности процессов горения органического топлива [9]. Исследование влияния загрязнения канцерогенными веществами, образующимися при сжигании топлива, окружающей среды необходимо проводить с учетом массы и частной вредности продуктов сгорания. Необходимо отметить, что на интенсивность образования ПАУ в процессе сжигания органического топлива значительное влияние оказывают режимно-технологические факторы, тип горелочного устройства и способ повода окислителя.

Таким образом, целью работы является расчетная оценка концентраций и массовых выбросов полициклических ароматических углеводородов, в основном представленных бенз(а)пиреном, для оценки степени негативного влияния энергетических предприятий на окружающую среду и разработки первичных (воздухоохранных) мероприятий, инвентаризации выбросов загрязняющих веществ, сбора и подготовки исходной экологической информации для установления технологических показателей БП в атмосферу.

Теоретическая значимость исследований заключается в том, что разработаны аналитические выражения для расчета концентраций БП в дымовых газах котлов при сжигании каменного угля и антрацита, оценки массовых выбросов полициклических ароматических углеводородов, представленных БП, в атмосферу.

Практическая значимость полученных результатов могут быть применены на тепловых электрических станциях на этапе сбора и подготовки исходной экологической информации для обоснования технологических показателей высокотоксичных примесей в продуктах сгорания каменного угля и антрацита в энергетических котлах большой тепловой мощности для оценки степени негативного влияния объектов энергетики на окружающую среду и разработки природоохранных мероприятий, в том числе на стадии подготовки заявки и получения комплексного экологического разрешения.

Обобщение экспериментальных данных показывает, что при сжигании природного газа концентрация БП в дымовых газах соответствует 40 – 50 нг/м³, в условиях сжигания угля традиционным способом находится на уровне 100 – 120 нг/м³. На рисунке 1 представлена зависимость влияния содержания СО на концентрацию БП в продуктах сгорания природного газа.

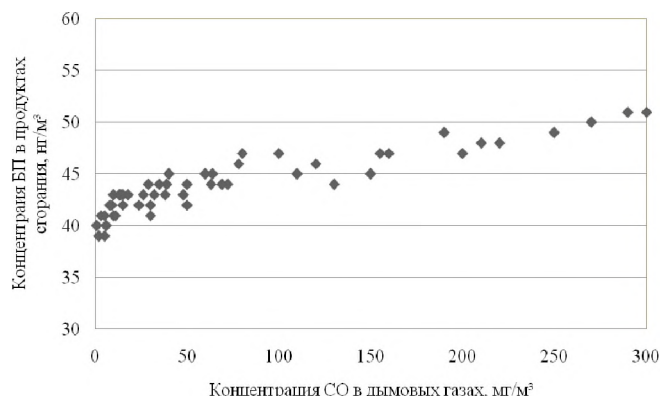


Рис. 1. Изменение концентрации БП в зависимости от содержания СО в дымовых газах (в сечении за дымососом) *Fig. 1. Change in BP concentration depending on the CO content in flue gases (in the section behind the smoke pump)*

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Анализ показывает, что между содержанием БП и СО в продуктах сгорания наблюдается корреляционная прямая зависимость, как это показано на рисунке 1. На рисунке 2 представлен график изменения содержания БП в дымовых газах от концентрации СО (в контрольном сечении) в продуктах сгорания.

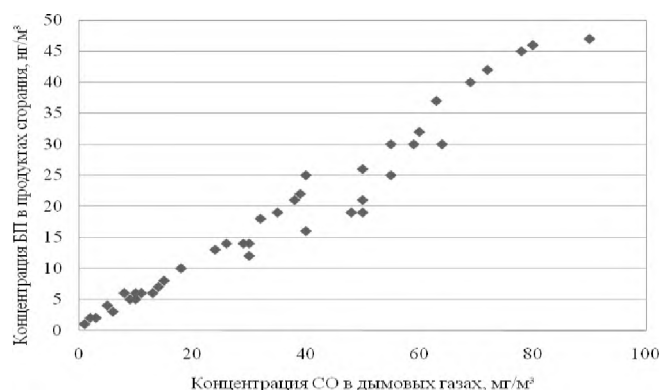


Рис. 2. Изменение содержания БП в дымовых газах от значения концентрации СО (в контрольном сечении) в продуктах сгорания *Fig. 2. Change of BP content in flue gases from the value of CO concentration (in the control section) in combustion products*

