

ТОКСИЧНОСТЬ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ ТВЕРДОТОПЛИВНОГО КОТЛА KE-25-14C

М.С. Иваницкий

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

в г. Волжском, Россия

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

Резюме: В статье рассмотрены вопросы реализации нового отечественного природоохранного законодательства, предусматривающего разделение в зависимости от степени негативного воздействия на окружающую среду всех энергетических предприятий на 4 категории, введение технологического нормирования, реализуемого на принципах наилучших доступных технологий при условии наличия технической возможности их применения, проведение дифференцирования мер государственного регулирования в области охраны окружающей среды. В рамках данного подхода с целью оценки степени влияния на окружающую среду выбросов котлов малой тепловой мощности KE-25-14C посредством проведения численных экспериментов определены значения суммарного показателя вредности (токсичности) продуктов сгорания, образующихся при сжигании березовского угля марки Б2 (класс обогащения Р). Суммарный показатель вредности выбросов определен с учетом вклада частных показателей вредности компонентов сгорания, представленных оксидами азота, диоксидом серы, монооксидом углерода, золовыми частицами, пентаоксидом ванадия и бенз(а)пиреном. Установлен частный вклад рассмотренных загрязняющих веществ в суммарную токсичность выбросов при реализации режимов сжигания с умеренным и большим химическим недожогом топлива. Даны практические рекомендации применения результатов исследования в качестве исходных данных при установлении технологических нормативов котлов тепловых электрических станций в процессе согласования и получения комплексного экологического разрешения, разработке программы повышения экологической эффективности энергетических предприятий.

Ключевые слова: бенз(а)пирен, вредность продуктов сгорания, экологическая безопасность ТЭС.

Для цитирования: Иваницкий МС. Токсичность уходящих газов твердотопливного котла ке-25-14с// Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 77-84. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-77-84.

TOXICITY OF EXHAUST GASESSOLID FUEL BOILER KE-25-14S

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 article deals with the implementation of the new national environmental legislation, which provides for the division of all energy enterprises into 4 categories depending on the degree of negative impact on the environment, the introduction of technological rationing, implemented on the principles of the best available technologies, provided that they are technically possible to use them, and the differentiation of state regulation measures in the field of environmental protection. Within the framework of this approach, the values of the total index of harmfulness (toxicity) of combustion products formed during the burning of Berezovsky coal of the B2 grade (enrichment class P) were determined by numerical experiments in order to assess the impact on the environment of emissions from low-power boilers KE-25-14C. The total emission hazard index is determined by taking into account the contribution of specific hazard indicators of combustion components represented by nitrogen oxides, sulfur dioxide, carbon monoxide, ash particles, vanadium pentaoxide and

benz(a)pyrene. The private contribution of the considered pollutants to the total toxicity of emissions in the implementation of combustion regimes with moderate and large chemical underburning of fuel is established. Practical recommendations are given for using the results of the study as input data for setting technological standards for boilers of thermal power plants in the process of approval and obtaining a comprehensive environmental permit, and for developing a program to improve the environmental efficiency of energy enterprises.

Keywords: benzo(a)pyrene, harmful combustion products, environmental safety of thermal power plants.

For citation: Ivanitskiy MS. Toxicity of exhaust gases of solid fuel boiler KE-25-14S. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):77-84. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-77-84.

Введение

В соответствии с новым отечественным природоохранным законодательством, вступившим в действие с 01.01.2015 года, тепловые электрические станции (ТЭС) и промышленные предприятия отнесены к источникам негативного воздействия на окружающую среду I-IV типов, вызывающим антропогенное загрязнение атмосферы. В рамках соответствующего подхода с 01.01.2019 года существенно изменяются принципы природоохранной политики государства [1]:

- внедряется технологическое нормирование, основанное на принципах наилучших доступных технологий (НДТ) производства продукции, выполнения работ, определяемых на основе современных достижений науки и техники и наилучшего сочетания критериев достижения целей охраны окружающей среды при условии наличия технической возможности их применения;

- проводится дифференцирование мер государственного регулирования в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности в зависимости от степени негативного воздействия предприятия на окружающую среду.

