

ТОКСИЧНОСТЬ КАНЦЕРОГЕННЫХ ПАУ В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ КОТЛОВ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТЬЮ ДО 1 МВт

Иваницкий М.С.

Филиал федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет
«МЭИ»

в г. Волжском, Россия

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

Резюме: ЦЕЛЬ. В соответствии с новыми требованиями отечественного природоохранного законодательства введены технологические принципы государственного регулирования негативного влияния энергетических предприятий на окружающую среду. Установленные принципы природоохранной деятельности предусматривают технологическое нормирование выбросов на основе внедрения наилучших доступных технологий, а также дифференцирование мер государственного регулирования для обеспечения экологической безопасности объектов теплоэнергетики. В рамках действующего природоохранного законодательства показана необходимость определения нормативов выбросов высокотоксичных веществ, которые обладают канцерогенными свойствами. Рассмотрены основные представители канцерогенных ПАУ, обнаруженные в дымовых газах котлов малой мощности до 1 МВт. МЕТОДЫ. Методы исследования включали обобщение экспериментальных данных и расчетную оценку содержания канцерогенных выбросов, включая бенз(а)пирен в дымовых газах котлов с использованием статистических методов обработки данных. РЕЗУЛЬТАТЫ. Определена необходимость учета вклада вредности канцерогенных ПАУ в системе производственного экологического контроля на теплоэнергетических объектах при работе котлов малой мощности. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Результаты исследования могут найти применение на энергетических предприятиях для реализации требований нового природоохранного законодательства в части технологического нормирования канцерогенных выбросов, в том числе для разработки мероприятий по улучшению показателей экологической эффективности.

Ключевые слова: экологическая безопасность ТЭС; канцерогенные ПАУ; бенз(а)пирен комплексное экологическое разрешение.

Для цитирования: Иваницкий М.С. Токсичность канцерогенных ПАУ в дымовых газах котлов тепловой мощностью до 1 МВт // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 6. С. 83-91. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-83-91.

TOXICITY OF CARCINOGENIC PAHS IN BOILER FLUE GASES THERMAL CAPACITY UP TO 1 MW

MS. Ivanitskiy

Volzhsky Branch of the National Research University
Moscow Power Engineering Institute, Russia

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

Abstract: THE PURPOSE. In accordance with the new requirements of domestic environmental legislation, technological principles of state regulation of the negative impact of energy enterprises on the environment have been introduced. The established principles of environmental protection activities provide for technological regulation of emissions based on the introduction of the best available technologies, as well as differentiation of state regulatory measures to ensure the environmental safety of thermal power facilities. Within the framework of the current environmental legislation, it is shown that it is necessary to determine emission standards for highly toxic substances that have carcinogenic properties. The main representatives of carcinogenic PAHs found in the flue gases of boilers of low power up to 1 MW are considered. METHODS. The research methods included the generalization of experimental data and the

calculated assessment of the content of carcinogenic emissions, including benz(a)pyrene in the flue gases of boilers using statistical data processing methods. RESULTS. The necessity of taking into account the contribution of the harmfulness of carcinogenic PAHs in the system of industrial environmental control at thermal power facilities during the operation of low-power boilers is determined. CONCLUSION. The results of the study can be used at energy enterprises to implement the requirements of the new environmental legislation in terms of technological regulation of carcinogenic emissions, including for the development of measures to improve environmental performance indicators.

Keywords: *environmental safety of thermal power plants; carcinogenic PAHs; benz(a)pyrene; integrated environmental resolution.*

For citation: Ivanitskiy MS. Toxicity of carcinogenic pahs in boiler flue gases thermal capacity up to 1 MW. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(6):83-91. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-6-83-91.

Введение

Сжигание топлива в промышленных теплоэнергетических и водогрейных котлах на тепловых электрических станциях (ТЭС) приводит к образованию оксидов азота (NO_2), диоксида серы (SO_2), оксида углерода (CO), золы твердого топлива, пентаоксида ванадия (V_2O_5), и при определенных режимных условиях, канцерогенные и неканцерогенные полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), к которым также относится бенз(а)пирен (БП). Проведение инструментального анализа ПАУ в продуктах сгорания котлов из-за сложностей методического контроля выполняется только некоторыми специализированными лабораториями [1, 2].

