

УДК 536.46

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СЛАБОГО ПОПЕРЕЧНОГО ПОСТОЯННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ПЛАМЕНИ ГОРЕЛКИ БУНЗЕНА

Р. В. Толстогузов¹, К. Д. Лавронов^{1,2}, Д. К. Шараборин¹, В. М. Дулин¹

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск,
enot.roman@gmail.com

²Новосибирский государственный университет, 630090 Новосибирск

Представлены результаты экспериментального исследования влияния слабого поперечного постоянного электрического поля на распределение температуры в ламинарном пламени горелки Бунзена. С помощью метода плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции получены поля температуры в пламенах предварительно перемешанных бедных метано- и пропановоздушных смесей при наличии внешнего электрического поля и в его отсутствие. Результаты визуализации и оценки поля температуры свидетельствуют о том, что наличие электрического поля приводит к изменению формы фронта пламени и его отклонению к катоду, но не меняет существенно распределение температуры в исследуемом пламени.

Ключевые слова: пламя, управление горением, электрическое поле, оптические методы, LIF, поле температуры.

DOI 10.15372/FGV2024.9469

EDN AMDFFY

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение стабилизации пламени в горелочных устройствах является актуальной задачей, решаемой, как правило, с организацией локальных зон рециркуляции (или застойных зон). Однако в таких условиях может возникать локальный перегрев элементов горелочного устройства. Возникновение больших зон рециркуляции приводит также к повышенным гидравлическим потерям в тракте горелочного устройства. Более того, при сжигании смесей со значительным избытком воздуха, что является в настоящее время основной технологией снижения вредных выбросов (NO_x , сажи) в камерах сгорания, следует избегать больших зон рециркуляции, в которых продукты горения находятся длительное время. Поэтому актуальной задачей является развитие альтернативных методов стабилизации пламени в камерах сгорания. Такие методы стабилизации пламени в горелочных устройствах и в целом методы управления процессами горения в технических приложениях реализуются на основе применения различных типов внешнего воздействия, например акустических волн, магнитных и электрических полей. Влияние внешних электрических полей на область горения было отмечено еще в 20–30-х годах прошлого века [1–3] и сразу вызвало интерес к причинам этого влияния и методам управления пламенем с помощью использования внешних электрических полей. В частности, организация горения в электрическом поле может быть использована для повышения устойчивости пламени [4, 5].

Выделяют различные физические и химические механизмы влияния электрического поля на пламя [6]. При наложении электрического поля большой напряженности с малой

силой тока при атмосферном давлении (напряженность больше либо близка к значениям для тлеющего разряда, $\gtrsim 1500$ кВ/м) электрический ток протекает непосредственно через пламя, которое имеет конечное сопротивление. В результате можно ожидать увеличения температуры пламени за счет сопротивления току, а также увеличения скорости горения. Достаточно сильные электрические поля ($150 \div 1500$ кВ/м при атмосферном давлении) влияют на кинетику химического реагирования, ускоряя электроны до энергий, способных возбуждать, диссоциировать или ионизировать нейтральные частицы при столкновении [5]. Поля, которые слишком слабы, чтобы непосредственно влиять на горение (до 150 кВ/м при атмосферном давлении), могут вызывать значительные гидродинамические потоки — так называемый ионный ветер, который в том числе может способствовать формированию конвективного теплового потока [7–9], — за счет передачи импульса от ускоренных заряженных частиц (ионов) нейтральному газу [10].

Если сведений о значительном влиянии электрического поля на скорость распространения пламени имеется в литературе достаточно, то данных о влиянии на температуру практически нет. Важным фактором является способ наложения электрического поля на область горения. Например, для организации однородного электрического поля вдоль потока газов используют плоский электрод, расположенный над пламенем, с возможностью подачи напряжения на горелку. Для наложения поперечного электрического поля применяют два плоских параллельных электрода с разноименными зарядами, расположенных вдоль потока и тем самым образующих конденсатор [11]. Также могут использоваться цилиндрические электроды, например для образования огневой стенки камеры сгорания [12]. При исследовании влияния собственного поля пламени на однородность внешнего электрического поля, создаваемого электродами в различных конфигурациях, был сделан вывод о том, что параллельные пластины и цилиндрические электроды создают наиболее однородное поле в области горения [13]. Полярность подключения электродов влияет на направление движения ионов (в случае низких напряжений) и тем самым на растяжение, сжатие или отклонение пламени в сторону катода, что позволяет стабилизировать пламя или, наоборот, способствует его уносу/погасанию.

Например, при наложении продольного электрического поля в конфигурации с расположением катода над пламенем происходят изменения в высоте и форме пламени этанола [14]. При увеличении напряжения на катоде сужается поверхность химических реакций, что приводит к уменьшению размера пламени и приданию ему сферической, округлой формы. Аналогично исследовано влияние направления силовых линий продольного внешнего электрического поля на устойчивость горения пламени. Обнаружено, что условия стабильности фронта пламени и его формы зависят от напряженности электрического поля [15, 16] и полярности прикладываемого на электроды напряжения [17, 7, 8]. При наложении электрического поля до 300 кВ/м независимо от направления силовых линий фронт пламени приобретает устойчивую форму, увеличивается его светимость. Однако при дальнейшем повышении напряженности поля возникают мерцания, связанные с деформацией фронта пламени. Кроме того, как отмечается в работе [18], электрическое поле оказывает сильное влияние на образование и эмиссию сажи. Под действием постоянного продольного поля ламинарное диффузионное пламя этилена становится радиально шире и короче, объемная доля сажи уменьшается, а диаметр частиц несколько увеличивается. При размещении ламинарного пламени в однородном поперечном поле также наблюдается деформация фронта пламени. На основе этого сделаны выводы о том, что влияние электрического поля локализовано в зоне химических реакций [19]. В обзорной статье [20] установлено, что основным эффектом при горении в электрическом поле являются электрохимические реакции во фронте пламени, которые способствуют повышению пределов стабильного горения и скорости фронта пламени при наложении продольного

поля с линиями напряженности, направленными против распространения смеси. Также было установлено, что электрическое поле постоянной напряженности оказывает меньшее влияние на горение по сравнению с электрическим полем импульсно-периодической напряженности.

В работах [21–23] представлены результаты исследования влияния постоянного и переменного электрического поля на горение ламинарного пламени с целью уточнения модели ионного ветра, приведены основные химические реакции, происходящие в процессе хемоионизации во фронте пламени, с учетом концентрации образовавшихся ионов, оказывающих наибольшее влияние на деформацию фронта пламени. В работах [24, 25] изучались механизмы стабилизации осесимметричных пламен предварительно перемешанных смесей под действием переменного поля в диапазоне частот $60 \div 1\,000$ Гц. Сделан вывод, что скорость межмолекулярных столкновений между ионами, ускоренными полем и нейтральными, является фактором, ограничивающим время развития ионного ветра. Таким образом, была обнаружена частота переходного режима в районе $40 \div 50$ Гц, при которой частоты выше данных значений будут менять полярность на электродах прежде, чем влияние ионного ветра станет значительным.

В ряде работ, посвященных исследованию влияния электрического поля на пламя, используются современные оптические методы измерений, такие как анемометрия по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry, PIV), лазерно-индуцированная флуоресценция (Laser-Induced Fluorescence, LIF) [14–16, 18–23] и др. С использованием метода PIV были получены поля скорости в пламенах и в отдельных областях горения, что позволило сделать выводы об изменении скорости и направления движения участков пламени при наличии внешнего электрического поля. Применение метода LIF ограничено, он позволяет лишь измерять поля температуры в пламени в конфигурациях без электрического поля [26, 27] и регистрировать сигналы флуоресценции отдельных молекул при наличии внешнего электрического поля (ОН, NO и др.) [15]. Таким образом, исследования области горения во внешнем электрическом поле данными оптическими методами, и в частности получение количественной оценки изменения температуры под действием электрического поля, практически отсутствуют в литературе и являются актуальной задачей.

