

**Экспериментальное исследование
влияния электростатического поля
на выбросы оксида углерода(II)
и оксида азота(II) при сжигании полимеров**

© 2020. И. А. Зырянов, к. т. н., доцент, А. П. Позолотин, к. т. н., доцент,
А. Г. Будин, к. т. н., доцент, Е. В. Кантор, к. ф.-м. н., доцент,
А. С. Владыкин, аспирант,
Вятский государственный университет,
610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, д. 36,
e-mail: b185@mail.ru

Проблема выбросов низших оксидов азота и углерода, связанная со сжиганием органического топлива и твёрдых бытовых отходов, является актуальной в экологии. Для решения этой проблемы в настоящее время используется ряд способов оптимизации горения топлива, а также фильтрация продуктов сгорания. В статье рассмотрен метод управления горением топлива с помощью электростатического поля, который позволяет снижать концентрацию вредных выбросов в атмосферу. Исследовалась зависимость выбросов CO и NO при различных параметрах внешнего электростатического поля, созданного в камере сжигания полимеров: полистирола, полипропилена, полиэтилена, синтетического каучука СКД-2. Выявлена возможность регулировать выбросы посредством изменения параметров электростатического поля. При этом удалось достичь снижения выбросов CO на 10–50%, а выбросов NO – на 70%.

Ключевые слова: горение, сжигание твёрдых бытовых отходов, полимерные отходы, выбросы, электростатическое поле.

**The experimental investigation
of the electrostatic field influence
on carbon monoxide and nitric oxide exhausting
during the polymer combustion**

© 2020. I. A. Zyryanov ORCID: 0000-0003-4843-4302, A. P. Pozolotin ORCID: 0000-0003-3130-2573,
A. G. Budin ORCID: 0000-0003-2771-1876, E. V. Kantor ORCID: 0000-0001-9126-0438,
A. S. Vladykin ORCID: 0000-0001-7980-2433,
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: b185@mail.ru

Emissions issue is one of the most important ecology problems. The both MSW (municipal solid waste) combustion and the organic fuel combustion cause the nitrogen monoxide and the carbon monoxide releasing. In order to solve this problem nowadays the mankind uses several ways as using filters to purify the exhausting gases or the combustion optimization. The present article considers the method of the combustion control by means of the electric field. It provides to reduce the exhausting substances concentrations. The investigation objective is the dependency relation between the CO and NO exhausting and the parameters of the electric field installed in the combustion chamber. The considering substances to be burnt are the polystyrene (PS), the polypropylene (PP), the polyethylene (PE), the butadiene rubber SKD-II (the name of merchandise produced by GOST 38.403750-2001). The investigation justified the opportunities to control the quantity of the exhausting products by changing the electric field parameters. In particular, the experimental results show that the CO and NO exhausting decrease by 10–50% and 70% respectively.

Keywords: combustion, municipal solid waste, plastic waste, electrostatic field.

Использование органического топлива для получения тепловой энергии, утилизация твёрдых бытовых отходов (ТБО) методом сжигания неизбежно сопровождаются вредными выбросами в атмосферу, что является одной из наиболее значимых проблем, стоящих перед человечеством. Большую опасность для человека представляют низшие оксиды углерода и азота. Анализ возможности сжигания ТБО на территории Российской Федерации приводится в работе [1]. Авторы делают выводы о несовершенстве существующих зарубежных мусоросжигательных заводов и указывают на потребность в разработке новых отечественных технологий, которые по себестоимости будут выгоднее зарубежных аналогов.

Возможность регулировать выбросы низших оксидов является одной из первоочередных задач в современной науке. Одним из инструментов для такого регулирования является применение электрического поля в камере сгорания. Исследования в данном направлении активно проводятся [2–6, 7–14]. В работе [2] рассматривалась зависимость концентрации угарного газа и низших оксидов азота в выбросах при сжигании природного газа в присутствии электрического поля. Результаты показывают, что существует зависимость изменения концентраций выбросов для NO и CO от напряжённости электрического поля: стабильный уровень CO фиксировался при напряжении до 3 кВ, резонансный пик наблюдался при 3,5 кВ, после чего следовало снижение уровня выбросов CO вплоть до 50% от первоначального значения. Интенсифицированный электрическим полем тепломассообмен можно использовать для улавливания углерода и его секвестрирования из пламени, получая более чистое сгорание углеводородов.

