

Исследование способов снижения выбросов CO и NO в установке для экологически безопасной утилизации резины

© 2021. И. А. Зырянов, к. т. н., доцент, А. Г. Будин, к. т. н., доцент,
А. П. Позолотин, к. т. н., доцент, А. С. Владыкин, аспирант,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: b185@mail.ru

Проблемы низкой эффективности и большого количества вредных выбросов при сжигании промышленных отходов и твёрдых бытовых отходов в существующих крематорах, инсинераторах и других мусоросжигающих установках, являются актуальными в экологии. Важной задачей является наиболее эффективная организация сжигания в таких установках. В статье приводятся результаты исследования оптимизации горения составляющих промышленных отходов (на примере резины) на основании традиционных решений, используемых при организации топок (слоевое сжигание, сжигание в вихревом потоке, рециркуляция продуктов сгорания), а также системы управления горением путём воздействия электростатического поля. Получены значения массового выхода CO и NO при различных способах подачи воздуха в камеру сгорания и параметрах электростатического поля, проведено сравнение полноты сгорания. Использование электростатического поля с разностями потенциалов в 3–4 кВ позволило снизить скорость образования CO в продуктах сгорания на величину до 50%, а NO – практически до нуля.

Ключевые слова: твёрдые бытовые отходы, мусоросжигающая установка, камера сгорания, выбросы, электростатическое поле.

Ways to reduce CO and NO emissions in the installation for environmentally friendly rubber incineration

© 2021. I. A. Zyryanov ORCID: 0000-0003-4843-4302, A. G. Budin ORCID: 0000-0003-2771-1876,
A. P. Pozolotin ORCID: 0000-0003-3130-2573, A. S. Vladykin ORCID: 0000-0001-7980-2433,
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: b185@mail.ru

The problems of low efficiency and a large amount of harmful emissions during the industrial solid waste incineration in existing cremators, incinerators and other waste incineration plants are urgent in the environmental protection activity. An important task is the efficient organization of combustion in such installations. The article presents research results of the optimization of industrial waste components (rubber) combustion based on traditional solutions used in the furnaces organization (layer combustion, combustion in a vortex flow, combustion products recirculation), as well as combustion control systems by electrostatic field. The values of the CO and NO mass yield were obtained for various methods of air supply to the combustion chamber and the electrostatic field parameters; the combustion efficiency was compared. The use of an electrostatic field with potential differences of 3–4 kV made it possible to reduce the CO formation rate in the combustion products by 50% and NO formation rate to zero.

Keywords: solid waste incineration, waste incineration plant, combustion chamber, emissions, electrostatic field.

Проблема утилизации промышленных отходов и твёрдых бытовых отходов (ТБО) не утрачивает своей актуальности – полигоны переполнены, а доля вторичного использования отходов в Российской Федерации (РФ) не превышает 30% [1]. В связи с этим одним из наиболее эффективных вариантов утилизации, а также очистки уже имеющихся по-

лигонов в настоящее время является сжигание ТБО [2]. При этом у данного метода есть ряд существенных недостатков: зачастую отходы сами по себе горят плохо (для их сжигания требуется дополнительно использовать дизельное топливо или газ), при сгорании в атмосферу выделяются большое количество токсичных веществ.

