ВЕСТНИК ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
2025 Математика и механика № 95
Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics

# МЕХАНИКА

# MECHANICS

Научная статья
УДК 533, 536.46
doi: 10.17223/19988621/95/6

## Влияние электрического поля на диффузионное горение метана

**Михаил Владимирович Агафонцев[1], Ася Алексеевна Старосельцева[2], Владимир Владимирович Рейно[3], Егор Леонидович Лобода[4]**

*[1, 2, 4] Томский государственный университет, Томск, Россия*
*[1, 3, 4] Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской Академии наук, Томск, