

Возможность снижения токсичности газообразных выбросов энергетических установок воздействием электростатического поля на зону горения органического топлива

© 2019. 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, Вятский государственный университет, 610000, Россия, г. Киров, ул. Московская, 36, e-mail: b185@mail.ru

Теплоэлектроэнергетика является одним из наиболее крупных источников загрязнения атмосферного воздуха токсичными веществами, включая продукты неполного сгорания органического топлива. Для снижения негативного воздействия энергетических установок на окружающую среду используются различные методы оптимизации режимов горения топлива и очистки выбросов продуктов горения в атмосферу. Одним из перспективных способов регулирования режимов сжигания топлива с целью снижения токсичности выбросов является воздействие электростатического поля на зону горения. В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований, в которых изучалось влияние электростатического поля на горение различных видов газообразного, жидкого и твёрдого органического топлива в различных вариантах конфигурации и направления электрического поля. Показано, что в воздействие электрического поля на зону горения может как снижать, так и повышать температуру пламени, что может быть использовано для оптимизации режимов горения с целью как повышения энергетической эффективности, так и снижения негативного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: энергетика, органическое топливо, горение, электрическое поле, токсичность продуктов горения.

The possibility of reducing the toxicity of gaseous emissions of power plants by the effect of an electrostatic field on the organic fuel combustion zone

© 2019. 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,
Vyatka State University,
36, Moskovskaya St., Kirov, Russia, 610000,
e-mail: b185@mail.ru

Electric power generation based on combustion of organic fuel is one of the largest sources of air pollution by toxic substances, including products of incomplete combustion. To reduce the negative impact of power plants on the environment, various methods are used to optimize the regimes for burning fuel and cleaning the emissions of combustion products into the atmosphere. One of the promising ways to regulate the combustion of fuels in order to reduce emissions is the effect of the electrostatic field on the combustion zone. This article presents the results of experimental studies in which the influence of the electrostatic field on the combustion of various types of gaseous, liquid and solid organic fuels in various configurations and directions of the electric field was studied. The change in temperature and completeness of combustion in a diffusion flame can be explained as follows: the electric field causes a shift of active charged particles to those torch regions where their presence was previously impossible. The field directed along the flow of fuel leads to a slight increase in the length of the reaction zone, and also causes the displacement of charged particles to the flame front, where they are oxidized. This leads to a change in the mechanism of chemical reactions, which in turn increases the temperature and completeness of fuel combustion. The field directed against the flow of fuel reduces the length of the reaction zone, with the result that the fuel does not have time to react completely. This leads to a decrease in temperature and combustion. So, it is shown that the influence of the electric field on the combustion zone can both reduce and raise the temperature of the flame, which can be used to optimize the combustion regimes with the aim of both improving energy efficiency and reducing the negative impact on the environment.

Keywords: energy, organic fuel, combustion, electric field, toxicity of combustion products.

Проблема загрязнения окружающей среды продуктами горения является одной из наиболее актуальных экологических проблем современности. В связи с этим важную научно-техническую задачу представляет поиск методов повышения экологической безопасности тепловых энергетических установок, основным источником энергии в которых на данный момент является процесс горения. Следовательно, для снижения отрицательного воздействия систем производства тепловой энергии на окружающий мир необходимы эффективные методы оптимизации режима сжигания топлив.

Степень экологической безопасности процесса горения определяется полнотой сгорания топлива, которая зависит от многих параметров: коэффициента избытка окислителя, температуры горения, физико-химических свойств топлива [1]. Однако не всегда экономически целесообразно проводить модернизацию установок классическими методами. Трудности заключаются в поиске баланса между заданной мощностью энергоустановки, стоимостью и возможностями модернизации, а также многими другими факторами. Существуют альтернативные способы изменения параметров горения, которые заключаются в воздействии физическими полями (акустическими, магнитными, электрическими и т. д.) на топливо и зону горения.

Одним из таких способов является наложение внешнего электростатического поля на зону горения углеводородного топлива. Так, в работе [2] авторами воздействием электрического поля на кинетическое пламя метана с воздухом добились снижения выбросов NO и CO на 40 и 60% соответственно. Авторами [3] при моделировании горения пропан-воздушных смесей получено снижение концентрации монооксида азота в продуктах сгорания на 6%. В работе [4] обнаружено снижение выбросов монооксидов азота и углерода для ламинарного диффузионного пламени газовой горелки, причём изменение параметров горения зависит от направления напряжённости электрического поля. Авторами [5] для природного газа на горелке Бунзена при горении в атмосфере воздуха обнаружено снижение выбросов NO и CO в зависимости от величины приложенного напряжения. Зависимости имеют экстремумы. При использовании переменных электрических полей на лабораторной установке для сжигания смеси пропан-бутан было зафиксировано снижение выбросов NO и CO [6]. С другой стороны, авторами [7]

показано, что при снижении образования угарного газа наблюдается увеличение образования монооксида азота. Следует отметить, что все исследования производятся для перемешанных пламён, а горение в экспериментах кинетическое.

Воздействие электрического поля приводит к снижению выбросов сажи [8]. Так для диффузионного пламени ацетиленового наблюдается снижение выброса сажи на 90% при напряжённости поля 200 кВ/м, данный эффект зависит от полярности электродов и обусловлен окислением сажи с ростом температуры факела. Также изучалось влияние поля на сажеобразование [9]. В работе показано, что внешнее поле может эффективно управлять интенсивностью образования сажи в пламени.

Авторы работ [2–9] указывают на изменение формы пламени и независимость эффекта снижения выбросов от полярности электродов, а, значит, от направления вектора напряжённости электрического поля. Исследования [10–12] показывают сложный характер влияния поля на горение: это действие массовых сил на заряженные частицы в пламени, влияние на фазовый переход на границе «конденсированная фаза (к-фаза) – пламя», диспергирование к-фазы топлива, конкуренция действия массовых сил и кинетики химических реакций. Широкий спектр проявления физических явлений, сопровождающих действие электрического поля на горение углеводородных топлив в различных агрегатных состояниях, затрудняет внедрение электрополевого способа управления процессом горения с целью снижения вредных выбросов в реальные энергоустановки.

Таким образом, для решения вопроса о внедрении электрополевого способа для повышения экологической безопасности процесса горения в энергоустановках, работающих на конденсированных топливах, разработчикам необходимы данные комплексных исследований для веществ в различных агрегатных состояниях и для различных режимов горения.

Оценить полноту сгорания топлив можно по максимальной температуре пламени. Согласно [1], полнота сгорания в энергоустановке в приближённом случае может быть определена по формуле (1):

$$\eta \approx \frac{T_k^{\text{реал}}}{T_k}, \quad (1)$$

где $T_k^{\text{реал}}$ – температура продуктов горения, измеренная в ходе экспериментов,

T_k – температура, полученная в результате расчётов.

Целью настоящей работы является оценка влияния электростатического поля на температуру пламени и полноту сгорания различных видов органического топлива, что в перспективе позволит использовать электрополевой способ управления режимом горения для снижения токсичности газообразных выбросов энергетических установок.

Материалы и методы

Исследования горения веществ в различных агрегатных состояниях проведены на экспериментальных стендах, описанных в [10, 12, 13].

Диффузионное горение газов (пропан) и жидкостей (декан, ундекан, додекан, тетрадекан) исследовалось на коаксиальных горелках. Горелка представляет собой две коаксиально расположенные кварцевые трубки: при этом по внутренней трубке (диаметром 14 мм для жидкостей и 8 мм для газов) подаётся горючее, по внешней (диаметром 48 мм для жидкостей и 20 мм для газов) – окислитель. Расходы газов контролировались ротаметрами, а расход жидкости определялся по методике, описанной в [10].