Согласно требования Федерального закона № 219-ФЗ с 01.01.2019 года и приказа Минприроды от 18.04.2018 года № 154 предприятия I категории до 31.12.2024 года обязаны получить комплексное экологическое разрешение (КЭР). В связи с этим, необходимо отметить, что в направлении решения данной задачи энергетическим предприятиям для высокотоксичных веществ I и II классов опасности необходимо определить нормативы допустимых выбросов. Среди выделенных 300 объектов I категории находится 44 газовые и пылеугольные ТЭС. В направлении реализации современного природоохранного законодательства энергетические объекты I категории должны внедрять на производстве наилучшие доступные технологии (НДТ) для повышения экологической эффективности процессов сжигания органического топлива и производства тепловой и электрической энергии [1 – 3].

В работах [1, 3] представлены современные требования к обеспечению технологического нормирования вредных выбросов в окружающую среду от теплоэнергетических объектов, сложности внедрения на действующем производстве НДТ и введение норм общего действия. Рассматриваются технические и экономические проблемы внедрения НДТ на отечественных ТЭС, а также риски, связанные с реализацией государственной природоохранной деятельности. Важным при этом является выполнение требований по обеспечению достоверного непрерывного инструментального контроля выбросов загрязняющих веществ ТЭС в атмосферу.

Необходимо отметить, что наличие в продуктах сгорания органического топлива золы твердого топлива в конверсионных процессах, происходящих в газоходах котельных установок, способствует конденсации на их поверхности ПАУ, в том числе бенз(а)пирена, тем самым оказывает влияние на величину массовых выбросов канцерогенных ПАУ в атмосферу. Степень очистки газовых выбросов от золы твердого топлива в значительной мере определяется параметрами работы и геометрией золоулавливающих устройств, размерами и скоростью движения частиц, массовыми расходами продуктов сгорания. Разработка эффективных технологий задержки вредных веществ в газоочистных аппаратах с различными фильтрующими нагрузками позволит снизить негативное влияние объектов теплоэнергетики на окружающую среду. При этом новые технологические решения должны соответствовать принципам наилучших доступных технологий [3].

В работах [4-6] рассмотрены методические подходы к расчету показателей суммарной и частной вредности продуктов сгорания при сжигании различных

энергетических топлив. Следует отметить, что разработанные методические подходы не учитывают вклад представителей ПАУ, характеризующихся мутагенными и канцерогенными свойствами, к которым в значительной степени, относится БП. В ходе анализа режимных факторов выявлено, что условия сжигания топлива в котлах малой тепловой мощности наиболее благоприятны для образования ПАУ вследствие более низкой температуры топочного процесса по сравнению с энергетическими котлами средней и большой тепловой мощности. В этой связи, актуальность исследований заключается в определении доли БП в массовых выбросах ПАУ для установления нормативов допустимых выбросов высокотоксичных веществ, характеризующихся канцерогенными и мутагенными свойствами для энергетических предприятий, эксплуатирующих котельные установки со значительным негативным воздействием вредных (загрязняющих) выбросов на атмосферный воздух.

Таким образом, на основе обобщенных экспериментальных результатов по инструментальным измерениям выбросов ПАУ выполнено расчетное исследование определения вклада частных показателей вредности (токсичности) ПАУ и БП в суммарный показатель токсичности дымовых газов для обоснования технических решений на стадии подготовки исходных данных в процессе получения КЭР и определения нормативов выбросов высокотоксичных веществ на энергетических предприятиях.

Теоретическая значимость исследований заключается в том, что выполнены расчетные оценки удельного вклада БП в суммарную токсичность дымовых газов, определена доля БП в массовых выбросах ПАУ для формирования исходной информации разработки нормативов выбросов высокотоксичных веществ при сжигании органического топлива в котлах малой тепловой мощности.