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

Превышение значений эмиссии БП в продуктах сгорания по сравнению с результатами, приведенными на рисунках 1 и 2, свыше 200 нг/м³ может быть связано, в первую очередь, с конкретными условиями сжигания топлива, и в меньшей степени с его теплотехническими характеристиками. Реализация первичных (воздухоохранных) мероприятий на котельных установках способствует росту БП в дымовых газах в 5 – 6 раз по сравнению с исходными значениями. При оценке массовых выбросов БП следует также учитывать эффективность работы газоочистных систем, которая может вносить значительный вклад в достоверность их определения [10 – 14].

Материалы и методы

Концентрация БП в продуктах сгорания органического топлива с учетом взаимного влияния коэффициента избытка воздуха α и паропроизводительности D энергетического котла можно представить в виде уточненной корреляционно-регрессионной зависимости [15]:

$$c_{\text{БП}} = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ik} X_i X_k + \sum b_{ii} X_i^2 + \sum b_{ik} X_{ik}^2, \quad (1)$$

где b_0, b_i, b_{ii}, b_{ik} – коэффициенты регрессии, X_{ii}, X_{ik} – факторные значения.

Статистические коэффициенты в уравнении (1) определяются по формулам:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N C_{\text{БП}_j} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n b_{ii} \sum_{j=1}^N X_{ij}^2; \quad (2)$$

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ji} C_{\text{БП}_j}}{\sum_{j=1}^N X_{ji}^2}; \quad b_{ii} = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ji}^* C_{\text{БП}_j}}{\sum_{j=1}^N X_{ji}^{*2}}; \quad b_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^N X_{ji} X_{jk} C_{\text{БП}_j}}{\sum_{j=1}^N X_{ji}^2 X_{jk}^2} \quad (i \neq k).$$

По результатам расчета коэффициентов регрессии выполнена проверка их значимости и воспроизводимости путем использования статистических критериев Стьюдента и Кохрена. Для проверки адекватности корреляционно-регрессионной зависимости применен критерий Фишера.

$$\text{Кодированные значения факторов равны } X_1 = \frac{\alpha_i - \bar{\alpha}}{\alpha_{\max} - \bar{\alpha}}, \quad X_2 = \frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}},$$

соответственно, здесь α_i, D_i – фактические (текущие) значения режимных факторов; $\bar{\alpha}, \bar{D}$ – средние значения режимных факторов в диапазоне $\alpha_{\min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{\max}$, $D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max}$; $\alpha_{\max}, D_{\max}$ – максимальные значения режимных факторов котельной установки $\alpha_{\min} \leq \alpha_i \leq \alpha_{\max}$, $D_{\min} \leq D_i \leq D_{\max}$.

Обсуждение результатов

На основе обобщения опытных данных о содержании БП в дымовых газах энергетических котлов при сжигании органического топлива определены значения выбросов для расчетных точек факторных эксперимента [5, 6, 9]. Путем обработки полученных данных и использования методического подхода факторного эксперимента, матрицы планирования численного эксперимента, разработаны адекватные регрессионные соотношения для расчета содержания БП в продуктах сгорания каменного угля (Кузнецкий Т) и антрацита (Донецкий АШ).

Концентрация бенз(а)пирена, нг/м^3 , в дымовых газах котлов большой мощности (300 МВт и более) при сжигании каменного угля (Кузнецкий Т), приведенная к коэффициенту избытка воздуха $\alpha = 1,4$ рассчитывается по формуле:

$$c_{\text{БП}} = 233 - 16 \cdot \left(\frac{\alpha_i - \bar{\alpha}}{\alpha_{\max} - \bar{\alpha}} \right) - 15 \cdot \left(\frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}} \right) + 35 \cdot \left(\frac{\alpha_i - \bar{\alpha}}{\alpha_{\max} - \bar{\alpha}} \right) \cdot \left(\frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}} \right) - \left(\frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}} \right)^2. \quad (3)$$

Уравнение регрессии (3) позволяет адекватно оценивать $c_{\text{БП}}$ для значений α в пределах $1,1 \leq \alpha \leq 1,3$, величин D в диапазоне $294 \leq D \leq 420 \text{ т/ч}$.