Стенд для исследования диффузионного горения твёрдых веществ представляет собой подставку со столиком для образца, помещённую на весы. Подставка с образцом помещена в сетчатый кожух диаметром 250 мм для исключения влияния внешнего потока воздуха на горение. Измерение скорости горения образца производится методом непрерывного взвешивания [12].

Горение твёрдых веществ в высокоэнтальпийном потоке исследовалось на экспериментальном стенде, описанном в [13] (в данной работе под термином «высокоэнтальпийный поток» подразумевается высокоскоростной высокотемпературный поток с протеканием химических реакций). Рабочий участок представляет собой полимерный блок длиной 250 мм с высверленным по центру каналом начального диаметра 20 мм, по которому продувается окислитель – газообразный кислород. Горение происходит внутри канала. Расход окислителя контролируется соответствующим датчиком, а измерение массовой скорости горения производится по методике, описанной в [13].

Для указанных экспериментальных стендов в качестве топлив используются

газы (пропан); жидкости (декан, ундекан, додекан, тридекан, тетрадекан); твёрдые вещества – полиметилметакрилат (ПММА), синтетический цис-бутадиеновый каучук СКД-2, бутадиенстирольный маслонеполненный каучук СКМС-30, синтетический тройной этиленпропиленовый каучук СКЭПТ, бутадиен-нитрильный каучук СКН-26; для случая высокоэнтальпийного потока – ПММА. Определение температуры в пламени проводилось по микротермопарной методике с использованием термопары хромель-алюмель (ХА) диаметром 60 мкм.

Электростатическое поле в зоне горения создаётся с помощью системы электродов и высоковольтного источника напряжения НСР 35–35000 (компания FuG Elektronik, Германия). Исследования диффузионного горения газов, жидкостей и полимеров проведены при конфигурации электродов, приведённой на рис. 1 а и б (см. цветную вкладку). При исследовании горения в высокоэнтальпийном потоке используется конфигурация электродов по схеме коаксиального конденсатора (внутренний электрод – стержень, внешний – сетка вокруг твёрдотопливного блока) – рис. 1 с).

Для того, чтобы поле оставалось электростатическим, в экспериментах контролируется отсутствие тока в цепи электродов. Направление вектора напряжённости электрического поля обозначается следующим образом: поле, направленное от поверхности горючего (верхний электрод отрицателен) по потоку продуктов сгорания, обозначается как $\vec{E} \uparrow \uparrow$. Поле, направленное к поверхности топлива (верхний электрод положительный) против потока продуктов сгорания обозначается как $\vec{E} \uparrow \downarrow$. На графиках далее $\vec{E} \uparrow \uparrow$ соответствует отрицательным значениям напряжённости, $\vec{E} \uparrow \downarrow$ – положительным.

Результаты и обсуждение

Микротермопарное зондирование пламен углеводородов ряда алканов, как газообразных, так и жидких, показало, что распределения температуры в пламени во всех случаях качественно похожи. На рисунке 2 (см. цветную вкладку) показан характер распределения температур в пламени додекана с нанесёнными изотермами, по вертикали и горизонтали отложено расстояние в миллиметрах. Максимум температуры располагается в верхней части пламени. Наложение электростатического поля приводит к изменению геометрии пламени для всех исследованных

И. А. ЗЫРЯНОВ, А. П. ПОЗОЛОТИН, А. Г. БУДИН, Е. В. КАНТОР
ВОЗМОЖНОСТЬ СНИЖЕНИЯ ТОКСИЧНОСТИ ГАЗООБРАЗНЫХ ВЫБРОСОВ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ВОЗДЕЙСТВИЕМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ
НА ЗОНУ ГОРЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА, С. 88

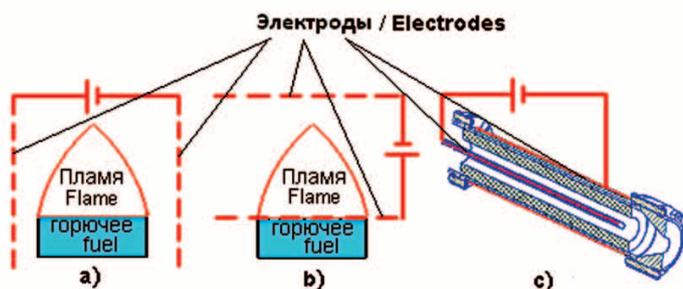


Рис. 1. Схемы расположения электродов (а – поперечное поле, б – продольное поле, с – радиальное поле)
Fig. 1. Electrodes arrangement (a – transverse field, b – longitudinal field, c – radial field)

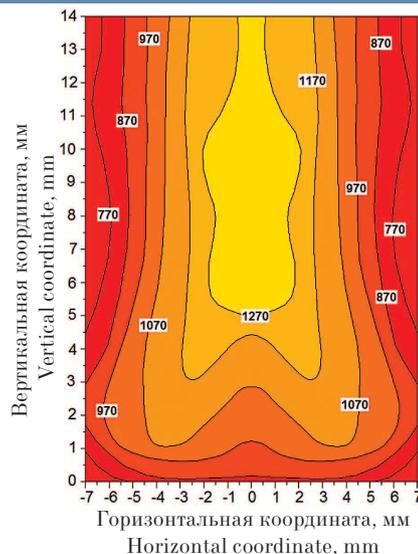


Рис. 2. Тепловая структура пламени додекана $C_{12}H_{26}$, температура в градусах Кельвина
Fig. 2. The thermal structure of the dodecane $C_{12}H_{26}$ flame, temperature in Kelvin degrees

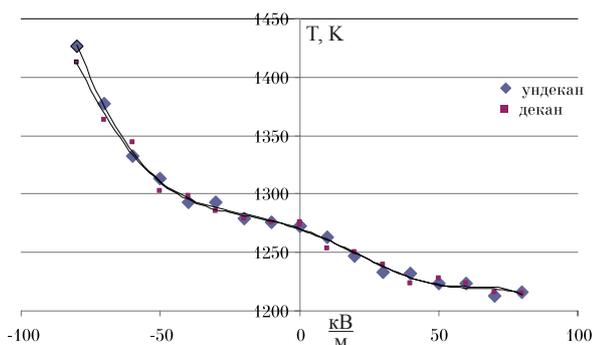


Рис. 3. Максимальная температура в пламени алканов
Fig. 3. Maximum temperature in the flame of alkanes

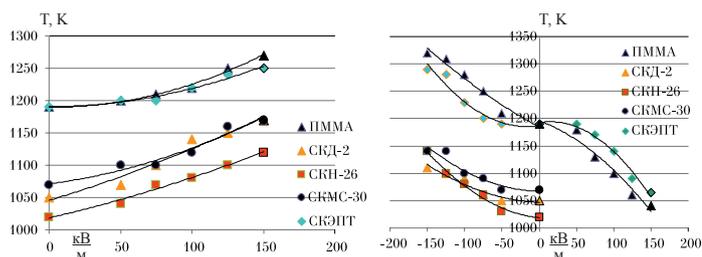


Рис. 4. Изменение температуры пламени для полимеров, горящих в электрических полях
Fig. 4. Flame temperature change for polymers burning in electric field

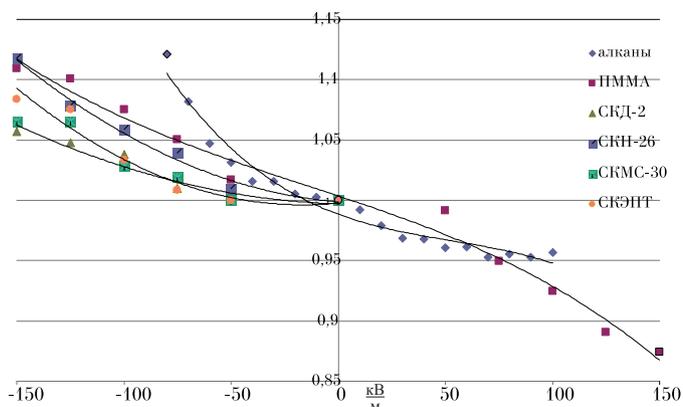


Рис. 6. Относительное изменение полноты сгорания топлива / **Fig. 6.** The relative change in the completeness of combustion

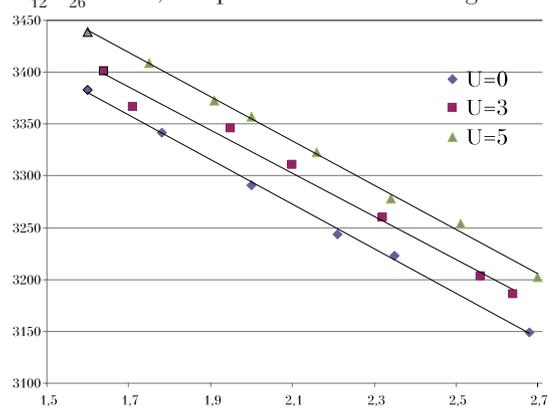


Рис. 5. Температура пламени ПММА, горящего в высокоэнтальпийном потоке
Fig. 5. Polymethyl methacrylate (PMMA) burning in high-enthalpy flow flame temperature

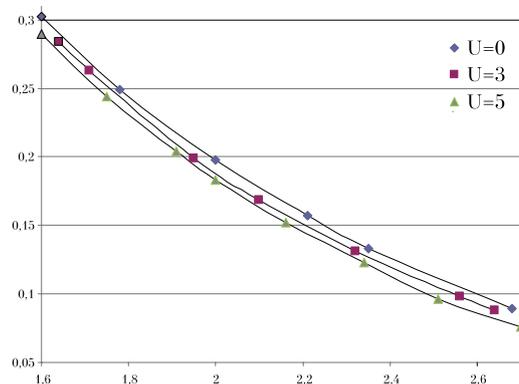


Рис. 7. Отношение концентрации угарного газа к продуктам полного окисления при горении ПММА в высокоэнтальпийном потоке
Fig. 7. Ratio of carbon monoxide concentration to complete oxidation products during PMMA combustion in a high-enthalpy flow

горючих. Поле, направленное к срезу горелки, прижимает пламя, а поле обратного направления незначительно вытягивает факел горения.

Измерения температур в пламени алканов при наложении электрического поля также показали, что изменение не зависит от вида топлива. График изменения температуры представлен на рисунке 3 (см. цветную вкладку).

Наложение электрического поля $\vec{E} \uparrow \uparrow$ приводит к увеличению температуры пламени на 150 К при значении напряжённости 80 кВ/м. Поле обратного направления приводит к снижению температуры пламени на 50 К при напряжённости 80 кВ/м. При этом в поле, направленном против потока горючего, происходит существенное снижение высоты пламени, а в поле противоположного направления – незначительное увеличение.

При наложении электростатического поля по схеме, приведённой на рисунке 1 а, для случая горения полимеров максимальная температура пламени при напряжённости 150 кВ/м для ПММА, СКД-2, СКМС-30, СКЭПТ, СКН-26 увеличивается на 80 К, 120 К, 100 К, 60 К, 100 К соответственно (рис. 4 а). Наряду с увеличением температуры, фронт горения деформируется, массовая скорость горения увеличивается [8].