Цель данной работы заключалась в экспериментальном исследовании влияния постоянного электрического поля на ламинарное пламя в форме конуса. Акцент в работе сделан на количественной оценке распределения температуры без наложения электрического поля и при его наличии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальный стенд включал в себя осесимметричное профилированное сопло (с внутренним диаметром $d = 15$ мм), часть которого выполнена из диэлектрического материала (капролон) для гальванической развязки сопла — земля. Электрическое поле было организовано двумя параллельными металлическими пластинами, установленными вблизи сопла таким образом, чтобы линии напряженности электрического поля были направлены перпендикулярно оси симметрии сопла, вдоль которой истекает поток газа. Площадь пластин (120×120 мм) была достаточной для организации однородной напряженности во всем объеме конуса пламени. Расстояние между пластинами варьировалось в диапазоне $D = 40 \div 70$ мм, расстояние между срезом сопла и нижним краем пластин составляло 5 мм. При помощи высоковольтного источника питания на пластины-электроды подавалось напряжение $U = 2.5$ кВ, что соответствует напряженности электрического поля $E = 62.5$ кВ/м (при расстоянии 40 мм между электродами) в приближении плоского конденсатора. В сопло через трубу-смеситель длиной 70 см поступала предварительно перемешанная смесь горючего газа (метана или пропана) и воздуха. Число Рейнольдса

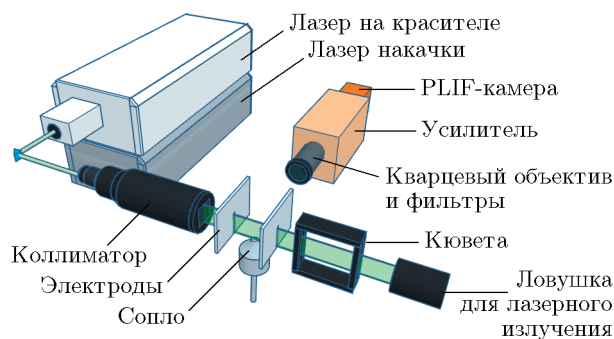


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

для всех измерений составляло $Re = 1000$ и определялось по среднерасходной скорости и вязкости воздуха при комнатной температуре. Коэффициент избытка топлива был равен $\phi = 0.92$ для метана и $\phi = 0.85$ для пропана. Контроль расходов компонентов смеси регулировался массовыми расходомерами Bronkhorst El-Flow. Погрешность определения массовых расходов смеси составляла для воздуха 2.5 %, для горючих газов: метан — 0.8 %, пропан — 1.4 %. Погрешность определения ϕ для метана составляла 3.4 %, для пропана — 3.9 %, для скорости на срезе сопла — 4 %.

Используемый в работе метод для оценки температуры за фронтом пламени «Two-line» OH PLIF основан на регистрации интенсивностей сигналов флуоресценции молекул OH, полученных при возбуждении двумя вспышками лазера с длинами волн, соответствующими переходам $Q_1(5)$ и $Q_1(14)$ в одно возбужденное электронное состояние. Отношение интенсивностей сигналов флуоресценции соотносится с температурой в соответствии с населенностью энергетических уровней согласно распределению Больцмана [28]:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{B_1 I_{\text{laser}1} (2J_1 + 1)}{B_2 I_{\text{laser}2} (2J_2 + 1)} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT}\right). \quad (1)$$

Здесь I_1 и I_2 — сигналы флуоресценции при возбуждении первого и второго переходов, I_{laser} — энергия лазерного импульса, B — коэффициент поглощения Эйнштейна основного состояния, $2J + 1$ — вырождение уровня, где J — вращательное квантовое число, E — энергия уровней, из которых происходит возбуждение, k — постоянная Больцмана, T — температура. Значения энергии уровней в основном состоянии E_1 и E_2 взяты из работы [29].

В качестве источника излучения при реализации метода плоскостной лазерно-индуцированной флуоресценции использовалась система из импульсного лазера накачки Nd: YAG QuantaRay (532 нм) и перестраиваемого импульсного лазера на красителе Sirah Precision Scan, с помощью которой производилось возбуждение флуоресценции молекул OH на длине волны переходов $Q_1(5)$ и $Q_1(14)$ (282.66 нм и 286.37 нм соответственно) полосы (1–0) электронной системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$. Согласно результатам работы [30] используемая в эксперименте пара линий возбуждения обладает наибольшей чувствительностью к температуре, имеет хорошее соответствие с теоретической зависимостью в диапазоне $1200 \div 2100$ K и с измерениями на основе спонтанного комбинационного рассеяния [31]. С помощью коллимирующей оптики LaVision лазерный луч, выходящий из лазера на красителе, разворачивался в коллимированный лазерный нож и освещал центральное сечение потока, проходя сквозь отверстия в пластинах-электродах. Энергия каждого лазерного импульса составляла 10 мДж до коллимирующей оптики. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

Регистрация сигнала флуоресценции линий колебательных переходов (1–1) и (0–0) (в диапазоне $300 \div 320$ нм) проводилась с помощью интенсифицированной КМОП-камеры LaVision Imager sCMOS. Камера была оснащена электронно-оптическим усили-

телем (LaVision IRO), кварцевым объективом, способным пропускать излучение в ультрафиолетовом диапазоне, и полосовым оптическим фильтром (310 ± 10 нм), позволяющим исключить влияние излучения на длине волны лазера и выделить необходимый диапазон длин волн в спектре флуоресценции радикала ОН. Для каждой линии возбуждения ($Q_1(5)$ и $Q_1(14)$) сигнал флуоресценции молекул ОН регистрировался отдельно. Далее полученные сигналы делили друг на друга для определения температуры, как описано выше. КМОП-камера также использовалась для учета неравномерности распределения энергии в лазерном ноже путем регистрации сигнала флуоресценции в кварцевой прямоугольной прозрачной кювете, наполненной раствором родамина 6G. Регистрация проводилась после съемки каждого исследуемого режима горения (500 кадров) путем перемещения координатным механизированным устройством кюветы на место сопла, при этом режим работы лазера не менялся.

Перед началом измерений поля температуры выполнялась проверка линейного режима флуоресценции. Для этого проводилась регистрация сигнала флуоресценции молекул ОН при возбуждении на длинах волн линий $Q_1(5)$ и $Q_1(14)$ в исследуемом пламени при варьировании энергии лазерного импульса. Анализ зависимости нормированного сигнала от энергии лазерного излучения показал, что энергия лазера 10 ± 0.3 мДж для обоих газов обеспечивает оптимальные условия измерений. При таком значении достигается высокая интенсивность сигнала флуоресценции без перехода в режим насыщения, что позволяет проводить измерения в линейной области метода LIF.

Осреднение сигнала флуоресценции проводилось по 500 мгновенным изображениям для каждого режима горения. К мгновенным распределениям сигнала флуоресценции была применена обработка изображений, включающая в себя вычет фона, учет неравномерности распределения интенсивности в лазерном ноже, учет энергии лазерного излучения от вспышки к вспышке и пространственную калибровку с использованием плоской калибровочной мишени Edmund Optics.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для определения влияния электрического поля на форму пламени проводилась его визуализация. На рис. 2 представлены фотографии пламени метана в форме конуса ($Re = 1000$, $\phi = 0.92$), сделанные цифровым фотоаппаратом, установленным напротив пламени (у полученных снимков цвет был инвертирован). Результаты визуализации свидетельствуют, что под воздействием внешнего электрического поля фронт пламени вблизи