Концентрация бенз(а)пирена, нг/м^3 , в дымовых газах котлов большой мощности (300 МВт и более) при сжигании антрацита (Донецкий АШ), приведенная к коэффициенту избытка воздуха $\alpha = 1,4$ рассчитывается по формуле:

$$c_{\text{БП}} = 264 - 21 \cdot \left(\frac{\alpha_i - \bar{\alpha}}{\alpha_{\max} - \bar{\alpha}} \right) - 25 \cdot \left(\frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}} \right) + 40 \cdot \left(\frac{\alpha_i - \bar{\alpha}}{\alpha_{\max} - \bar{\alpha}} \right) \cdot \left(\frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}} \right) + 3,5 \cdot \left(\frac{D_i - \bar{D}}{D_{\max} - \bar{D}} \right)^2. \quad (4)$$

Уравнение регрессии (4) позволяет адекватно оценивать $c_{\text{БП}}$ для значений α в пределах $1,05 \leq \alpha \leq 1,25$, величин D в диапазоне $570 \leq D \leq 950 \text{ т/ч}$.

Относительная погрешность расчетной оценки $C_{\text{бп}}$ в дымовых газах котлов на основе регрессионной зависимости (3) соответствует 13,6 %, по выражению (4) составляет 10,5 %, что значительно меньше погрешности нормативной методики.

Максимальный выброс бенз(а)пирена (г/с), поступающий в атмосферу с дымовыми газами энергетических котлов определяется по соотношению:

$$M_{\text{бп}} = c_{\text{бп}} V_{\text{г}}^p, \quad (5)$$

где $V_{\text{г}}^p$ – реальный объем выбросов дымовых газов, измеренный в сечении газохода после дымососа или рассчитанный по составу топлива при рабочих условиях и работе котла на максимальной тепловой нагрузке, м³/с.

На рисунке 3 представлена сравнительная графическая зависимость изменения $C_{\text{бп}}$ в дымовых газах при горении каменного угля (Кузнецкий Т) и антрацита (Донецкий АШ) для различных вариантов сжигания топлива и значений паровой нагрузки котельных установок.

Следует отметить, что результаты расчетной оценки $C_{\text{бп}}$ для исследуемых видов каменного угля (Кузнецкий Т) и антрацита (Донецкий АШ), на основе соотношений (3), (4) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными [5, 6, 9].

Анализ полученных результатов показал, что $C_{\text{бп}}$ в дымовых газах парового котла ТП-87 при использовании каменного угля (Кузнецкий Т) и номинальной паровой нагрузке в диапазоне α соответствует 237 – 321 нг/м³, $C_{\text{бп}}$ в продуктах сгорания котельной установки ТПП-210, сжигающего антрацит (Донецкий АШ) при аналогичных условиях соответствует диапазону значений 291 – 393 нг/м³, как это представлено на рисунке 3.

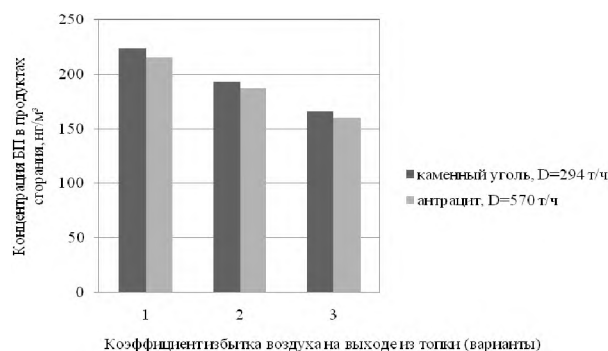


Рис. 3. Содержание бенз(а)пирена в продуктах сгорания каменного угля (Кузнецкий Т) и антрацита (Донецкий АШ) а) при работе котлов на частичной нагрузке

Fig. 3. The content of benz(a)pyrene in the combustion products of coal (Kuznetsky T) and anthracite (Donetsk ASH) a) when the boilers are under partial load

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

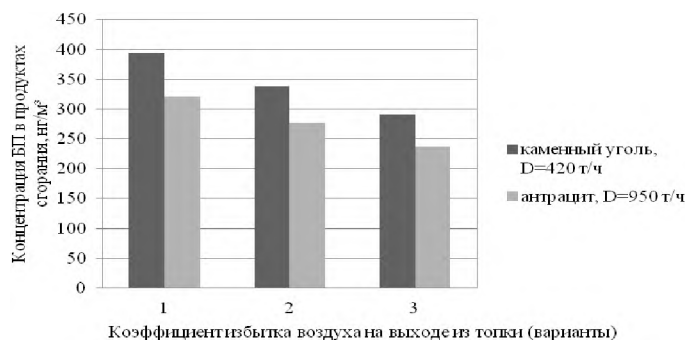


Рис. 3. Содержание бенз(а)пирена в продуктах сгорания каменного угля (Кузнецкий Т) и антрацита (Донецкий АШ) б) при работе котлов на номинальной нагрузке 1 вариант – 1,05 – 1,1; 2 вариант – 1,15 – 1,2; 3 вариант – 1,25 – 1,3

Fig. 3. The content of benz(a)pyrene in the combustion products of coal (Kuznetsky T) and anthracite (Donetsk ASH) b) When the boilers are at rated load 1 option 1.05 1.1; 2 option 1.15 1.2; 3 option 1.25 1.3

Источник: составлено автором. Source: compiled by the author.

При сжигании каменного угля (Кузнецкий Т) с теплотехническими характеристиками $A^H = 0,92(\% \cdot \text{кг})/\text{МДж}$, $W^H = 0,44(\% \cdot \text{кг})/\text{МДж}$, $N^P = 1,5\%$, $V^{daf} = 14\%$, $Q_i^r = 22,06 \text{ МДж/кг}$ в энергетическом котле ТП-87 массовая эмиссия БП составила $(0,6 - 1,2) \cdot 10^{-3}$ т/год. В условиях использования антрацита (Донецкий АШ) с теплотехническими характеристиками в энергетическом котле ТПП-210 $A^H = 1,91(\% \cdot \text{кг})/\text{МДж}$, $W^H = 0,47(\% \cdot \text{кг})/\text{МДж}$, $N^P = 0,5\%$, $V^{daf} = 4\%$, $Q_i^r = 18,23 \text{ МДж/кг}$ массовая эмиссия БП составила $(1,4 - 3,3) \cdot 10^{-3}$ т/год. Следует отметить, что полученные результаты расчетной оценки $C_{\text{бп}}$ в дымовых газах могут быть использованы энергетическими предприятиями на этапе сбора и подготовки экологической информации для обоснования установления технологических показателей выбросов ПАУ в атмосферный воздух.

Выводы

Детальный анализ обобщенных данных о наличии канцерогенных ПАУ в продуктах сгорания при сжигании органического топлива показал прямую корреляционную зависимость между концентрациями БП и СО в дымовых газах котлов. Отмечено, что на интенсивность образования БП значительное влияние оказывает реализация первичных (воздухоохранных) мероприятий, при этом массовые выбросы БП в атмосферный воздух могут превышать исходные значения в 5 – 6 раз из-за увеличения химического недожога, контролируемого по значениям СО в продуктах сгорания котлов.

Разработаны аналитические зависимости для расчетной оценки выбросов БП в атмосферный воздух при сжигании каменного угля (Кузнецкий Т) и антрацита (Донецкий АШ) в энергетических котлах ТП-87 и ТПП-210, отличающиеся тем, что относительная погрешность определения содержания БП в продуктах сгорания с их применением не превышает 15 % по сравнению с нормативной методикой.

Определены массовые выбросы БП как наиболее яркого представителя ПАУ для различных вариантов сжигания топлива и паровой производительности котельных установок, учитывающих режимно-технологические условия топочного процесса и теплотехнические характеристики твердого топлива. Массовая эмиссия БП в диапазоне рассмотренных значений режимно-технологических параметров при сжигании каменного угля (Кузнецкий Т) в котле ТП-87 составила $(0,6 - 1,2) \cdot 10^{-3}$ т/год, в условиях применения антрацита (Донецкий АШ) в энергетическом котле ТПП-210 массовые выбросы БП равны $(1,4 - 3,3) \cdot 10^{-3}$ т/год.