Практическая значимость заключается в применении полученных результатов на теплоэнергетических объектах на стадии подготовки заявки и получения комплексного экологического разрешения, а также при установлении нормативов допустимых выбросов высокотоксичных компонентов при сжигании органического топлива, и разработке программы повышения экологической эффективности энергетических предприятий, в том числе для обоснования и создания расчетной методики определения концентрации канцерогенного БП в продуктах сгорания органического топлива для котлов малой тепловой мощности.

Материалы и методы

Инструментальное определение концентрации бенз(а)пирена и других представителей ПАУ в дымовых газах котлов связано со значительными сложностями при отборе и детектировании компонентов газовой пробы. Производственный контроль содержания представителей ПАУ в уходящих газах источников выбросов на энергетических предприятиях осуществляется, как правило, специализированными аналитическими лабораториями. Наиболее приемлемым методом индикации ПАУ при этом является высокоэффективная жидкостная хроматография. Следует отметить, что конверсия продуктов сгорания в газоходах котельных установок в значительной степени влияет на достоверность выполняемых инструментальных измерений ПАУ при сжигании органического топлива. Дополнительные сложности аналитического определения представителей ПАУ в уходящих газах связаны с необходимостью термостатирования газовой пробы при температуре 200 °С. Нарушение методики отбора и хранения пробы на данном этапе приводит к конденсации паров, и как следствие, значительно снижает представительность газовой пробы. Погрешность определения ПАУ в продуктах сгорания составляет порядка 25%. Поэтому на практике широкое применение находят расчетные методы определения бенз(а)пирена в продуктах сгорания органического топлива, учитывающие конструктивные и режимно-технологические особенности котельных установок и теплотехнические характеристики топлива [5].

В работе в качестве объекта исследования рассмотрен стальной водогрейный котел НРС-18-73 со слоевым сжиганием топлива тепловой мощностью 0,73 Гкал/ч. Основные марки топлива, рассмотренные в работе, с теплотехническими характеристиками, приведенными к рабочей массе, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Теплотехнические характеристики топлива

Марка и состав топлива	W ^r , %	A ^d , %	S ^d , %	N ^{daf} , %	Q ^r , МДж/кг
Черемховский	15	34	1,2	1,6	16,4
Тугуйский	7,5	23	0,5	1,1	21,0
Мугунский	22	0	1,2	1,5	17,3

В качестве проектного рассмотрен уголь черемховского месторождения. Массовый расчетный расход угля при номинальной нагрузке котла составляет 277 кг/ч. Тепловая производительность котла принимала значения от $0,5 \leq Q_{\phi} / Q_n \leq 1$, коэффициент избытка воздуха изменялся в пределах $\alpha = 1,3 \div 1,8$, установленных режимной картой работы котла, расчетный расход уходящих газов в зависимости от условий составил $0,71 \div 1,42 \text{ м}^3/\text{с}$. Объемное теплонапряжение топки котла равно $q_V = 668 \text{ кВт/м}^3$ [7 – 9].

Для решения поставленной задачи исследования в работе рассчитывается суммарный показатель вредности $\sum \Pi$ дымовых газов котла, который определен с учетом частных показателей вредности загрязняющих выбросов $\sum \Pi = \sum_{i=1}^n \Pi_i$ в соответствии с рекомендациями [4, 5].

Частный показатель вредности Π_i представляет собой количество граммов вредной примеси m_i , образовавшейся при сжигании 1 г топлива, отнесенной к относительной теплоте сгорания топлива и к относительной токсичности вредной примеси и рассчитывается по соотношению [5]:

$$\Pi_i = \frac{m_i(1-\eta)}{\frac{Q_i^r}{(Q_i^r)_{\text{у.т.}}} \frac{\text{ПДК}_{\text{м.р.}i}}{(\text{ПДК}_{\text{м.р.}})_{\text{зола}}}}, \quad (1)$$

где $Q_i^r, (Q_i^r)_{\text{у.т.}}$ – теплота сгорания соответственно рассматриваемого и условного топлива, МДж/кг (МДж/м³); $\text{ПДК}_{\text{м.р.}i}, (\text{ПДК}_{\text{м.р.}})_{\text{зола}}$ – максимально разовые ПДК соответственно i – ой примеси и золы, мг/м³; η – степень очистки уходящих газов от i – ой примеси перед выбросом в атмосферу.