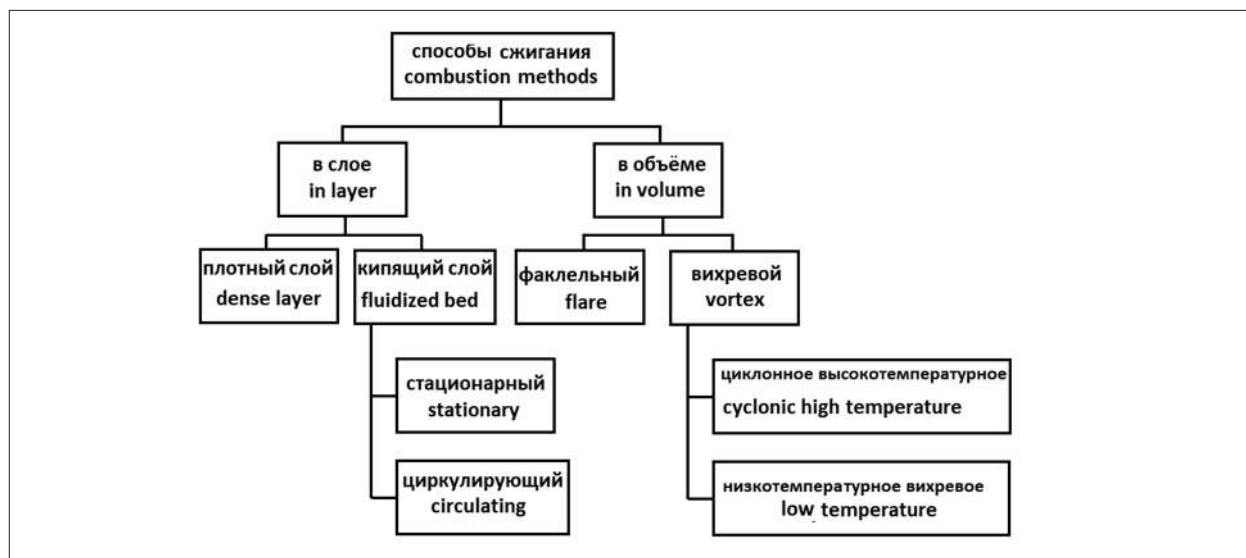


Рис. 1. Способы сжигания топлива
Fig. 1. Fuel combustion methods

В настоящее время разработаны способы оптимизации горения, характеризующиеся высокой эффективностью процесса: это сжигание в слое и в объёме. Среди этих способов имеется несколько разновидностей, которые отличаются по ряду аэродинамических признаков, схема способов сжигания приведена на рисунке 1 [3, 4].

В соответствии с аэродинамической схемой горения в камере, тепловые установки подразделяют на слоевые, факельные и вихревые [4]. В целом, в промышленной теплоэнергетике и в сфере сжигания отходов чаще применяют факельное сжигание. Вихревой способ и кипящий слой применяют реже [4]. В настоящей работе применён комбинированный способ сжигания, который вбирает в себя положительные качества сжигания в плотном слое и в объёме с вихревой закруткой и рециркуляцией.

В независимости от способа сжигания, повышение полноты сгорания достигается путём предварительной подготовки топлива, а также подбором оптимальных режимов подачи окислителя [5].

Менее разработанные методы оптимизации горения – воздействие физических полей, в частности электрического поля. Авторы [6] отмечают снижение доли сажи и размеров частиц при воздействии поля, что свидетельствует о возможности управления сажеобразованием. В работах [7–9] показана возможность управления образованием NO и CO. Отмечается влияние конфигурации и напряжённости поля на концентрации данных

веществ в продуктах сгорания. В работе [10] показана возможность управления полнотой сгорания полимерных материалов путём воздействия электрического поля на зону горения.

Целью работы являлось сравнение эффективности различных методов управления горением в мусоросжигающей установке, оцениваемое по возможности снижения выбросов CO и NO.

Объекты и методы исследования

Сравнение различных методов оптимизации сжигания ТБО производилось на специально созданном экспериментальном стенде, который позволяет организовать горение в различных аэродинамических условиях (рис. 1), а также создавать электростатическое поле в зоне горения.

Общая схема лабораторного образца мусоросжигающей установки для экологически чистой утилизации резины и других ТБО представлена на рисунке 2.

Основные элементы установки: 1) двойная камера сгорания с зонами загрузки ТБО и отвода продуктов сгорания; 2) тракт подачи воздуха; 3) электрополевая система.

Камера сгорания состоит из двух частей: внутренней, в которой происходит непосредственное сжигание ТБО; внешней, необходимой для организации рециркуляции продуктов сгорания.

Внутренняя и внешняя камеры расположены коаксиально друг относительно друга.

Процесс горения организован во внутренней камере, внешняя же служит для организации процесса рециркуляции продуктов сгорания. В нижней части внутренней камеры сгорания расположена керамическая колосниковая решётка с отверстиями для подачи воздуха. Свободное пространство под колосниковой решёткой организовано для подведения систем подачи воздуха, а так же удаления несгоревших остатков ТБО. Внутренняя и внешняя камеры электрически развязаны. Для этого нижние их части не соединены напрямую, верхняя часть соединена через керамическую крышку, а топливозагрузочный канал, проходящий сквозь обе камеры, изолирован от внешней камеры керамической вставкой.

Тракт подачи воздуха организован с двумя направлениями: 1) вдув воздуха снизу, через колосниковую решётку; 2) осевой вдув во внутреннюю камеру сгорания (для организации завихрения).