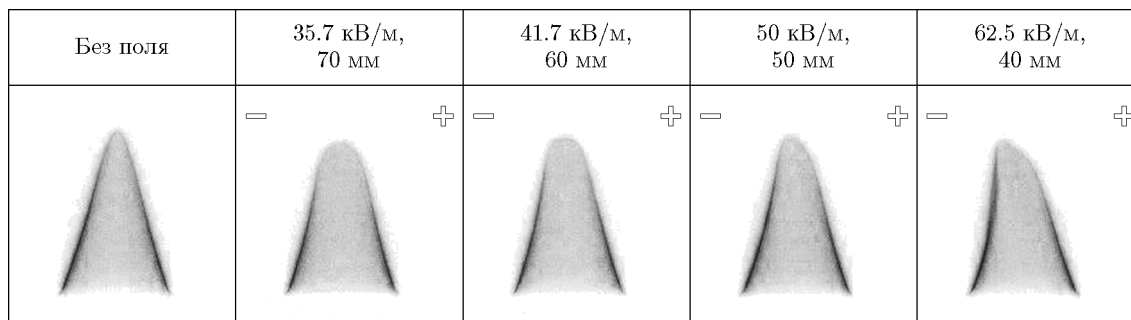


Рис. 2. Результаты визуализации пламени метановоздушной смеси при наличии/отсутствии внешнего электрического поля при $Re = 1000$ и $\phi = 0.92$: в верхней строке указаны напряженность электрического поля E , расстояние между пластинами D и полярность прикладываемого напряжения

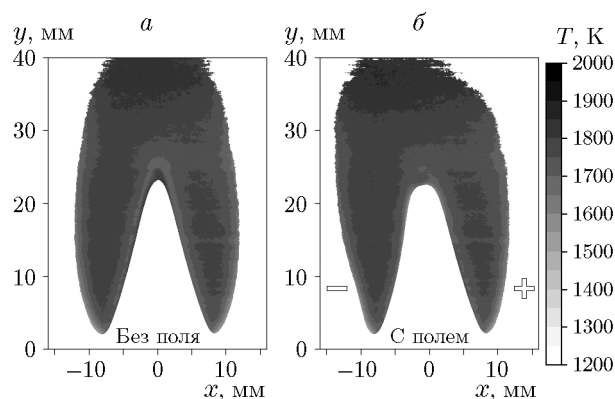


Рис. 3

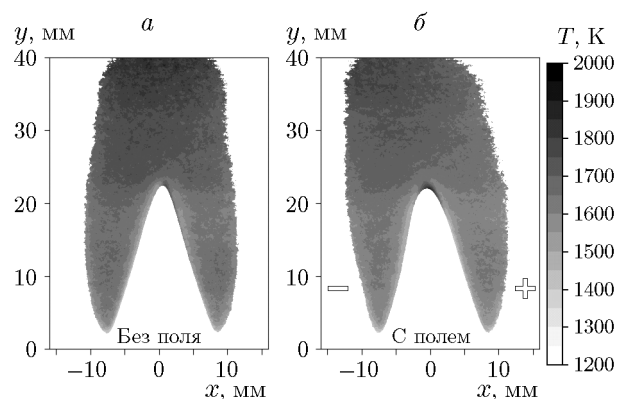


Рис. 4

Рис. 3. Поле температуры метановоздушной смеси в зависимости от наличия/отсутствия внешнего электрического поля при $Re = 1000$ и $\phi = 0.92$

Рис. 4. Поле температуры пропановоздушной смеси в зависимости от наличия/отсутствия внешнего электрического поля при $Re = 1000$ и $\phi = 0.85$