В процессе определения показателей вредности загрязняющих веществ учитывались следующие режимные параметры и условия работы котла: коэффициент избытка воздуха α , тепловая нагрузка, теплотехнические характеристики топлива.

Обсуждение результатов

Высокая канцерогенная активность БП, несмотря на его низкое содержание в продуктах сгорания, в значительной степени может влиять на суммарную вредность дымовых газов котлов, что особенно проявляется в условиях сжигания углей при малых избытках воздуха и недостаточном уровне объемного и поверхностного теплонапряжения топочной камеры котельной установки. Поэтому обеспечение качественного окисления топлива способствует более полному выгоранию топлива, и как следствие, снижению массового выхода всей группы ПАУ. Следует отметить, что кроме канцерогенного БП в продуктах сгорания углей могут содержаться такие полициклические ароматические углеводороды как хризен, бенз(b)флуорантен, бенз(k)флуорантен, антрацен, бенз(a)антрацен, бенз(g, h, i)перилен, фенантрен, индено (1, 2, 3 -с, d)пирен. Приведенные особенности необходимо учитывать при создании и внедрении систем мониторинга и контроля выбросов вредных загрязняющих веществ на энергетических предприятиях в соответствии с нормативными требованиями охраны окружающей среды [7 – 9].

На рисунке 1 представлены результаты расчета суммарного и частных показателей вредности группы ПАУ, БП, NO₂, SO₂, V₂O₅, золы твердого топлива и СО в зависимости от режимных условий работы котла НРс-18-73 в случае сжигания угля черемховского месторождения.

Необходимо отметить, что расчетная концентрация БП для приведенного варианта твердого топлива при $\alpha = 1,3$ равна 2,39 мкг/м³, что соответствует достаточно значительному вкладу БП в $\sum \Pi$ дымовых газов на уровне 36,9 % по сравнению с долями токсичности NO₂, SO₂, V₂O₅, золы твердого топлива и оксида углерода.

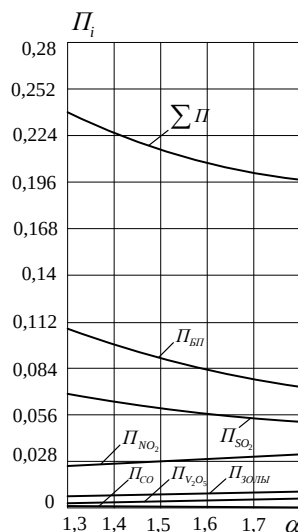


Рис. 1. Суммарный и частные показатели вредности группы ПАУ, БП, NO₂, SO₂, V₂O₅, золы твердого топлива и СО в продуктах сгорания угля черемховского месторождения в зависимости от режимных условий работы котла НРс-18-73

Fig. 1. Total and partial indicators of the harmfulness of PAH, BP, NO₂, SO₂, V₂O₅, solid fuel ash and CO in coal combustion products of the chermkhovsky deposit, depending on the operating conditions of the boiler NRs-18-73

Таким образом, по результатам полученных значений показатель суммарной вредности загрязняющих выбросов в рассмотренных пределах изменения режимных параметров сжигания угля уменьшается на 17,5 %, что подтверждает необходимость обеспечения более полного выгорания топлива, связанного с интенсификацией процессов его окисления. Вклад вредности золы твердого топлива в зависимость от режимных условий в суммарную токсичность дымовых газов составляет 3,1 – 4,6 %, при этом доля вредности равна NO₂ = 10,9 – 15,3 %, вклад SO₂ = 26,4 – 27,7%, а доля СО незначительна и находится на уровне 0,08 %.