При этом в качестве маркерных загрязняющих веществ для энергетических установок ТЭС приняты оксиды азота NO_x (в пересчете на NO_2), диоксид серы (SO_2), монооксид углерода (CO) и твердые частицы. Приведенные маркерные вещества характерны для котлов, сжигающих уголь [2, 3].

Известно, что пылеугольные котлы характеризуются более высоким содержанием бенз(а)пирена (БП) в уходящих газах, чем котлы, сжигающие природный газ или мазут [4–6]. Наличие БП в уходящих газах объясняется прежде всего незавершенностью процесса горения топлива в топке котла, а в ряде случаев, неполной конверсией БП и СО в газовом тракте котельной установки [4]. Вклад токсичности маркерных веществ, пентаоксида ванадия (V_2O_5) и БП в суммарную вредность продуктов сгорания можно оценить путем расчета частных и суммарного показателя вредности дымовых газов и таким образом определить степень влияния каждого отдельного вредного вещества на загрязнение атмосферного воздуха [5,6]. При этом организация мониторинга выбросов загрязняющих атмосферу веществ для оценки вредности продуктов сгорания может осуществляться в соответствии с [7-9]. Целью данной работы является расчетная оценка концентрации БП в продуктах сгорания березовского угля марки Б2 (класс обогащения Р) и оценка вклада БП, NO_2 , SO_2 , CO, V_2O_5 и золовых частиц в суммарную вредность уходящих газов.

Численное исследование

Объектом исследования, для которого проводилось определение показателей суммарной и частных вредностей продуктов сгорания являлся твердотопливный котел KE-25-14С тепловой мощностью 15 Гкал/ч (17,5 МВт) с естественной циркуляцией со слоевыми механическими топками. Основным топливом является березовский уголь марки Б2 (класс обогащения Р) со следующими минеральными и горючими характеристиками, приведенными к рабочей массе: $w^r = 33,0\%$, $A^r = 4,7\%$, $C^r = 44,2\%$, $H^r = 3,1\%$, $S^r = 0,2\%$, $O^r = 14,4\%$, $N^r = 0,4\%$, $Q_i^r = 15,66$ МДж/кг. Расход угля в номинальном режиме работы 4421 кг/ч. В качестве варьируемых режимных параметров используется коэффициент избытка воздуха на выходе из слоевой топki в диапазоне $\alpha = 1,2 \div 1,7$. Тепловая нагрузка котла изменялась в пределах от $0,5 \leq Q_{\text{ф}} / Q_{\text{н}} \leq 1$.

Расчетные значения теплонапряжения топочного объема камеры $q_v = 392$ кВт/м³, поверхностное теплонапряжение топочной камеры $q_f = 1,4$ МВт/м². Объемный расход уходящих газов в исследованном диапазоне коэффициента избытка воздуха варьировался в пределах 11,6÷23,2 м³/с. Относительные потери тепла с продуктами сгорания при $Q_{\phi} / Q_n = 1$, равны $q_2 = 10,4$ %. Коэффициент полезного действия котла – 84,9 %.

В рамках оценки суммарного вредного воздействия продуктов сгорания котлов ТЭС на окружающую среду используется показатель суммарной вредности $\sum \Pi$, который учитывает частные показатели токсичности выбросов $\sum \Pi = \sum_{i=1}^n \Pi_i$ [5, 6].

Показатель частной вредности бенз(а)пирена определяется по зависимости [6]:

$$\Pi_{\text{БП}} = \frac{4,387 \cdot 10^{-3} C_{\text{БП}} V_{\Gamma} (1 - \eta_{\text{БП}})}{Q_i^r \text{ПДК}_{\text{СС}}^{\text{БП}}}, \quad (1)$$

где V_{Γ} – объем дымовых газов, образующихся при сжигании 1 кг угля при нормальных условиях, м³/кг; $\text{ПДК}_{\text{СС}}^{\text{БП}}$ – среднесуточная предельно допустимая концентрация БП, мг/м³; $\eta_{\text{БП}}$ – степень задержки БП в системе газоочистки.

Отметим, что для бенз(а)пирена установлены только среднесуточные предельно допустимые концентрации, поэтому в выражении (1) БП соотнесен со значением ПДК нетоксичной пыли, равным $\text{ПДК}_{\text{СС}} = 0,15$ мг/м³.

Частная вредность токсичных веществ (оксидов азота NO₂, монооксида углерода СО) рассчитывается по уравнению [6]:

$$\Pi_i = \frac{1,462 \cdot 10^{-2} C_i V_{\Gamma} (1 - \eta)}{Q_i^r \text{ПДК}_{\text{м.р}}}, \quad (2)$$

где $\text{ПДК}_{\text{м.р.}}$ – максимально разовая предельно допустимая концентрация вредного вещества, мг/м³; η – степень очистки уходящих газов от i -ой примеси перед выбросом в атмосферу (в долях).

Определение показателей частной токсичности пентаоксида ванадия, золы и диоксида серы осуществляется на основе [6] и с учетом содержания примеси в топливе [5].

Оценка концентрации БП в сухих дымовых газах котлов малой тепловой мощности (до 20 Гкал/ч) $C_{\text{БП}}$, мг/м³, при слоевом сжигании твердых топлив, приведенная к избытку воздуха в газах $\alpha = 1,4$, проводилась с помощью выражения:

$$C_{\text{БП}} = 10^{-3} \left(\frac{A \cdot Q_i^r}{e^{2,5\alpha}} + \frac{R}{t_H} \right) \prod_{i=1}^n K_i, \quad (3)$$

где A – параметр, характеризующий тип колосниковой решетки и вид топлива (для углей и сланцев $A = 2,5$); Q_i^r – теплота сгорания топлива, МДж/кг; R – коэффициент, характеризующий температурный уровень экранов; t_H – температура насыщенного пара на выходе из барабана котла, °С (для $t_H \geq 150$ °С, $R = 350$); $\prod_{i=1}^n K_i = K_{\text{д}} \cdot K_{\text{зу}}$ – произведение коэффициентов для учета нагрузки котла, эффективности золоулавливающих устройств.

При расчете содержания оксидов азота, C_{NO_2} мг/м³, в продуктах сгорания угля для твердотопливных слоевых котлов малой тепловой мощности (до 20 Гкал/ч), учитывались следующие режимные параметры и условия: коэффициент избытка воздуха и степень измельчения топлива.

Обсуждение результатов

Повышение нагрузки котла способствует улучшению условий более полного выгорания топлива в топке, что характеризуется уменьшением содержания углеводородов в продуктах сгорания. График зависимости изменения содержания БП в продуктах сгорания угля от относительной паровой нагрузки котла КЕ-25-14С приведен на рис. 1.

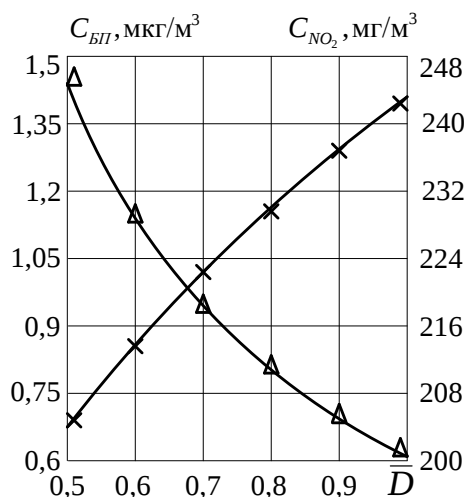


Рис. 1. Расчетная зависимость изменения содержания БП и NO_2 в продуктах сгорания березовского угля от относительной паровой нагрузки котла KE-25-14C

Увеличение нагрузки котла от 50 до 100 % приводит к снижению концентрации БП в уходящих газах до $0,61 \text{ мкг/м}^3$. таким образом, содержание БП в продуктах сгорания уменьшается на 56,5 %. Концентрация оксидов азота при повышении нагрузки до номинального уровня возрастает от 204 до 243 мг/м^3 , что соответствует 16 % росту в относительных значениях. Отметим, что удельный выход оксидов азота для номинальной нагрузки котла KE-25-14C при $\alpha=1,2$ составил $0,293 \text{ г/МДж}$, а для коэффициента избытка воздуха на выходе из топки $\alpha=1,6$ равен $0,329 \text{ г/МДж}$.