Возможность управления полнотой сгорания на примере пропана приводится в работах [3, 11, 13]. В [3, 13] показано, что электрическое поле снижает выбросы монооксида углерода и образование сажи. Также для пламени пропана авторы работы [11] получили снижение выбросов NO на 30%. Исследователи в Чехии и Германии отмечают возможность снижения выбросов CO на 70% при горении природного газа посредством верно подобранных параметров электрического поля [4]. В турбулентном пламени предварительно перемешанной смеси горючего и окислителя воздействие электрического поля приводит к снижению

концентрации CO на 95% при соответствующих технических условиях, например, при высоком давлении (до 1 МПа) и тепловых нагрузках выше 40 кВт; однако при таких условиях концентрация NO возрастает на 25% [5]. Результаты исследований [2–5] указывают на значительные эффекты снижения выбросов при горении газовых смесей.

Менее изученным остаётся вопрос о выбросах, связанных с горением твёрдых отходов, а именно полимеров. В работах [6, 12] предлагается конструкция установки для эффективного сжигания соломы с древесными и торфяными гранулами в электрическом поле. Исследования указывают на повышение качества горения топлива при закрутке факела пламени. Дополнительно в работе [12] приводятся результаты исследований влияния электрического поля на полноту сгорания. Отмечено снижение доли монооксида углерода в продуктах сгорания на 60%, по отношению к горению без поля, также зафиксировано снижение массовой доли NO на 10%.

Особенностью горения полимерных материалов является зависимость концентрации продуктов деструкции от условий горения (темпов нагрева, температуры, количества окислителя) [7]. В работах [8–9] приведено исследование влияния электростатического поля на горение полимеров. Показана возможность управления скоростью горения максимальной температурой пламени в широких пределах в зависимости от расположения электродов в зоне горения. В [10] на основании численного расчёта показана возможность снижения выбросов CO на 10% в энергетической установке, в которой в качестве топлива используется полимер. Следует отметить, что эффект влияния электрического поля на полноту сгорания определяется геометрией и напряжённостью поля [14]. Для разных участков пламени эффект влияния поля на образование продуктов неполного сгорания различный, наибольший эффект наблюдается для верхней части факела. Таким образом, тематика работы в настоящее время крайне актуальна, а полученные результаты важно применить к реальным энергоустановкам.

Целью данной работы является экспериментальное изучение влияния электростатического поля на концентрацию выбросов CO и NO при сжигании полимерных материалов: полистирола, полипропилена, полиэтилена, синтетического каучука СКД-2, для возможного применения данного метода в энергетических установках.

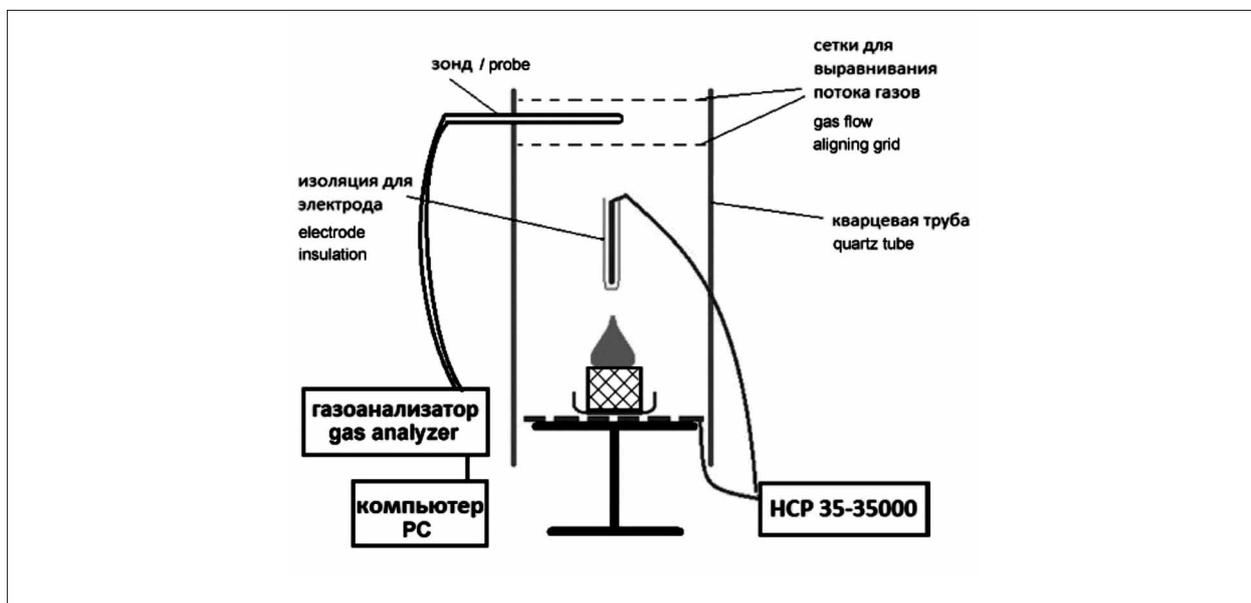


Рис. 1. Экспериментальная установка и схема расположения электродов
 Fig. 1. Experimental equipment and scheme of electrodes installation

Материалы и методы исследования

Экспериментальная установка (рис. 1) для исследования состава продуктов сгорания полимеров представляет собой вертикально расположенную кварцевую трубу диаметром 90 мм, по центру которой установлен сетчатый столик. На столик помещается исследуемый образец и поджигается. В качестве топлива использовали образцы из полистирола, полипропилена, полиэтилена и синтетического каучука СКД-2. В верхней части трубы установлены сетки для выравнивания потока продуктов сгорания. Выравнивающие сетки обеспечивают однородный по составу ламинарный поток дымовых газов, между ними располагается пробоотборный зонд, который соединён с газоанализатором MRU Optima 7. Газоанализатор измеряет содержание CO и NO в продуктах сгорания. Далее показания газоанализатора передаются на компьютер и записываются. Считывание показаний газоанализатора производится каждые 4 секунды.

Электрическое поле в зоне горения создавалось с помощью источника высокого напряжения ИСР 35-35000 и системы электродов. Использована конфигурация штырь-сетка: верхний электрод – металлический стержень, помещённый в кварцевую трубку, нижний – сетка, расположенная под сжигаемым образцом. Электроды располагались таким образом, чтобы исключить существование электрического тока в их цепи.

В ходе экспериментов исследуемый образец помещали в камеру сгорания и поджигали. Далее в зоне горения создавалось электростатическое поле и запускалась запись показаний газоанализатора. Горение продолжалось заданное время (64 с), после чего образец принудительно тушился. В результате был получен набор графиков зависимости CO и NO от времени, пример такого графика приведён на рисунке 2. Как было показано ранее [10], при воздействии электрического поля скорость горения изменяется, поэтому для адекватного сравнения результаты нормировались на единицу массы сгоревшего топлива. Для этого полученные данные интегрировались, а результат относился к массе сгоревшего материала:

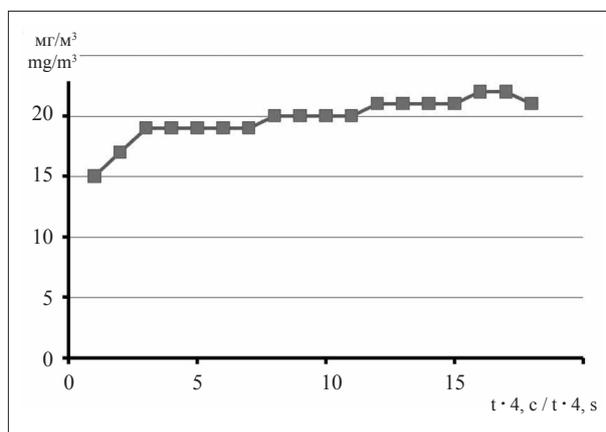


Рис. 2. Пример записи концентрации CO в продуктах сгорания
 Fig. 2. Registration of CO concentration in combustion products

$$K = \frac{\int C d\tau}{m_2},$$

где C – концентрация исследуемого продукта сгорания, τ – время горения, m_2 – масса сгоревшего топлива.

Параметр K имеет размерность $[\frac{мг/м^3}{г}]$ (единица концентрации продукта горения, на единицу массы сгоревшего топлива). Далее строили графики значения $K(U)$, где U – разность потенциалов между электродами. На графиках за положительное значение напряжения выбрана разность потенциалов

между электродами, при которой создаваемое электрическое поле направлено к поверхности сжигаемого образца.

Результаты и обсуждение

Результаты исследований представлены на рисунках 3 и 4 (при этом для NO приведены результаты только по СКД-2, поскольку для остальных полимеров выбросов NO не наблюдалось).

Для всех исследованных веществ в положительной области графика (рис. 3) наблюдается увеличение концентрации CO

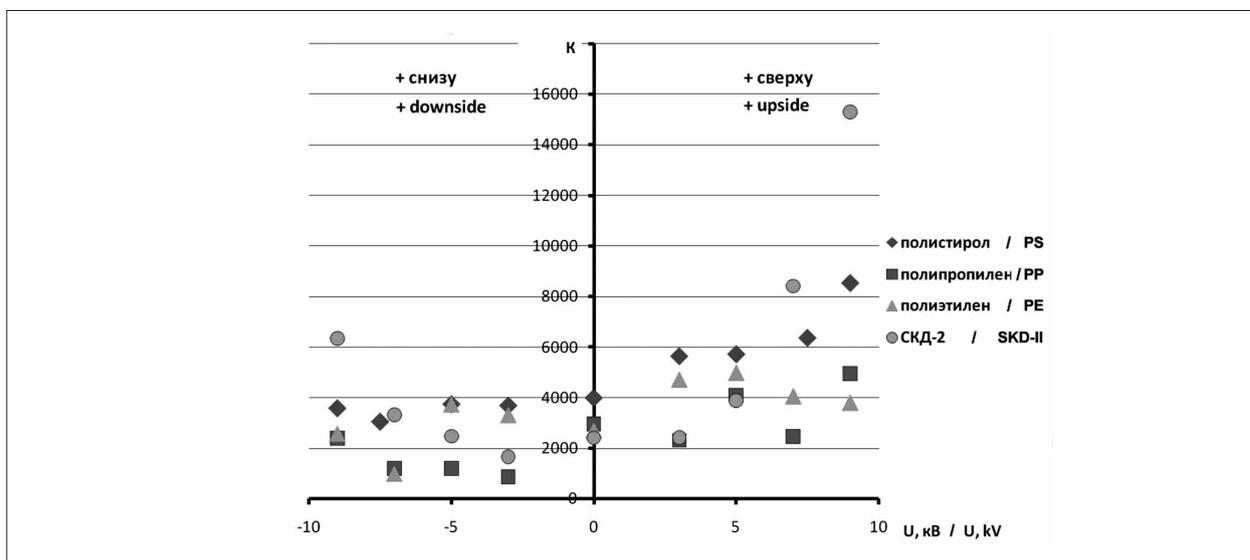


Рис. 3. Зависимость суммарных выбросов CO , отнесённых к выгоревшей массе образцов, от напряжения между электродами
 Fig. 3. Dependence of total CO emissions referred to the burnt mass of samples on the voltage between the electrodes