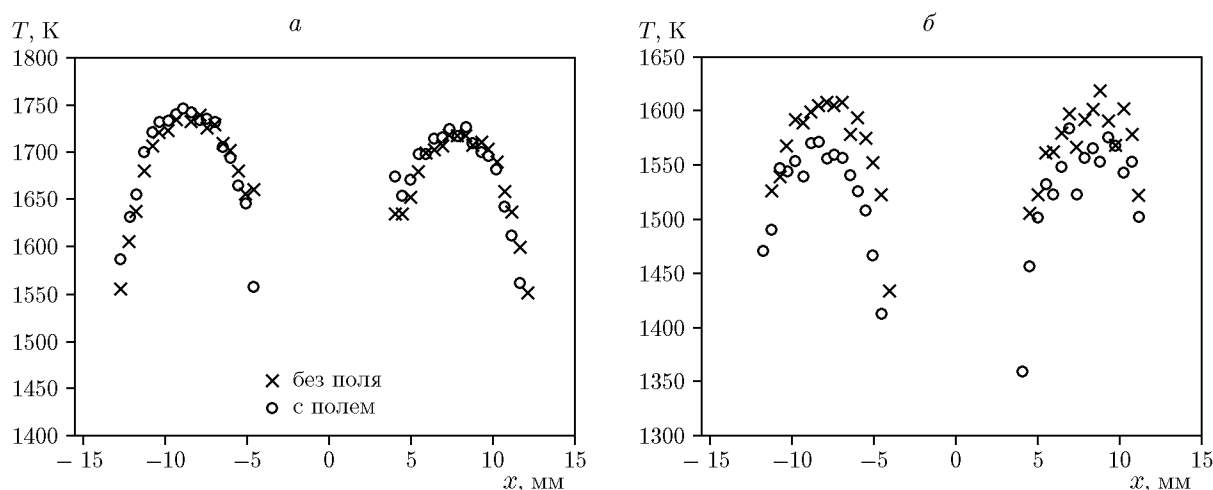


Рис. 5. Профили средней температуры метановоздушного (а) и пропановоздушного (б) пламени на высоте 15 мм над срезом сопла

верхней части конуса растягивается, а затем при увеличении напряженности поля явно отклоняется в сторону одного из электродов (катода).

Для получения поля средней температуры пламени метановоздушной смеси без наложения внешнего электрического поля и при его наличии (рис. 3) использовалось отношение сигналов флуоресценции при двух различных линиях возбуждения, а также известная зависимость между отношением сигналов и температурой [28, 29]. Аналогичным способом получено поле температуры (рис. 4) в пламени пропановоздушной смеси. Предельная приведенная погрешность определения температуры используемым методом составляет 5 % [26, 30]. Напряженность электрического поля в обоих случаях была максимальной — $E = 62.5$ кВ/м. Отображение черно-белой градации поля температуры (как и цветовой шкалы) представлено с дискретизацией в 50 К.

На рис. 5 приведены профили температуры в исследуемых пламенах, полученные из поля средней температуры в сечении $y = 15$ мм над срезом сопла. Положение построено

го профиля температуры равноудалено от областей, где, с одной стороны, фронт пламени начинает заметно отклоняться от положения фронта в случае без электрического поля, а с другой стороны, он отклоняется от верхней части конуса, которая скругляется и размывается на осредненных распределениях (из-за продольных колебаний положения), что могло сказаться на измерениях температуры. Разрыв профилей температуры посередине (отсутствие сигнала над соплом) связан с тем, что температура внутри конуса и за пределами горячих продуктов горения не определена ввиду низкого сигнала PLIF из-за малого количества молекул ОН в данных областях. Из полученных данных видно, что температура в выбранном сечении метановоздушного пламени не изменяется в зависимости от наличия внешнего электрического поля. В случае его наличия температура пропановоздушного пламени лишь незначительно уменьшается (порядка 50 К), что находится в пределах погрешности определения температуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлена оценка поля температуры в пламени предварительно перемешанных метановоздушной ($\phi = 0.92$) и пропановоздушной ($\phi = 0.85$) смесей под действием постоянного электрического поля и без него при $Re = 1000$. Результаты проведенной визуализации свидетельствуют об изменении формы фронта пламени (отклонении верхней части конуса в сторону катода) под воздействием ионного ветра, вызванного наличием внешнего слабого электрического поля. Полученные методом «Two-line» PLIF данные, а именно среднее поле температуры (а также построенные по полю профили температуры в сечении $y = 15$ мм над срезом сопла), свидетельствуют о слабом влиянии наложения внешнего электрического поля на распределение температуры в продуктах горения. Различия значений температуры в случае наличия или отсутствия электрического поля находится в области погрешности измерений. Полученные данные могут быть использованы в дальнейшем для верификации методов численного моделирования.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00803, <https://rscf.ru/project/22-19-00803/>). Оборудование предоставлено в рамках государственного задания Институту теплофизики СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лаутон Д., Вайнберг Ф. Электрические аспекты горения. — М.: Энергия, 1976.
2. Лавров Ф. А., Малиновский А. Э. Влияние продольного электрического поля на процесс горения газовых смесей // Журн. физ. химии. — 1933. — Т. 4, № 1. — С. 104–108.
3. Малиновский А. Э., Егоров К. Е. Влияние электрического поля на процессы горений при пониженных давлениях // ЖЭТФ. — 1934. — Т. 4, № 2. — С. 208–214.
4. Payne K. G., Weinberg F. J. A preliminary investigation of field-induced ion movement in flame gases and its applications // Proc. Roy. Soc. London, Ser. A. — 1959. — V. 250, N 1262. — P. 316–336. — DOI: 10.1098/rspa.1959.0066.
5. Starikovskaia S. M. Plasma assisted ignition and combustion // J. Phys. D: Appl. Phys. — 2006. — V. 39, N 16. — R265. — DOI: 10.1088/0022-3727/39/16/R01.
6. Fialkov A. B. Investigations on ions in flames // Prog. Energy Combust. Sci. — 1997. — V. 23, N 5-6. — P. 399–528. — DOI: 10.1016/S0360-1285(97)00016-6.