Результаты расчета частных показателей вредности БП, оксидов азота NO_2 и серы SO_2 , монооксида углерода CO в зависимости от коэффициента избытка воздуха на выходе из топочной камеры при номинальном режиме тепловой нагрузки котла KE-25-14C при сжигании березовского угля приведены на рис. 2.

Для представленного варианта сжигания топлива содержание БП в номинальном режиме работы котла равно $0,41 \text{ мкг/м}^3$. При этом удельный вклад БП в суммарную вредность продуктов сгорания равен 2,9 %. Концентрация оксидов азота для коэффициента избытка воздуха $\alpha=1,2$ составляет 179 мг/м^3 , при $\alpha=1,6$ содержание равно 206 мг/м^3 . Суммарная вредность продуктов сгорания для $\alpha=1,2$ равна 0,0431, при увеличении коэффициента избытка воздуха до 1,7 вредность выбросов снижается на 21,6 %; доля токсичности, вносимая CO , при $\alpha=1,7$ равна 0,9 %. Доля токсичности оксидов азота при этом равна 55,9 %. Минимальный вклад частной вредности NO_2 в данном режиме работы котла KE-25-14C составляет 38,3 %.

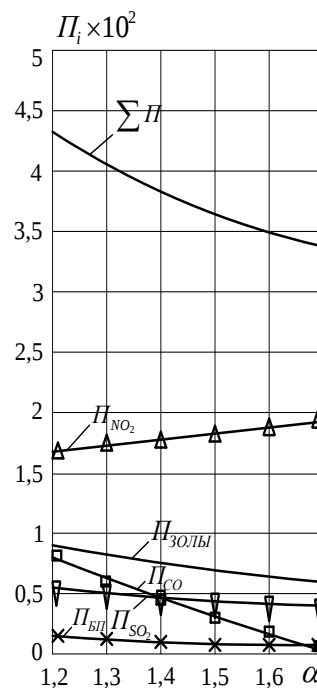


Рис. 2. Изменение показателей частных вредностей продуктов сгорания котла КЕ-25-14С в зависимости от коэффициента избытка воздуха на номинальном режиме тепловой нагрузки

Характер изменения показателей частных вредностей БП, NO_2 , SO_2 , CO , V_2O_5 и золы в продуктах сгорания котла КЕ-25-14С при сжигании березовского угля в зависимости от расхода топлива представлено на рис. 3.

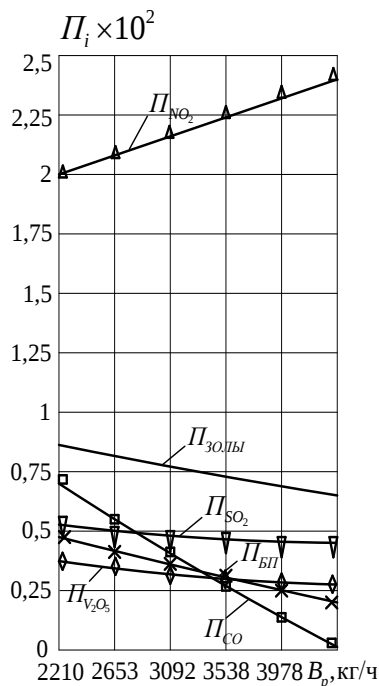


Рис. 3. Изменение показателей частных вредностей БП, NO_2 , SO_2 , CO , V_2O_5 и золы в продуктах сгорания котла КЕ-25-14С в зависимости от расхода топлива

Расчетами установлено, что для режима с большим химическим недожогом топлива $q_3 = 0,15\%$, вклад монооксида углерода CO в суммарную токсичность выбросов равен 22,9 % (концентрация CO в уходящих газах 148 мг/м^3), для режима горения с малым химическим недожогом (содержание CO в продуктах сгорания $10 - 20 \text{ мг/м}^3$) доля вредности CO составляет не более 1%. Анализ данных продемонстрированных на рис. 3. позволяет заключить, что для $B_p = 2210 \text{ кг/ч}$ вклад БП