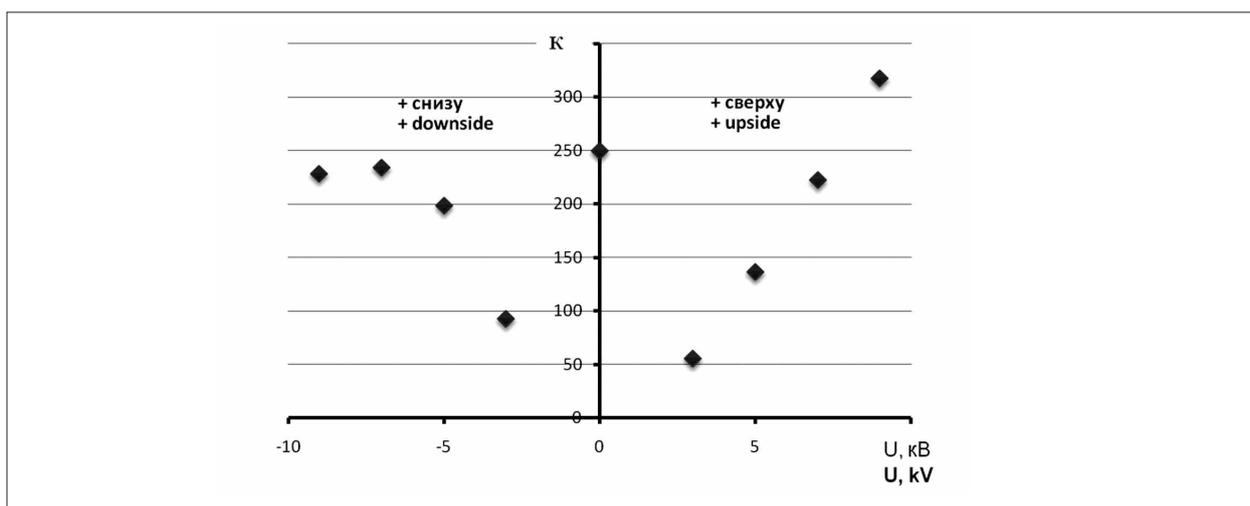


Рис. 4. Зависимость суммарных выбросов NO , отнесённых к выгоревшей массе образцов СКД-2, от напряжения между электродами
 Fig. 4. Dependence of total NO exhausting related to SKD-II burnt mass on the voltage parameter

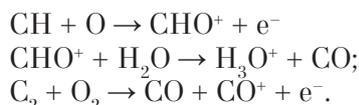
в продуктах сгорания. Наибольшее увеличение концентрации монооксида углерода наблюдается для СКД-2, что может быть связано с изменением режима горения [8].

В отрицательной области графика наблюдается положительная тенденция: для полистирола выбросы СО снижаются в среднем на 10%, для полипропилена – на 55%, для полиэтилена и СКД-2 в диапазоне напряжений до 5 кВ влияние незначительно. При этом снижение образования СО отмечается в диапазоне 0–7 кВ, дальнейшее увеличение разности потенциалов приводит к снижению полноты сгорания.

Результаты измерений концентрации NO представлены на рисунке 4. Зависимость имеет экстремальный характер, а именно при разности потенциалов 0–2,5 кВ наблюдается резкое снижение концентрации монооксида азота примерно на 70% от исходного значения. Дальнейшее увеличение разности потенциалов приводит к росту концентрации NO, при разности потенциалов 7,5 кВ концентрация возвращается к исходному значению.

При горении полимеров в результате хемоионизации в пламени образуется избыточная концентрация заряженных частиц разных знаков [9, 15]. В работах [8, 9] показано влияние электростатического поля, локализованного в разных участках зоны горения, на скорость горения и температуру пламени. Установлена зависимость влияния поля от напряжённости и места расположения электродов. Показано, что результаты влияния зависят от конкуренции следующих процессов: воздействия кулоновских сил со стороны поля на заряженные частицы (ионный ветер), воздействия на кинетику химических реакций в пламени (изменение цвета и температуры), воздействия поля на процессы разложения в κ-фазе (диспергирование).

Согласно данным [16], за образование СО могут быть ответственны реакции хемоионизации:



Электрическое поле способно управлять хемоионизационными процессами посредством вторичной ионизации при ускорении заряженных частиц. Полученные экстремумы на рисунках 3, 4 согласуются с литературными данными для газообразных топлив [2–4] и

указывают на положительное влияние слабых электрических полей на выбросы СО и NO. При высоких напряжённости поля происходит резкое увеличение скорости горения полимера [4], при этом концентрация окислителя снижается, поэтому наблюдается рост выбросов СО и NO (рис. 3, 4). Полученные экспериментальные данные указывают на необходимость подбора оптимальных параметров поля для энергетических установок по утилизации ТБО методом сжигания.

Заключение

В работе представлены результаты экспериментального изучения содержания СО и NO в продуктах сгорания полимерных материалов при наложении электростатического поля. Обнаружено, что в зависимости от конфигурации и напряжённости электрического поля концентрации продуктов неполного сгорания могут как возрастать, так и снижаться. Снижение концентрации СО наблюдается в диапазоне разностей потенциалов 0–7,5 кВ для электрического поля, направленного от поверхности топлива в конфигурации электродов «штырь-сетка». При этом снижение выхода монооксида углерода может достигать от 10% (для полистирола) до 50% (для полипропилена). При аналогичной конфигурации наблюдается также снижение образования монооксида азота: зафиксировано снижение выбросов NO на 70% для СКД-2.