Электростатическое поле, локализованное в области пламени (рис. 1 б) при $\vec{E} \uparrow \uparrow$ увеличивает температуру пламени для ПММА на 130 К, для СКД-2 на 60 К, для СКМС-30 на 70 К, для СКЭПТ на 100 К, для СКН-26 на 120 К при напряжённостях до 150 кВ/м (рис. 4 б, см. цветную вкладку). При обратном направлении поля $\vec{E} \uparrow \downarrow$ температура пламени уменьшается на 150 К для ПММА, 120 К для СКЭПТ при аналогичных модулях напряжённости. Из-за нестационарности процесса горения для СКД-2, СКН-26, СКМС-30 измерение температуры не производилось. Для выбранной конфигурации электродов при $\vec{E} \uparrow \uparrow$ массовая скорость горения увеличивалась, наблюдалось ускорение потока горения без деформации факела. При $\vec{E} \uparrow \downarrow$ скорость горения для ПММА, СКЭПТ уменьшается, а для остальных полимеров увеличивается. Регистрируется деформация фронта горения [8].

Горение в высокоэнтальпийном потоке также имеет отклик на воздействие электростатического поля: скорость убыли массы твёрдого вещества возрастает. При горении в канале зависимость скорости сгорания от плотности потока окислителя может быть аппроксимирована уравнением вида: $U = A \cdot (\rho v)^n$ [14], где U – линейная скорость горения полимера,

A и n – константы, отражающие особенности топлив и условий горения, ρ и v – плотность и скорость потока окислителя соответственно. В результате экспериментальных исследований, подробно описанных в [13], для ПММА, горящего в потоке газообразного кислорода, получены следующие зависимости:

– без поля: $U = 0,029(\rho v)^{0,57}$;

– при разности потенциалов между электродами 3 кВ: $U = 0,033(\rho v)^{0,56}$;

– при разности потенциалов между электродами 5 кВ: $U = 0,038(\rho v)^{0,56}$.

Расчёт температуры пламени при горении ПММА в высокоэнтальпийном потоке был проведён по методике, описанной в [15], с использованием экспериментально полученных зависимостей соотношения горючего и окислителя, давления в канале горения. График зависимости температуры в зоне горения от коэффициента избытка окислителя приведён на рисунке 5 (см. цветную вкладку). Как видно по представленному графику, температура горения возрастает в среднем на 6% при напряжении 5 кВ.

Полученные результаты показывают, что электрическое поле способно как увеличивать, так и снижать максимальную температуру пламени. Оценку изменения полноты сгорания при воздействии электрического поля для диффузионного горения проведём, используя соотношение (1), представленное выше.

Ввиду неоднородности распределения температуры по объёму факела горения оценку будем производить по максимальной температуре пламени. На рисунке 6 (см. цветную вкладку) приведён график относительного изменения полноты сгорания $B = \frac{\eta_e}{\eta}$, где η_e и η – полнота сгорания в поле и без поля соответственно.

Как видно по представленному графику в поле, направленном по потоку горючего (отрицательные значения напряжённости, схема на рис. 1 б) полнота сгорания возрастает, поле же обратного направления снижает качество сгорания топлива. Эффект влияния электрического поля на факел пламени в литературе объясняется тремя механизмами: ионный ветер, влияние на кинетику химических реакций и прямой переход энергии поля в теплоту (джоулево тепло). Последний механизм в нашем случае не может иметь место в виду отсутствия тока в цепи электродов.

Основываясь на известных механизмах, изменение температуры и полноты сгорания в диффузионном пламени можно объяснить

следующим образом: электрическое поле вызывает смещение активных заряженных частиц в те области факела, где ранее их присутствие было невозможным. Поле, направленное по потоку горючего, приводит к незначительному увеличению длины реакционной зоны, а также вызывает смещение заряженных частиц к фронту пламени, где они окисляются. Это приводит к изменению механизма химических реакций, что в свою очередь повышает температуру и полноту сгорания топлива. Поле, направленное против потока горючего, снижает длину реакционной зоны, в результате чего топливо не успевает прореагировать полностью. Это приводит к снижению температуры и полноты сгорания.

Оценку полноты сгорания для ситуации горения в высокоэнтальпийном потоке проведем на основании расчёта по методике, приведённой в [15]. Ввиду того, что горение происходит при избытке окислителя, в расчёте продуктами сгорания являются CO_2 , H_2O , CO . Расчёт продуктов окисления азота не производится, поскольку ни в окислителе, ни в горючем данного вещества нет. На рисунке 7 (см. цветную вкладку) представлен график зависимости отношения концентрации CO к суммарной концентрации CO_2 и H_2O в продуктах сгорания (ϵ).

Результаты расчёта показывают, что при всех значениях коэффициента избытка окислителя наблюдается снижение относительной концентрации CO в среднем на 5–10%. Горение в высокоэнтальпийном потоке происходит в диффузионно-кинетическом режиме. Наложение электрического поля будет приводить к возникновению ионного ветра в зоне горения, что будет вызывать перемешивание реакционной смеси и способствовать более полному протеканию химических реакций. С другой стороны, электрическое поле может вызывать диспергирование поверхности конденсированного компонента топлива, что также стимулирует перемешивание топлива и окислителя. Таким образом, показана перспективность использования электрополевого метода влияния на горение в целях повышения экологичности энергоустановок.

Заключение

В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния электростатического поля на температуру в зоне диффузионного горения конденсированных веществ и горения полимеров в высокоэнталь-

пийном потоке. Показано, что максимальная температура диффузионного пламени при воздействии электрического поля может как увеличиваться, так и снижаться. Это в свою очередь позволяет как повышать, так и снижать полноту сгорания. Для условий горения в высокоэнтальпийном потоке на основании расчётов показано, что полнота сгорания возрастает при воздействии электрического поля. Дано объяснение полученных эффектов на основании механизма ионного ветра.

Литература

1. Губертон А.М. Процессы в гибридных ракетных двигателях / Под. ред. А.С. Коротаева. М.: Наука. 2008. 405 с.
2. Altendorfer F., Sakhrieh A., Beyrau F., Leipertz A., Dinkelacker F., Lins G., Hammer T., Branston D.W. Electric field effects on emissions and flame stability with optimized electric field geometry // Third European combustion meeting ECM. 2007. P. 1–6.
3. Soleimani A., Moghaddam H.M. Numerical analysis of the induced electric field effects on combustion parameters and reducing emissions of swirling flame of hydrocarbon fuels // Journal of environmentally friendly processes. 2016. V. 4. No. 2. P. 4–24.
4. Vatazhin A.B., Likhter V.A., Sepp V.A., Shul'gin 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.
5. Кочева М.А., Суворов Д.В. Экспериментальное исследование снижения вредных выбросов CO и NO_x при наложении электрического поля отрицательной напряжённости на факел пламени // Фундаментальные исследования. 2017. № 10. Ч. 2. С. 233–238.
6. Громцев С.А., Громцев А.С., Пурмал М.Я. Вепольная интенсификация горения топлива в топке теплового аппарата // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». 2014. № 1. С.96–1027.
7. Krickis O., Jaundālders S. Impact of electric field in the stabilized premixed flame on NO_x and CO emissions // IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga, 2017. P. 1–5.
8. Won S.H., Ryu S., Kim M.K., Chung S.H., Cha M.S. Effect of electric fields on the propagation speed of tribrachial flames in coflow jets // Combustion and Flame. 2008. V. 152. No. 4. P. 496–506.
9. Gillon P., Gilard V., Idir M., Sarh B. Electric field influence on the stability and the soot particles emission of a laminar diffusion flame // Combustion Science and Technology. 2018. P. 1–14.
10. Решетников С.М., Зырянов И.А. Влияние электростатического поля на макрокинетику горения

алканов и керосина // Вестник Казанского технологического университета. 2011. № 1. С. 120–128.