в суммарную вредность дымовых газов равен 9,5 % (при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1,6$), доля NO_2 равна 40,4 %, при дальнейшем увеличении нагрузки до номинального режима работы котла $B_p = 4421 \text{ кг/ч}$ доля БП снижается до 5 %, вклад частной вредности оксидов азота увеличивается до 59,9 %. Доля, учитывающая частную токсичность оксидов серы SO_2 для приведенных режимов составляет 10,9 и 10,6 %, соответственно. Отметим, что концентрация оксидов серы в продуктах сгорания березовского угля при увеличении коэффициента избытка воздуха на выходе из топки котла от 1,2 до 1,7 снижается в пределах от 348 до 271 мг/м^3 за счет разбавления избыточным воздухом. Для вышеперечисленных концентраций частная вредность SO_2 в продуктах сгорания угля равна 0,0054 и 0,0042, соответственно. Таким образом, максимальный вклад частной вредности оксидов серы в суммарную токсичность дымовых газов котла КЕ-25-14С не превышает 13,6 %.

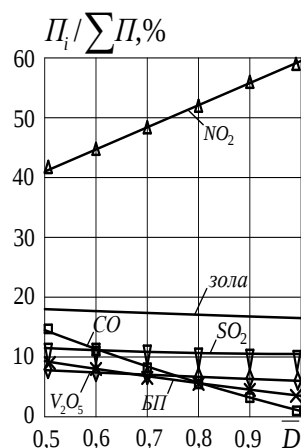


Рис. 4. Вклад частных вредностей БП, NO_2 , SO_2 , CO , V_2O_5 и золы в суммарную токсичность продуктов сгорания березовского угля в зависимости от относительной паровой нагрузки котла КЕ-25-14С для режима с умеренным недожогом топлива

Зависимость, приведенная на рис.4., характеризует вклад частных вредностей V_2O_5 и золы в общую токсичность продуктов сгорания березовского угля в зависимости от изменения относительной паровой нагрузки котла для режима с умеренным недожогом топлива. Отметим, что вклад частной вредности пентаоксида ванадия V_2O_5 в суммарную токсичность уходящих газов в рассмотренном диапазоне изменения нагрузок равен 7,1 – 7,3 %. Доля частной вредности, вносимая золовыми частицами, составляет от 16,5 до 17,1 %. Для режима работы котла КЕ-25-14С с умеренным недожогом топлива при относительной среднегодовой нагрузке $\bar{D} = 0,9$ вклад частных вредностей примесей продуктов сгорания соответствует распределению: БП – 5,5 %, NO_2 – 54,9 %, SO_2 – 10,5 %, CO – 5,7 %, V_2O_5 – 7,0 %, зола – 16,4 %.

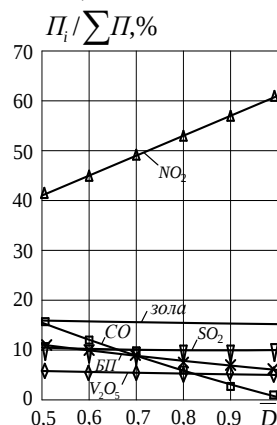


Рис. 5. Вклад частных вредностей БП, NO_2 , SO_2 , CO , V_2O_5 и золы в суммарную токсичность продуктов сгорания березовского угля в зависимости от относительной паровой нагрузки котла КЕ-25-14С для режима с большим недожогом топлива

Относительный вклад частных вредностей БП, NO₂, SO₂, CO, V₂O₅ и золы в суммарную токсичность дымовых газов в зависимости от изменения относительной паровой нагрузки котла КЕ-25-14С для режима с большим недожогом топлива представлен на рис. 5. Таким образом, для приведенного режима сжигания березовского угля вклад частных вредностей примесей уходящих газов соответствует следующему распределению: БП – 5,9 %, NO₂ – 61,1 %, SO₂ – 10 %, CO – 0,7 %, V₂O₅ – 6,7 %, зола – 15,6 %. Расчетные концентрации БП в продуктах сгорания котла КЕ-25-14С согласуются с экспериментальными данными, представленными в работах [4-6].