Вдув воздуха снизу реализован через гибкий изоляционный шланг, заканчивающийся металлическим делителем потока с несколькими форсунками, располагающимися под отверстиями колосниковой решётки. Данный делитель потока изолирован от других частей установки и используется как электрод для электрополевой системы. Осевой вдув осуществляется через металлическую трубку, входящую в камеру сгорания под углом, через отверстие рядом с топливозагрузочным

каналом. Этот дополнительный тракт подачи воздуха служит для закрутки пламени в камере сгорания и интенсификации процесса горения. Элементы тракта подачи воздуха через регулирующие расход краны с помощью шлангов присоединены к компрессору. Расход воздуха контролировался ротаметром РМ-4ГУЗ.

Электрополевая система включает в себя высоковольтный источник и два электрода, помещаемые в зону горения, при этом один электрод расположен под колосниковой решёткой (это изолированный от других частей установки делитель потока), а другой электрод расположен над сжигаемым топливом, выполнен в виде стержня, изготовленного из жаропрочной стали, и помещён в керамический изолятор.

Верхний электрод установлен вдоль оси трубы, через которую выходят продукты сгорания. Нижний конец электрода находится над загруженными ТБО на высоте 10 см от колосниковой решётки. При этом между электродами создаётся постоянная разность потенциалов источником высокого напряжения НСР 35-35000.

Отбор пробы продуктов сгорания осуществляется на верхнем конце дымохода. Для измерения концентрации вредных выбросов (NO, CO) использовался газоанализатор ОРТИМА-7, который позволял получать данные о выбросах в непрерывном режиме.

Порядок проведения эксперимента следующий: с помощью кранов создаётся заданный поток воздуха в камере сгорания и запускается запись показаний газоанализатора. Далее методика проведения эксперимента и обработки результатов аналогична приведённой в [10].

Примером горючего для сжигания в экспериментах служит резина (автомобильные камеры), как вариант одного из самых распространённых промышленных отходов. По различным оценкам, в России ежегодно образуется около 800 тыс. т изношенных шин, что является одной из причин несанкционированных свалок.

Результаты и обсуждение

В первой серии экспериментов было рассмотрено влияние способов подачи воздуха на выбросы CO, NO. Результаты приводятся в относительных величинах (β), за начальный уровень принято значение образования целевого вещества на единицу массы сгорающего топлива при минимально возможном расходе

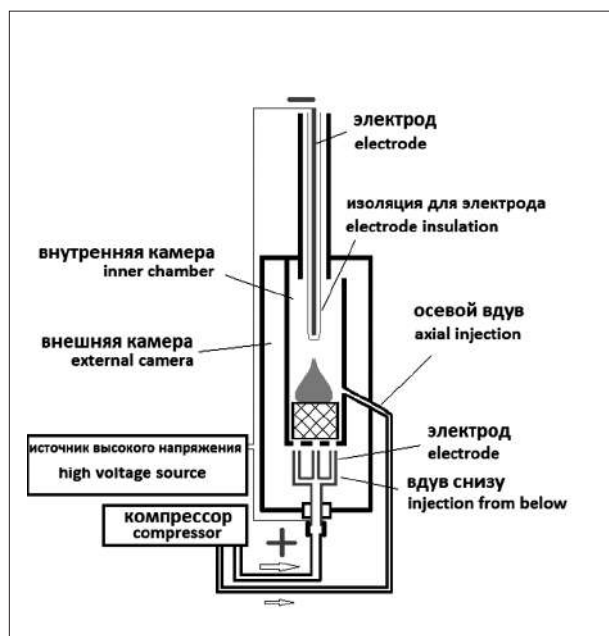


Рис. 2. Схема лабораторного образца мусоросжигающей установки
 Fig. 2. Scheme of an incineration plant laboratory sample