Результаты оценки суммарного и частных показателей вредности ПАУ, БП, NO₂, SO₂, V₂O₅, золы твердого топлива и СО в дымовых газах котла НРс-18-73 при сжигании тугуйского угля с учетом влияния режимных факторов представлены на рис. 2.

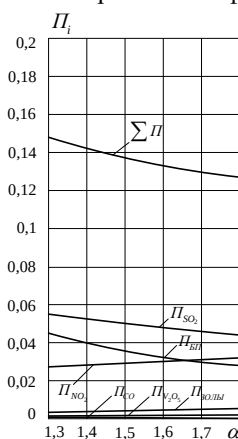


Рис. 2. Суммарные и частные показатели вредности группы ПАУ, БП, NO₂, SO₂, V₂O₅, золы твердого топлива и СО в зависимости от режимных факторов при сжигании угля тугуйского месторождения в котле НРс-18-73

Fig. 2. Total and partial indicators of the harmfulness of the group of PAHs, BP, NO₂, SO₂, V₂O₅, solid fuel ash and CO, depending on the regime factors when burning coal from the tugui deposit in the boiler NRs -18-73

В ходе расчетов установлено, что БП оказывает значительное влияние на формирование $\sum \Pi$ продуктов сгорания. При этом доля частной вредности БП по отношению к суммарному показателю токсичности дымовых газов при $\alpha = 1,3$ составляет 31,9 %, а для $\alpha = 1,8$ равна 22,4 %. Доля вредности, вносимая золой твердого топлива, составляет от 2,4 до 3,4 %, при этом доля токсичности SO_2 в рассмотренных режимных условиях сжигания топлива равна 34,6 – 37,3%, вклад токсичности V_2O_5 оценочно составляет от 0,95 до 1,34%. Следует отметить, что массовая доля пентаоксида ванадия в топливе в среднем не превышала 0,09%, при этом массовая концентрация V_2O_5 равна не более 30 мг/м³.

Зависимость вклада показателя частной вредности ПАУ, NO_2 , SO_2 , V_2O_5 , золы твердого топлива и CO в суммарный показатель токсичности дымовых газов котла НРС-18-73 с учетом теплотехнических характеристик топлива и режимных условий представлена на рис. 3.

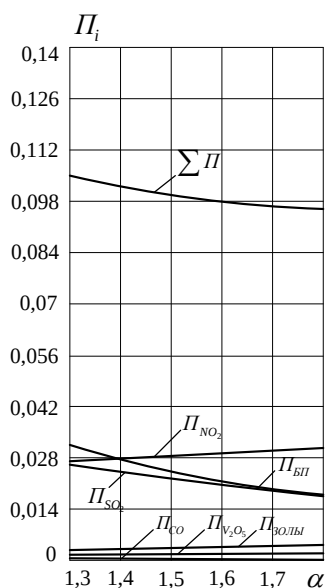


Рис. 3. Суммарный и частные показатели вредности группы ПАУ, БП, NO_2 , SO_2 , V_2O_5 , золы твердого топлива и CO в зависимости от режимных условий сжигания угля мугунского месторождения в котле НРС-18-73

Fig. 3. Total and partial indicators of the harmfulness of the group of PAHs, BP, NO_2 , SO_2 , V_2O_5 , solid fuel ash and CO , depending on the operating conditions of coal combustion of the mugunsky field in the boiler NRs -18-73

Анализ полученных расчетных значений, представленных на рис.3., показывает, что доля БП в $\sum \Pi$ дымовых газов при сжигании мугунского угля, оценочно составляет 22,91 %, доля остальных ПАУ – 12,2%. Необходимо отметить, что вклад вредности, вносимый золой твердого топлива составляет от 4,2 до 5,9 % (при КПД золоулавливания – $\eta_{\text{з}}=0,85$), при этом доля SO_2 в условиях сжигания угля мугунского месторождения равна 22,5 – 26,6%, вклад V_2O_5 достигает уровня от 1,68 до 2,33%. Показано, что вклад вредности БП в формирование суммарного показателя вредности дымовых газов при $\alpha=1,3$ составляет 29,73 %, для $\alpha=1,8$ равен 19,79%, что необходимо учитывать при оценке негативного воздействия вредных (загрязняющих) выбросов, обладающих канцерогенными и мутагенными свойствами, на окружающую среду и подготовке исходных данных при разработке программы улучшения экологических показателей производственной деятельности энергетического предприятия, в том числе при проведении производственного экологического контроля [10 – 15].

Результаты расчетной оценки позволяют сделать вывод о том, что вклад вредности всей группы ПАУ в $\sum \Pi$ дымовых газов при сжигании угля мугунского месторождения при $\alpha=1,3$ составляет 46,61 %, для варианта $\alpha=1,8$ равен 35,11 %.

На рис. 4 представлены результаты, характеризующие изменение относительного вклада БП во вредность всей группы ПАУ с учетом теплотехнических характеристик топлива и режимных факторов сжигания углей рассмотренных марок.

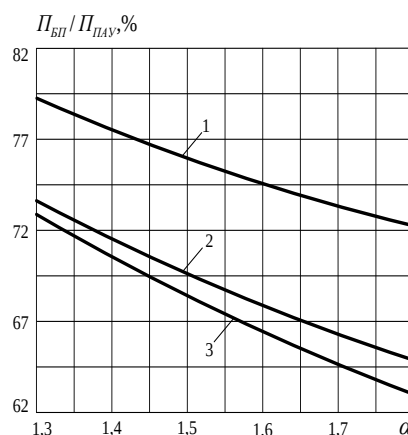


Рис. 4. Зависимость изменения относительного вклада БП во вредность всей группы ПАУ от режимных условий: 1 – Черемховский; 2 – Тугнуйский; 3 – Мугунский

Fig. 4. Dependence of the change in the relative contribution of BP to the harmfulness of the entire PAH group on the regime conditions: 1 – Cheremkhovsky; 2 – Tugnuysky; 3 – Mugunsky

На рисунке 4 показано, что доля вредности БП по отношению к суммарной токсичности всей группы ПАУ в условиях сжигания угля черемховского месторождения при $\alpha=1,3$ составляет 79,36 %, для случая $\alpha=1,8$ равна 72,32 %, а при использовании тугнуйского угля при $\alpha=1,3$ составляет 73,77 %, для варианта $\alpha=1,8$ соответствует 65,21 %, причем в случае применения мугунского угля в аналогичных режимных условиях вклад БП составляет 72,83 % и 62,96 %, соответственно, что подтверждает значительный вклад вредности БП и отдельных канцерогенных ПАУ в общий показатель токсичности уходящих газов котлов. Таким образом, повышение коэффициента избытка воздуха в диапазоне, указанном на рисунке 4, позволяет в зависимости от условий и марки угля снизить суммарную токсичность продуктов сгорания на 7,04 – 9,96 %. Численные значения концентрации БП в сухих продуктах сгорания котла НРс-18-73, рассчитанные в ходе выполнения исследования, подтверждаются удовлетворительной сходимостью с результатами экспериментальных исследований в работах [4 – 6].

Отметим, что при работе котла НРс-18-73 на углях черемховского, тугнуйского и мугунского месторождений, доля, вносимая БП в $\Pi_{ПАУ}$ дымовых газов, в зависимости от режимных условий горения твердого топлива составляет от 19,79 до 36,95 %, что необходимо учитывать при реализации новых принципов регулирования природоохранной деятельности и обеспечения производственных экологических требований на энергетических предприятиях. При этом исследование токсичности отдельных ПАУ и их влияние на общий показатель вредности дымовых газов котлов представляет особый интерес в части обеспечения требований производственного экологического контроля.

Выводы

Выполнены расчетные оценки удельного вклада БП в суммарную токсичность дымовых газов, определена доля БП в массовых выбросах ПАУ для формирования исходной информации разработки нормативов выбросов высокотоксичных веществ при сжигании органического топлива в котлах малой тепловой мощности.