Приведенные данные указывают на желательность учета содержания БП в продуктах сгорания при определении суммарной вредности уходящих газов слоевых твердотопливных котлов. Необходимо отметить, что БП является канцерогенным представителем ПАУ, его наличие в окружающей среде используется в качестве индикаторного показателя загрязнения атмосферы ПАУ [10-15]. При этом канцерогенное действие БП сохраняется при содержании в воздухе ниже предельно допустимой концентрации, что необходимо учитывать при проведении периодического контроля вредных выбросов.

Выводы

Суммарная вредность продуктов сгорания слоевого отопительного котла КЕ-25-14С тепловой мощностью 15 Гкал/ч для наиболее неблагоприятных режимов сжигания березовского угля марки Б2 на 9,5-10,6% обусловлена частной токсичностью канцерогенного БП, для рабочих режимов горения топлива, соответствующих режимной карте котла, частный вклад БП составляет 2,9-5,9%. Полученные результаты по оценке суммарной токсичности уходящих газов, характеризующейся частными вредностями NO₂, SO₂, CO и золы, могут быть использованы при установлении технологических нормативов ТЭС и промышленных предприятий в процессе согласования и получения комплексного экологического разрешения в рамках внедрения в отечественной теплоэнергетике принципов наилучших доступных технологий.

Литература

1. Росляков П.В., Кондратьева О.Е. Первоочередные мероприятия по реализации нового экологического законодательства // Новое в российской электроэнергетике. 2016. № 5. С. 6-17.
2. Кондратьева О.Е., Росляков П.В., Гусева Т.В., Локтионов О.А. Основные задачи энергетических предприятий при получении комплексных экологических разрешений // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 4. С. 41-45.
3. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Боровкова А.М. Нормативно-правовое и методическое обеспечение перехода на наилучшие доступные технологии в теплоэнергетике // Теплоэнергетика. 2018. № 5. С. 85-92.
4. Росляков П.В., Закиров И. А., Ионкин И. Л., Егорова Л. Е. Исследование процессов конверсии оксида углерода и бенз(а)пирена вдоль газового тракта котельных установок // Теплоэнергетика. 2005. № 4. С. 44-50.
5. Кропп Л.И., Залогин Н.Г., Яновский Л.П. Показатель суммарной вредности продуктов сгорания энергетических топлив // Теплоэнергетика. 1978. №10. С. 47-49.
6. Росляков П.В., Закиров И.А., Ионкин И.Л., Егорова Л.Е. Оценка суммарной вредности уходящих газов котельной установки // Теплоэнергетика. 2005. № 9. С. 30-34.
7. Кондратьева О.Е., Росляков П.В. Основные стадии внедрения систем непрерывного контроля и учета выбросов в атмосферу на ТЭС // Электрические станции. 2016. № 9(1022). С. 25-29.
8. Кондратьева О.Е., Росляков П.В., Бурдюков Д.А., и др. Рекомендации по выбору газоаналитического оборудования для систем непрерывного контроля и учета выбросов тепловых электростанций // Теплоэнергетика. 2017. № 10. С. 43-50.
9. Росляков П.В., Кондратьева О.Е., Кубышева Л.Л. Организация непрерывного контроля и учета вредных выбросов в атмосферу на ТЭС // Электрические станции. 2015. № 6 (1007). С. 26-31.
10. Иваницкий М.С. Особенности рассеивания выбросов бенз(а)пирена от теплогенерирующих установок малой тепловой мощности // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 12-18.
11. Gerasimov G. Modeling study of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans behavior in flue gases under electron beam irradiation // Chemosphere. 2016. Vol. 158. P. 100-106.
12. Li J., Li X., Zhou C., Li M., Lu S., Yan J., Qi Z. Study on the influencing factors of the distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in condensable particulate matter // Energy and Fuels. 2017. V.31. № 12. pp. 13233-13238.