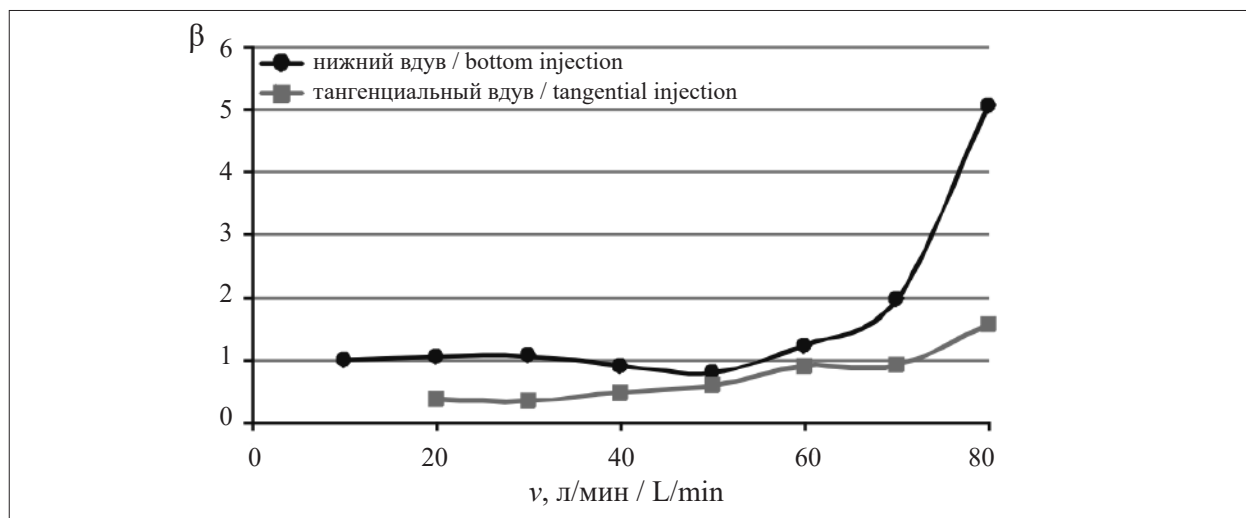


Рис. 3. Относительное изменение образования CO при различных расходах воздуха
 Fig. 3. Relative change in CO formation at different air flow rates

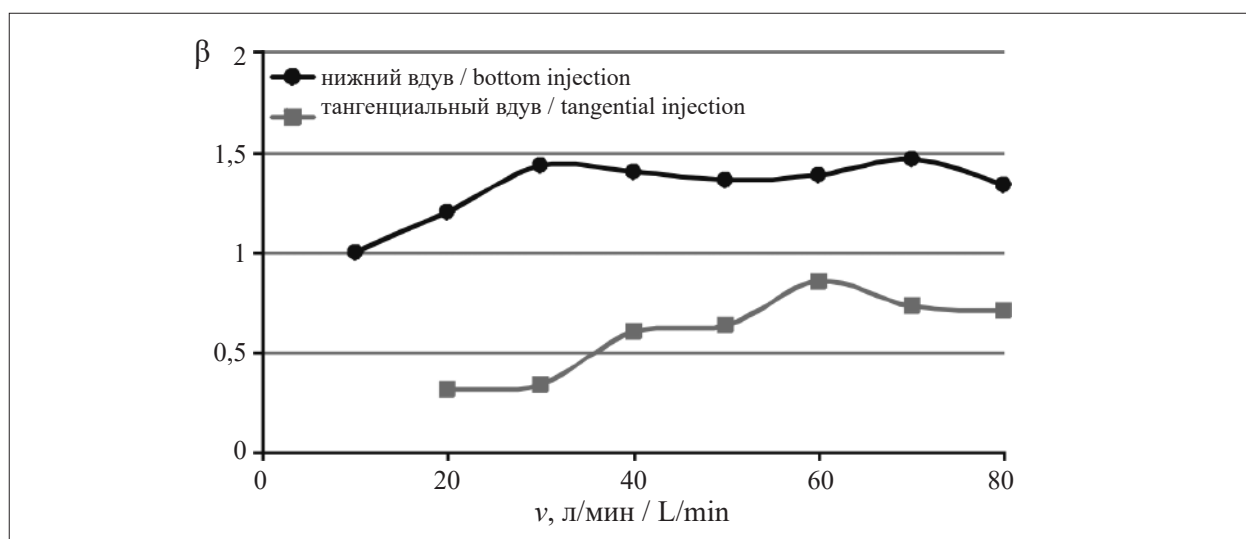


Рис. 4. Относительное изменение образования NO при разных расходах воздуха
 Fig. 4. Relative change in NO formation at different air flow rates