Полученные результаты могут быть применены на теплоэнергетических объектах на стадии подготовки экологической информации для обоснования значений технологических показателей, а также при разработке программы повышения экологической эффективности энергетических предприятий. Таким образом, выполненные оценки концентраций БП в дымовых газах котельных установок, сжигающих каменный уголь (Кузнецкий Т) и антрацит (Донецкий АШ), рекомендуется применять на стадии сбора исходной информации при установлении годовых валовых выбросов и инвентаризации выбросов высокотоксичных веществ на тепловых электрических станциях.

Литература

1. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Альмгрен А.Р и др. Технические и экономические проблемы и риски внедрения наилучших доступных технологий на российских ТЭС // Новое в российской электроэнергетике. 2021. № 1. С. 15-20.
2. Росляков П.В., Черкасский Е.В., Гусева Т.В. и др. Технологическое нормирование объектов теплоэлектроэнергетики: наилучшие доступные технологии и нормы общего действия // Теплоэнергетика. 2021. № 10. С. 1-13.
3. Власенко С.А., Росляков П.В., Сердюков В.А. Методические подходы к определению технологических показателей наилучших доступных технологий при актуализации информационно-технического справочника ИТС 38-2017 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» // Инновации. Наука. Образование. – 2022. № 55. С. 31-39.
4. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Дмитренко В.В., Рудомазин В.В. Особенности актуализированного информационно-технического справочника ИТС 38-2022 «Сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии» // Электрические станции. – 2022. № 12 (1097). С. 42-50.

5. Цирульников Л.М., Конюхов В.Г., Димант И.Н., и др. О содержании канцерогенных веществ в уходящих газах при сжигании газа и мазута // Теплоэнергетика. 1976. № 9. С. 32-35.
6. Соколова Я.И., Цирульников Л.М., Конюхов В.Г. О составе полициклических ароматических углеводородов в продуктах сгорания // Теплоэнергетика. 1983. № 4. С. 17-19.
7. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Ионкин И.Л., Егорова Л.Е. Обеспечение достоверного непрерывного инструментального контроля выбросов маркерных загрязняющих веществ ТЭС в атмосферу // Теплоэнергетика. 2022. № 1. С. 68 – 77.
8. Кондратьева О.Е., Росляков П.В., Недре А.Ю и др. Внедрение систем непрерывного контроля выбросов как часть цифровой трансформации энергетических предприятий // Энергетик. 2020. № 10. С. 3-5.
9. Росляков П.В., Закиров И.А., Ионкин И.Л., и др. Исследование процессов конверсии оксида углерода и бенз(а)пирена вдоль газового тракта котельных установок // Теплоэнергетика. 2005. № 4. С. 44-50.
10. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., и др. Очистка газовых выбросов котельных установок от твердых частиц // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020. № 1. С. 3-9.
11. Huang Y., Wei J., Song J., et al. Determination of low levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil by high performance liquid chromatography with tandem fluorescence and diode array detectors // Chemosphere. 2013. V. 92. № 8. pp. 1010-1016.
12. Lara S., Villanueva F., Martín P., et al. Investigation of PAHs, nitrated PAHs and oxygenated PAHs in PM₁₀ urban aerosols. A comprehensive data analysis // Chemosphere. 2022. V. 294. pp. 133745.
13. Liljelind P., Soderstrom G., Hedman B., et al. Method for multiresidue determination of halogenated aromatics and PAHs in combustion-related samples // Environmental Science and Technology. 2003. V. 37. № 16. pp. 3680.
14. Song Y., Zhang Y., Chen W., et al. The cellular effects of PM_{2.5} collected in Chinese Taiyuan and Guangzhou and their associations with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), nitro-PAHs and hydroxy-PAHs // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2020. V. 191. pp. 110225.
15. Иваницкий М.С. Расчет выбросов бенз(а)пирена при сжигании органического топлива в энергетических котлах ТЭС и котельных // Энергобезопасность и энергосбережение. 2022. № 6. С. 11-14.

Автор публикации

Иваницкий Максим Сергеевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры «Энергетика» филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: mseiv@vandex.ru.