13. Yeo B.G., Takada H., Hosoda J., Kondo A., Yamashita R., Saha M., Maes T. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and hopanes in plastic resin pellets as markers of oil pollution via international pellet watch monitoring // Archives of Environmental Contamination and Toxicology. 2017. V.73. № 2. pp. 196-206.

14. Hayakawa K., Tang N., Nagato E.G., Toriba A., Sakai S., Kano F., Goto S., Endo O., Arashidani K.-I., Kakimoto H. Long term trends in atmospheric concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons and nitropolycyclic aromatic hydrocarbons: a study of Japanese cities from 1997 to 2014 // Environmental Pollution. 2018.V.233. pp. 474-482.

15. Reizer E., Csizmadia I.G., Viskolcz B., Fiser B., Palotás Á.B. Formation mechanism of benzo(a)pyrene: one of the most carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) // Molecules. 2019.V.24. № 6. P. 1040.

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. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE. Pervoocherednye meropriyatiya po realizatsii novogo ekologicheskogo zakonodatel'stva. *Novoe v rossiiskoi elektroenergetike*. 2016;5:6-17.

2. Kondrat'eva OE, Roslyakov PV, Guseva T.V, et al. Osnovnye zadachi energeticheskikh predpriyatii pri poluchenii kompleksnykh ekologicheskikh razreshenii. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2018;22(4):4-45.

3. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Borovkova AM. Normativno-pravovoe i metodicheskoe obespechenie perekhoda na nailuchshie dostupnye tekhnologii v teploenergetike. *Teploenergetika*. 2018;5:85-92.

4. 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.

5. Kropp LI, Zalogin NG, Yanovskii LP. Pokazatel' summarnoi vrednosti produktov sgoraniya energeticheskikh topliv. *Teploenergetika*. 1978;10:47-49.

6. Roslyakov PV, Zakirov IA, Ionkin I.L, et al. Otsenka summarnoi vrednosti ukhodyashchikh gazov kotel'noi ustanovki. *Teploenergetika*. 2005;9:30-34.

7. Kondrat'eva OE, Roslyakov PV. Osnovnye stadii vnedreniya sistem nepreryvnogo kontrolya i ucheta vybrosov v atmosferu na TES. *Elektricheskie stantsii*. 2016;9(1022):25-29.

8. Kondrat'eva OE, Roslyakov PV, Burdyukov DA, et al. Rekomendatsii po vyboru gazoanaliticheskogo oborudovaniya dlya sistem nepreryvnogo kontrolya i ucheta vybrosov teplovykh elektrostantsii. *Teploenergetika*. 2017;10:43-50.

9. Roslyakov PV, Kondrat'eva OE, Kubysheva LL. Organizatsiya nepreryvnogo kontrolya i ucheta vrednykh vybrosov v atmosferu na TES. *Elektricheskie stantsii*. 2015;6(1007):6-31.

10. Ivanitskii MS. Osobennosti rasseivaniya vybrosov benz(a)pirena ot teplogeneriruyushchikh ustanovok maloi teplovoi moshchnosti. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*. 2016;5-6:12-8.

11. Gerasimov G. Modeling study of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans behavior in flue gases under electron beam irradiation. *Chemosphere*. 2016;158:100-106.

12. Li J, Li X, Zhou C, et al. Study on the influencing factors of the distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in condensable particulate matter. *Energy and Fuels*. 2017;31(12):13233-13238.

13. Yeo BG, Takada H, Hosoda J, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and hopanes in plastic resin pellets as markers of oil pollution via international pellet watch monitoring. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 2017;73(2):196-206.

14. Hayakawa K, Tang N., Nagato E.G., et al. Long term trends in atmospheric concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons and nitropolycyclic aromatic hydrocarbons: a study of Japanese cities from 1997 to 2014. *Environmental Pollution*. 2018;233:474-482.

15. Reizer E, Csizmadia IG, Viskolcz B, et al. Formation mechanism of benzo(a)pyrene: one of the most carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). *Molecules*. 2019;24(6):1040.

Author of the publication

Maxim S. Ivanitskiy – Volzhsky Branch of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russia. E-mail: mseiv@yandex.ru.