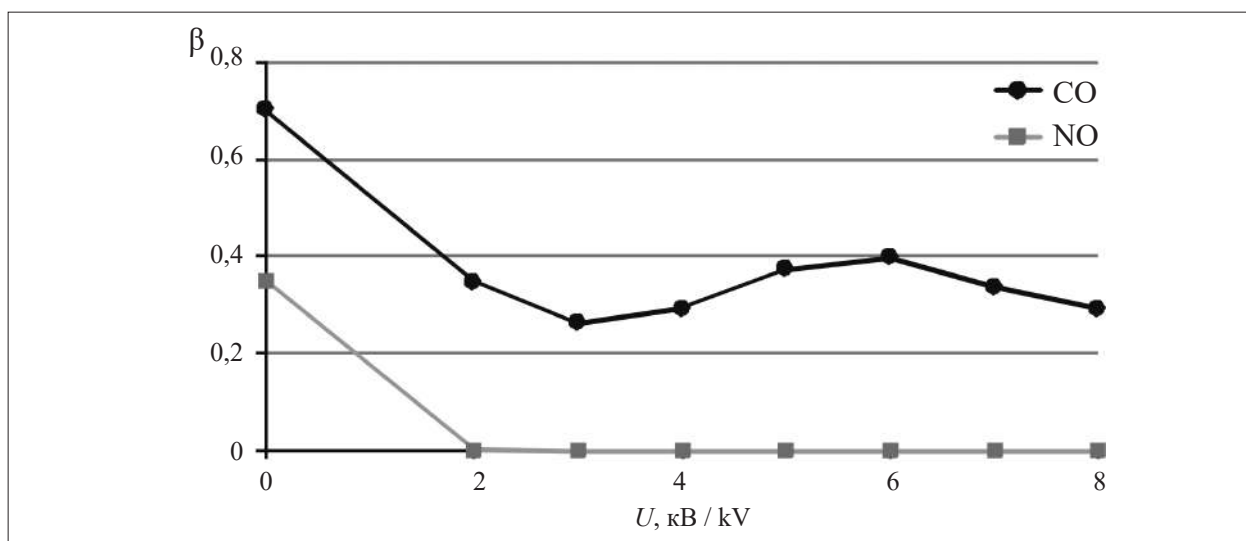


Рис. 5. Зависимость скорости образования CO и NO в выбросах от напряжения между электродами
 Fig. 5. Dependence of the CO and NO formation rate in emissions on the voltage between the electrodes

воздуха (10 л/мин) подаваемого строго снизу, вдоль оси трубы. При минимальной подаче воздуха на 1 г сгорающей резины образуется: CO – 55 мг, NO – 2 мг. Результаты представлены на рисунках 3 и 4.

При классической подаче воздуха снизу, через колосниковую решётку, для резины явно прослеживается значение расхода воздуха, при котором концентрация CO минимальна – это 50 л/мин (рис. 3). Дальнейшее увеличение расхода воздуха приводит к резкому увеличению CO в продуктах сгорания. Для NO сначала с увеличением расхода воздуха наблюдается относительный рост, а в дальнейшем количество NO остаётся постоянным.

Подача воздуха через осевой канал (тангенциальный вдув), качественно меняет картину образования продуктов неполного сгорания. Сжигание в данных условиях производится с минимальным вдувом снизу в 10 л/мин, на графиках точки строятся исходя из полного расхода воздуха, подаваемого в систему. При подаче закручивающего потока наблюдается монотонный рост выделения CO. Следует отметить, что при наличии закручивающего потока воздуха, CO выделяется всегда меньше, чем в аналогичных условиях, при подаче воздуха снизу. Образование NO также прогрессирует с увеличением расхода воздуха, при этом показатели меньше, чем для прямого вдува.

Во второй серии экспериментов исследована возможность изменения параметров горения резины в совокупности действия классических методов и электростатического поля. Для сравнения результатов были выбраны условия подачи воздуха, при которых выбросы в первой серии экспериментов были минимальны. Таким образом эксперименты проводились при одновременной подаче воздуха снизу (расход составлял 50 л/мин) и тангенциальной подаче (расход – 10 л/мин). Результаты приведены на рисунке 5. Для CO наложение электрического поля приводит к дополнительному снижению скорости его образования на величину порядка 50%, а для NO – практически к полному его исчезновению.

Зависимость для режима вдува снизу (рис. 3) соответствует представлениям о процессе горения полимеров [11–13]. При оптимальном соотношении горючее – окислитель, полнота сгорания увеличивается: это свидетельствует о минимуме выбросов CO. Дальнейшее увеличение расхода воздуха приводит к нестационарному режиму горения и срыву пламени, в результате чего продукты термического

разложения резины не воспламеняются и не сгорают.

Осевой вдув приводит к диффузионно-кинетическому режиму горения, при котором длина факела пламени увеличивается. Данные процессы значительно сказываются на протекании химических реакций в зоне горения, поэтому наблюдается резкое снижение образования продуктов неполного сгорания при всех расходах окислителя. Полученные данные указывают на тщательный подбор скорости окислителя в зависимости от вида сжигаемого полимера. Исходя из результатов предварительных экспериментов для других полимеров: полипропилена, полистирола, оптимальная скорость подачи окислителя отличалась от используемой при сжигании резины.