Результаты показали, что вклад ПАУ, включая БП, в суммарный показатель вредности дымовых газов котла НРс-18-73 при сжигании углей черемховского месторождения составил от 51,11 до 56,56 %, тугнуйского – от 35,11 до 40,27 %, мугунского – от 36,11 до 43,86 %, при этом доля БП в суммарной токсичности всей группы ПАУ в зависимости от теплотехнических характеристик углей находится в диапазоне от 62,96 до 79,36 %, что объясняется режимными условиями сжигания топлива в угольных котлах малой тепловой мощности (до 1 МВт), связанных с интенсивным подводом окислителя на начальной стадии горения топлива, характеризующейся высоким массовым выходом всей группы ПАУ. Повышение избытка воздуха на стадии выгорания топлива способствует более полной конверсии ПАУ в топке и по всей длине газохода котельной установки, тем самым приводит к уменьшению частных показателей токсичности выбросов отдельных ПАУ и суммарной вредности продуктов сгорания.

Полученные результаты могут быть применены на теплоэнергетических объектах на стадии подготовки заявки и получения комплексного экологического разрешения, а также при разработке программы повышения экологической эффективности энергетических предприятий, в том числе для обоснования и создания расчетной методики определения концентрации канцерогенного БП в продуктах сгорания органического топлива для котлов малой тепловой мощности. Таким образом, выполненные оценки

значений суммарных и частных показателей токсичности дымовых газов котлов малой тепловой мощности рекомендуется применять на стадии сбора исходной информации при установлении годовых валовых выбросов и инвентаризации выбросов канцерогенных веществ I и II классов опасности на энергетических предприятиях.

Литература

1. Росляков П. В., Кондратьева О. Е., Альмгрен А. Р., Сивцева С. А., Бурченко В. Д. Технические и экономические проблемы и риски внедрения наилучших доступных технологий на российских ТЭС // Новое в российской электроэнергетике. 2021. № 1. С. 15-20.
2. Алехнович А.Н. Бенз(а)пирен как вредный выброс ТЭС. Уровень выбросов и проблемы // Энергетик. 2020. № 10. С. 6-10.
3. 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.
4. Кропп Л.И., Залогин Н.Г., Яновский Л.П. Показатель суммарной вредности продуктов сгорания энергетических топлив // Теплоэнергетика. 1978. №10. С. 47-49.
5. Росляков П.В., Закиров И.А., Ионкин И.Л., и др. Оценка суммарной вредности уходящих газов котельной установки // Теплоэнергетика. 2005. № 9. С. 30-34.
6. Филиппов С.П., Павлов П.П., Кейко А.В., и др. Экспериментальное определение выбросов сажи и ПАУ котельными и домовыми печами // Известия РАН. Энергетика. 2000. № 3. С. 107-117.
7. Куролап С.А., Петросян В.С., Клепиков О.В., и др. Оценка влияния метеорологических параметров на техногенное загрязнение канцерогеноопасными химическими веществами воздушного бассейна города Воронежа // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 2. С. 60 -65.
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. Иваницкий М.С. Токсичность уходящих газов твердотопливного котла КЕ - 25 - 14С // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020.Т. 22. № 1. С. 77-84.
10. Rigamonti L.,Grosso M., Biganzoli L.Environmental assessment of refuse-derived fuel co-combustion in a coal-fired power plant // Journal of Industrial Ecology. 2012. №16(5). pp. 748–760.
11. Yan D.,Wu S., Zhou S. ,Tong G.,Li F., Wang Y., et al. Characteristics, sources and health risk assessment of airborne particulate PAHs in Chinese cities: A review // Environmental Pollution.2019. №248. pp.804 – 814.
12. Kim K.H., Jahan S.A., Kabir E., et al. A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects // Environment International. 2013. №60. pp. 71-80.
13. Hsu W.T., Liu M.C., Hung P.C., et al. PAH emissions from coal combustion and waste incineration // Journal of Hazardous Materials. 2016. №318. pp. 32 – 40.
14. Pei B., Wang X., Zhang Y., et al. Emissions and source profiles of PM_{2.5} for coal-fired boilers in the Shanghai megacity, China // Atmospheric Pollution Research. 2016. V.7. Issue 4. pp. 577-584.
15. Кудряшов А.Н., Коваль Т.В., Ижганайтис М.И. Опыт сжигания композиционного топлива на основе угольного шлама на ТЭЦ Иркутской области // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т 23. № 1. С. 33-45.