11. Reshetnikov S.M., Bobrov A.S., Zyryanov I.A. Electric field effect on the diffusion flame structure at different oxidizer excess coefficients // Russian Aeronautics (IzVUZ). 2010. V. 53. No. 2. P. 206–211.

12. Решетников С.М., Позолотин А.П., Зырянов И.А. Горение полимеров в электростатическом поле // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 3–1 (41). С. 222–229.

13. Reshetnikov S.M., Zyryanov I., Budin A.G., Reshetnikov I.S. Hybrid rocket Engine control by the electrostatic field // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2018. V. 11. No. 1. P. 146–150.

14. Головкин Л.Г. Гибридные ракетные двигатели. М.: Воениздат, 1976. 168 с.

15. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. М.: Машиностроение, 1989. 464 с.

References

1. Gubertov A.M. Processes in hybrid rocket engines / Ed. A.S. Korotaev. Moskva: Nauka. 2008. 405 p. (in Russian).

2. Altendorfner F., Sakhrieh A., Beyrau F., Leipertz A., Dinkelacker F., Lins G., Hammer T., Branston D.W. Electric field effects on emissions and flame stability with optimized electric field geometry // Third European combustion meeting ECM. 2007. P. 1–6.

3. Soleimani A., Moghaddam H.M. Numerical analysis of the induced electric field effects on combustion parameters and reducing emissions of swirling flame of hydrocarbon fuels // Journal of Environmentally Friendly Processes. 2016. V. 4. No. 2. P. 4–24.

4. Vatazhin A.B., Likhter V.A., Sepp 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.

5. 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 // Fundamentalnyye issledovaniya. 2017. No. 10. Part 2. P. 233–238 (in Russian).

6. Gromtsev S.A., Gromtsev A.S., Purmal M.Ya. Vepol intensification of fuel combustion in the furnace of a heat apparatus // Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya Protssy i apparaty pishchevykh proizvodstv. 2014. No. 1. P. 96–102 (in Russian).

7. Krickis O., Jaundālders S. Impact of electric field in the stabilized premixed flame on NO_x and CO emissions // IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON). Riga, 2017. P. 1–5.

8. Won S.H., Ryu S., Kim M.K., Chung S.H., Cha M.S. Effect of electric fields on the propagation speed of tribrachial flames in coflow jets // Combustion and Flame. 2008. V. 152. No. 4. P. 496–506. doi: 10.1016/J.COMBUST-FLAME.2007.11.008.

9. Gillon P., Gilard V., Idir M., Sarh B. Electric field influence on the stability and the soot particles emission of a laminar diffusion flame // Combustion Science and Technology. 2018. P. 1–14. <https://doi.org/10.1080/00102202.2018.1467404/>.

10. Reshetnikov S.M., Zyryanov I.A. Effect of electrostatic field on the macrokinetics of alkane and kerosene combustion // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2011. No. 1. P. 120–128 (in Russian).

11. Reshetnikov S.M., Bobrov A.S., Zyryanov I.A. Electric field effect on the diffusion flame structure at different oxidizer excess coefficients // Russian Aeronautics (IzVUZ). 2010. V. 53. No. 2. P. 206–211.

12. Reshetnikov S.M., Pozolotin A.P., Zyryanov I.A. Polymer burning in an electrostatic field // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (natsionalnogo issledovatel'skogo universiteta). 2013. No. 3–1 (41). P. 222–229 (in Russian).

13. Reshetnikov S.M., Zyryanov I., Budin A.G., Reshetnikov I.S. Hybrid rocket engine control by the electrostatic field // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2018. V. 11. No. 1. P. 146–150. doi: 10.25103/jestr.111.17.

14. Golovkov L.G. Hybrid rocket engines. Moskva: Voensizdat, 1976. 168 p. (in Russian).

15. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П. Теория ракетных двигателей. Moskva: Mashinostroyeniye, 1989. 464 p. (in Russian).