При организации электрополевого метода управления горением необходимо учитывать влияние поля на избыточные заряды (положительные и отрицательные), на которые действуют силы Кулона ($F = qE$), которые приводят к их движению, в результате чего изменяется форма пламени и повышается температура горения продуктов пиролиза к-фазы. Повышение температуры приводит к росту теплового потока в к-фазу [14], в результате чего происходят изменения в составе продуктов газификации [15]. Описанные выше процессы приводят к снижению выбросов CO и NO, увеличению полноты сгорания.

Заключение

Таким образом, сравнивая различные способы снижения выбросов CO и NO в мусоросжигающей установке, видно, что регулировка выбросов с помощью изменения расхода воздуха и способа его подачи более эффективна, чем за счёт применения электрополевого системы. Однако электрополевого воздействие способно осуществить дополнительное повышение полноты и экологичности сгорания. Использование электростатического поля с разностями потенциалов в 3–4 кВ позволило снизить скорость образования CO в продуктах сгорания на величину до 50%, а NO – практически до нуля.

References

1. Ivantsova E.A. Problems and prospects in management of solid household wastes // Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekonomika. Ecologiya. 2016. No. 2. P. 148–158 (in Russian). doi: 10.15688/jvolsu3.2016.2.15

2. Grinin A.S., Novikov V.N. Industrial and household waste: storage, disposal, recycling. Moskva: Fair-press, 2002. 336 p. (in Russian).
3. Knorre G.F., Paleev I.I. Theory of combustion processes. Moskva: Energiya, 1966. 491 p. (in Russian).
4. Belousov V.N., Smorodin S.N., Smirnova O.S. Fuel and combustion theory. Part 1. Fuel. Sankt-Peterburg: SPbGTURP, 2011. 86 p. (in Russian).
5. National Research Council. Waste incineration and public health. Washington, DC: The National Academies Press, 2000. 334 p. doi: 10.17226/5803
6. Sayed-Kassem A., Pascale G., Mahmoud I., Virgine G. On the effect of a DC electric field on soot particles' emission of a laminar diffusion flame // Combustion Science and Technology. 2019. Article No. 1678901. doi: 10.1080/00102202.2019.1678901
7. Krickis O., Jaundālders S. Impact of electric field in the stabilized premixed flame on NO_x and CO emissions // 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). IEEE, 2017. P. 1–5. doi: 10.1109/RTUCON.2017.8124799
8. Most D., Hammer T., Lins G., Branston D., Altdorfner F., Beyrau F., Leipertz A. Electric field effects for combustion control-optimized geometry // International Conference on Phenomena in Ionized Gases. Czech Republic, 2007. P. 1863–1866.
9. Fang J., Wu X., Duan H., Li C., Gao Z. Effects of electric fields on the combustion characteristics of lean burn methane-air mixtures // Energies. 2015. V. 8. No. 4. P. 2587–2605. doi: 10.3390/en8042587
10. Zyryanov I.A., Pozolotin A.P., Budin A.G., Kantor E.V., Vladykin A.S. The experimental investigation of the electrostatic field influence on carbon monoxide and nitric oxide exhausting during the polymer combustion // Theoretical and Applied Ecology. 2020. No. 4. P. 149–154 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2020-4-149-154
11. Aseeva R.M., Zaikov G.E. Combustion of polymer materials. Moskva: Nauka, 1981. 280 p. (in Russian).
12. Bulgakov V.K., Kodolov V.K., Lipanov A.M. Simulation of polymeric materials combustion. Moskva: Himiya, 1990. 240 p. (in Russian).
13. Yarmolchick Y.P., Schroger R., Haberfelner H., Pichler M., Kostic D., Moroz G.V. Combined combustion of various industrial waste flows in boiler furnaces. Part 1 // Energetika: Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. 2020. V. 63. No. 3. P. 236–252 (in Russian). doi: 10.21122/1029-7448-2020-63-3-236-252
14. Reshetnikov S.M., Zyryanov I.A., Pozolotin A.P. Combustion features of polymers in an electrostatic field // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2013. No. 8 (145). P. 30–37 (in Russian).
15. Reshetnikov S.M., Reshetnikov I.S. Burning anatomy. Mixed solid propellants. Experiment, theory, calculation. Moskva: NGSS, 2014. 256 p. (in Russian).