Автор публикации

Иваницкий Максим Сергеевич – д-р. техн. наук, профессор кафедры Энергетики филиала «Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Волжском. E-mail: mseiv@yandex.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. Alekhovich AN. Benz(a)piren kak vrednyi vybros TES. Uroven' vybrosov i problem. *Energetik*.2020;10:6-10.
3. Roslyakov PV, Cherkasskii EV, Guseva TV, et al. Tekhnologicheskoe normirovanie ob"ektov teploelektroenergetiki: nailuchshie dostupnye tekhnologii i normy obshchego deistviya. *Teploenergetika*. 2021;10:1-13.
4. Kropp LI, Zalogin NG, Yanovskii LP. Pokazatel' summarnoi vrednosti produktov sgoraniya energeticheskikh topliv. *Teploenergetika*.1978;10:47-49.
5. Roslyakov PV, Zakirov IA, Ionkin IL, et al. Otsenka summarnoi vrednosti ukhodyashchikh gazov kotel'noi ustanovki. *Teploenergetika*.2005;9:30-34.
6. Filippov SP, Pavlov PP, Keiko AV, et al. Eksperimental'noe opredelenie vybrosov sazhi i PAU kotel'nymi i domovymi pechami. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2000;3:107-117.
7. Kurolap SA, Petrosyan VS, Klepikov OV, et al. Otsenka vliyaniya meteorologicheskikh parametrov na tekhnogennoe zagryaznenie kantserogenoopasnymi khimicheskimi veshchestvami vozdušnogo basseina goroda Voronezha. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*.2021;25(2):60-65.
8. Kondrat'eva OE, Roslyakov PV, Nedre AYU, et al. Vnedrenie sistem nepreryvnogo kontrolya vybrosov kak chast' tsifrovoi transformatsii energeticheskikh predpriyati. *Energetik*. 2020;10:3-5.
9. Ivanitskii M.S. Toksichnost' ukhodyashchikh gazov tverdotoplivnogo kotla KE - 25 - 14S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2020;22(1):77-84.
10. Rigamonti L, Grosso M, Biganzoli L.Environmental assessment of refuse-derived fuel co-combustion in a coal-fired power plant. *Journal of Industrial Ecology*. 2012;16(5):748-760.
11. Yan D, Wu S, Zhou S, et al. Characteristics, sources and health risk assessment of airborne particulate PAHs in Chinese cities: A review. *Environmental Pollution*.2019;248:804-814.
12. Kim KH, Jahan S.A, Kabir E,Brown R.J.C.A review of airborne polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and their human health effects. *Environment International*. 2013;60:71-80.
13. Hsu WT, Liu MC, Hung PC., et al. PAH emissions from coal combustion and waste incineration // *Journal of Hazardous Materials*. 2016;318:32-40.
14. Pei B, Wang X, Zhang Y, Hu M, et al. Emissions and source profiles of PM_{2.5} for coal-fired boilers in the Shanghai megacity, China. *Atmospheric Pollution Research*. 2016;7(4):577 – 584.
15. Kudryashov AN, Koval' TV, Izhgannits M.I. Opyt szhiganiya kompozitsionnogo topliva na osnove ugol'nogo shlama na TETs Irkutskoi oblasti. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2021;23(1):33-45.

Author of the publication

Maxim S. Ivanitskiy – Doc. Sci. (Techn.), Prof. of the department of Energy, Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (MPEI).

Получено

26.10.2022г.

Отредактировано

15.11.2022г.

Принято

22.11.2022г.