References

1. Mazurin I.M., Ponurovskaya V.V., Kolotukhin S.P. Ecological dead end from waste incineration and possible ways to overcome it // Electronic scientific publication. Almanac "Space and Time". 2018. V. 16. No. 3–4 [Internet resource] <https://cyberleninka.ru/article/n/ekologicheskiy-tupik-ot-szhiganiya-musora-i-vozmozhnye-puti-ego-preodoleniya> (Accessed: 03.07.2020) (in Russian).
2. Kocheva M.A., Suvorov D.V. Experimental study of the reduction of harmful emissions of CO and NO_x when an electric field of negative intensity is applied to the flame torch // Fundamentalnye issledovaniya. 2017. No. 10–2. P. 233–238 (in Russian).
3. Most D., Hammer T., Lins G., Branston D.W., Altendorfner F., Beyrau F., Leipertz A. Electric field effects for combustion control – Optimized geometry // Proceedings of the 28th ICPIG. Prague, Czech Republic, 2007. P. 1863–1866.
4. Zake M., Barmina I., Turlajs D. Electric field control of polluting emissions from a propane flame // GlobalNest: the Int. J. 2001. V. 3. No. 2. P. 95–108. doi: 10.30955/gnj.000191

5. Sakhrieh A., Lins G., Dinkelacker F., Hammer T., Leipertz A., Branston D.W. The influence of pressure on the control of premixed turbulent flames using an electric field // *Combust. Flame*. 2005. V. 143. P. 313–322. doi: 10.1016/j.combustflame.2005.06.009
6. Barmina I., Kolmickovs A., Valdmanis R., Zake M., Vostrikovs S., Kalis H., Strautins U. Electric field effect on the thermal decomposition and combustion of straw with solid fuel pellets // *Energies*. 2019. V. 12. Article No. 1522. doi: 10.3390/en12081522
7. Reshetnikov S.M., Reshetnikov I.S. Burning anatomy. Moskva: NGSS, 2014. 256 p. (in Russian).
8. Reshetnikov S.M., Zyryanov I.A., Pozolotin A.P. Features of combustion of polymers in an electrostatic field // *Bulletin of the Southern Federal University. Technical science*. 2013. No. 8 (145). P. 30–36 (in Russian).
9. Reshetnikov S.M., Pozolotin A.P., Zyryanov I.A. Combustion of polymers in an electrostatic field // *Bulletin of the Samara State Aerospace University named Academician S.P. Korolev (National Research University)*. 2013. No. 3–4 (41). P. 222–229 (in Russian).
10. Zyryanov I.A., Pozolotin A.P., Budin A.G., Kantor E.V. Possibility of reducing the toxicity of gaseous emissions from power plants by the effect of an electrostatic field on the fossil fuel combustion zone // *Theoretical and Applied Ecology*. 2019. No. 1. P. 88–93 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-088-093
11. Vatazhin A.B., Likhter V.A., Shulgin V.I. Effect of an electric field on the nitrogen oxide emission and structure of a laminar propane diffusion flame // *Fluid Dynamics*. 1995. V. 30. No. 2. P. 166–174. doi: 10.1007/BF02029825
12. Barmina I., Kolmickovs A., Valdmanis R., Vostrikovs S., Zake M. The effect of electric field configuration on the thermochemical conversion of straw pellets // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2020. V. 57. No. 4. P. 65–76. doi: 10.2478/lpts-2020-0022
13. Krickis O., Zeltins N. Gas combustion efficiency enhancement: application study of intense electrostatic field // *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*. 2019. V. 56. No. 4. P. 3–16. doi: 10.2478/lpts-2019-0021
14. Chien Y.C., Escofet-Martin D., Dunn-Rankin D. Ion current and carbon monoxide release from an impinging methane/air coflow flame in an electric field // *Combustion and Flame*. 2019. V. 204. P. 250–259. doi: 10.1016/j.combustflame.2019.03.022
15. Reshetnikov S.M., Zyryanov I.A., Pozolotin A.P., Budin A.G. The distribution of excess charges in the diffusion flame of hydrocarbons // *Journal of Physics: Conference Series*. 2016. V. 669. Article No. 012040. doi: 10.1088/1742-6596/669/1/012040
16. Turlays D.P., Grivtsov V.P., Rusov D.E., Purmalis M. Ya. Study of the effect of the electric field on the combustion of fuel oil in industrial plants // *Proc. of the 4th Russian National Conference on Heat Transfer*. Moskva: Moskovskiy Energeticheskiy Institut (tekhnicheskii universitet), 2006. P. 327–328 (in Russian).