7. **Ягодников Д. А., Воронецкий А. В.** Особенности стабилизации пропановоздушного пламени при наложении продольного и поперечного электрического поля // *Физика горения и взрыва*. — 1995. — Т. 31, № 1. — С. 40–45. — EDN: KTAPLJ.
8. **Ягодников Д. А.** Влияние электрического поля на стабилизацию турбулентного пропановоздушного пламени // *Физика горения и взрыва*. — 1998. — Т. 34, № 1. — С. 20–24.
9. **Robinson M.** A history of the electric wind // *Am. J. Phys.* — 1962. — V. 30, N 5. — P. 366–372. — DOI: 10.1119/1.1942021.
10. **Lawton J., Weinberg F. J.** Maximum ion currents from flames and the maximum practical effects of applied electric fields // *Proc. Roy. Soc. London, Ser. A.* — 1964. — V. 277, N 1371. — P. 468–497. — DOI: 10.1098/rspa.1964.0035.
11. **Степанов Е. М., Дьячков Б. Г.** Ионизация в пламени и электрическое поле — М.: Металлургия, 1968.
12. **Ягодников Д. А.** Исследование влияния электрического поля на характеристики теплообмена в камере сгорания с пористым трактом охлаждения // *Теплофизика высоких температур*. — 2001. — Т. 79, № 5. — С. 788–793.
13. **Dolmansley T. J. C., Wilson C. W., Stone D. A.** Electrical modification of combustion and the affect of electrode geometry on the field produced // *Model. Simul. Eng.* — 2011. — V. 2011, N 14. — P. 1–13. — DOI: 10.1155/2011/676428.
14. **Luo Y., Gan Y., Jiang X.** Investigation of the effect of DC electric field on a small ethanol diffusion flame // *Fuel*. — 2017. — V. 188. — P. 621–627. — DOI: 10.1016/j.fuel.2016.10.073.
15. **Kuhl J., Seeger T., Zigan L., Will S., Leipertz A.** On the effect of ionic wind on structure and temperature of laminar premixed flames influenced by electric fields // *Combust. Flame*. — 2017. — V. 176. — P. 391–399. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.10.026.
16. **Gillon P., Gilard V., Idir M., Sarh B.** Electric field influence on the stability and the soot particles emission of a laminar diffusion flame // *Combust. Sci. Technol.* — 2019. — V. 191, N 2. — P. 325–338. — DOI: 10.1080/00102202.2018.1467404.
17. **Ягодников Д. А., Воронецкий А. В.** Влияние внешнего электрического поля на особенности процессов воспламенения и горения // *Физика горения и взрыва*. — 1994. — Т. 30, № 3. — С. 3–12. — EDN: KSYTJT.
18. **Sayed-Kassem A., Gillon P., Idir M., Gilard V.** On the effect of a DC electric field on soot particles' emission of a laminar diffusion flame // *Combust. Sci. Technol.* — 2022. — V. 194, N 1. — P. 213–224. — DOI: 10.1080/00102202.2019.1678901.
19. **Третьяков П. К., Тупикин А. В., Денисова Н. В., Ганеев О. В., Замашников В. В., Козорезов Ю. С.** Ламинарное пропановоздушное пламя в слабом электрическом поле // *Физика горения и взрыва*. — 2012. — Т. 48, № 2. — С. 9–14. — EDN: OXMNJD.
20. **Ma Y., Li T., Yan J., Wang X., Gao J., Sun Z.** A comprehensive review of the influence of electric field on flame characteristics // *Preprints*. — 2020. — DOI: 10.20944/preprints202010.0454.v1.
21. **Belhi M., Domingo P., Vervisch P.** Modelling of the effect of DC and AC electric fields on the stability of a lifted diffusion methane/air flame // *Combust. Theory Model.* — 2013. — V. 17, N 4. — P. 749–787. — DOI: 10.1080/13647830.2013.802415.
22. **Belhi M., Domingo P., Vervisch P.** Effect of electric field on flame stability // *Proc. of the European Combustion Meeting, Vienna, Austria, 2009*.
23. **Starikowskii A., Skoblin M., Hammer T.** Influence of weak electric fields on flame structure // 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 7–10 Jan. 2008, Reno, Nevada. — AIAA 2008-995. — DOI: 10.2514/6.2008-995.