References

1. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Al'mgren AR, et al. Tekhnicheskie i ekonomicheskie problemy i riski vnedreniya nailuchshikh dostupnykh tekhnologii na rossiiskikh TES. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*. 2021;1:15-20.
2. Roslyakov PV, Cherkasskii EV, Guseva TV, et al. Tekhnologicheskoe normirovanie ob"ektov teploelektroenergetiki: nailuchshie dostupnye tekhnologii i normy obshchego deistviy. *Teploenergetika*. 2021;10:-13.
3. Vlasenko SA, Roslyakov PV, Serdyukov VA. Metodicheskie podkhody k opredeleniyu tekhnologicheskikh pokazatelei nailuchshikh dostupnykh tekhnologii pri aktualizatsii informatsionno-tekhnicheskogo spravochnika ITS 38-2017 «Szhiganie topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii. *Innovatsii. Nauka. Obrazovanie*. 2022;55(31-39).
4. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Dmitrenko VV, et al. Osobennosti aktualizirovannogo informatsionno-tekhnicheskogo spravochnika ITS 38-2022 «Szhiganie topliva na krupnykh ustanovkakh v tselyakh proizvodstva energii». *Elektricheskie stantsii*. 2022;12 (1097):42 – 50.
5. Tsiul'nikov LM, Konyukhov VG, Dimant IN. O soderzhanii kantserogennykh veshchestv v ukhodyashchikh gazakh pri szhiganii gaza i mazuta. *Teploenergetika*. 1976;9:32-35.
6. Sokolova YaI, Tsiul'nikov LM, Konyukhov VG. O sostave politsiklicheskikh aromaticeskikh uglevodorodov v produktakh sgoraniya. *Teploenergetika*. 1983;4:17-19.

7. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Ionkin IL. Obespechenie dostovernogo nepreryvnogo instrumental'nogo kontrolya vybrosov markernykh zagryaznyayushchikh veshchestv TES v atmosferu. *Teploenergetika*. 2022;1:68 – 77.
8. Kondrat'eva OE, Roslyakov PV, Nedre AYU, et al. Vnedrenie sistem nepreryvnogo kontrolya vybrosov kak chast' tsifrovoi transformatsii energeticheskikh predpriyatii. *Energetik.* – 2020;10:3-5.
9. Roslyakov PV, Zakirov IA, Ionkin IL, et al. Issledovanie protsessov konversii oksida ugleroda i benz(a)pirena vdol' gazovogo trakta kotel'nykh ustanovok. *Teploenergetika*. 2005;4:44-50.
10. Dmitriev AV, Zinurov VE, Dmitrieva OS, et al. Ochistka gazovykh vybrosov kotel'nykh ustanovok ot tverdykh chastits. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020;1:3-9.
11. Huang Y, Wei J, Song J, et al. Determination of low levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil by high performance liquid chromatography with tandem fluorescence and diode array detectors. *Chemosphere*. 2013;92(8):1010 – 1016.
12. Lara S, Villanueva F, Martín P. Investigation of PAHs, nitrated PAHs and oxygenated PAHs in PM₁₀ urban aerosols. A comprehensive data analysis. *Chemosphere*. 2022;294:133745.
13. Liljelind P, Soderstrom G, Hedman B, et al. Method for multiresidue determination of halogenated aromatics and PAHs in combustion-related samples. *Environmental Science and Technology*. 2003;37(16):3680.
14. Song Y, Zhang Y, Chen W. The cellular effects of PM_{2.5} collected in Chinese Taiyuan and Guangzhou and their associations with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), nitro-PAHs and hydroxy-PAHs. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2020;191:110225.
15. Ivanitskii MS. Raschet vybrosov benz(a)pirena pri szhigani organicheskogo topliva v energeticheskikh kotlakh TES i kotel'nykh. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*. 2022;6:11-14.

Author of the publication

Maxim S. Ivanitskiy – Moscow Power Engineering Institute.

Шифр научной специальности:

2.4.5. Энергетические системы и комплексы (технические науки)

Смежные специальности в рамках группы научной специальности:

2.4.3. Электроэнергетика (технические науки);

2.4.10. Техносферная безопасность (в энергетике)

Получено

14.02.2023 г.

Отредактировано

01.03.2023г.

Принято

01.03.2023г.