24. **Kim M. K., Chung S. H., Kim H. H.** Effect of AC electric fields on the stabilization of premixed bunsen flames // *Proc. Combust. Inst.* — 2011. — V. 33, N 1. — P. 1137–1144. — DOI: 10.1016/j.proci.2010.06.062.
25. **Kim M. K., Chung S. H., Kim H. H.** Effect of electric fields on the stabilization of premixed laminar bunsen flames at low AC frequency: Bi-ionic wind effect // *Combust. Flame.* — 2012. — V. 159, N 3. — P. 1151–1159. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.10.018.
26. **Dulin V., Sharaborin D., Tolstoguzov R., Lobasov A., Chikishev L., Markovich D., Wang S., Fu C., Liu X., Li Y., Gao Y.** Assessment of single-shot temperature measurements by thermally-assisted OH PLIF using excitation in the $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ (1-0) band // *Proc. Combust. Inst.* — 2021. — V. 38, N 1. — P. 1877–1883. — DOI: 10.1016/j.proci.2020.07.025.
27. **Giezendanner-Thoben R., Meier U., Meier W., Aigner M.** Phase-locked temperature measurements by two-line OH PLIF thermometry of a self-excited combustion instability in a gas turbine model combustor // *Flow, Turbul. Combust.* — 2005. — V. 75. — P. 317–333. — DOI: 10.1007/s10494-005-8587-0.
28. **Devillers R., Bruneaux G., Schulz C.** Development of a two-line OH-laser-induced fluorescence thermometry diagnostics strategy for gas-phase temperature measurements in engines // *Appl. Opt.* — 2008. — V. 47, N 31. — P. 5871–5885. — DOI: 10.1364/AO.47.005871.
29. **Dieke G. H., Crosswhite H. M.** The ultraviolet bands of OH fundamental data // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* — 1962. — V. 2, N 2. — P. 97–199. — DOI: 10.1016/0022-4073(62)90061-4.
30. **Лобасов А. С., Толстогузов Р. В., Шараборин Д. К., Чикишев Л. М., Дулин В. М.** Об эффективности использования различных линий возбуждения перехода (1–0) флуоресценции ОН для панорамной термометрии // *Теплофизика и аэромеханика.* — 2021. — Т. 28, № 5. — С. 793–797. — EDN: KKTYAD.
31. **Шараборин Д. К., Маркович Д. М., Дулин В. М.** Панорамная спектроскопия спонтанного комбинационного рассеяния для диагностики струйных реагирующих потоков с использованием перестраиваемого фильтра Лию — Эмана // *Письма в ЖТФ.* — 2018. — Т. 44, № 2. — С. 32–40. — DOI: 10.21883/PJTf.2018.02.45462.16879. — EDN: YUTRAX.

Поступила в редакцию 02.04.2024.

После доработки 16.07.2024.

Принята к публикации 21.08.24.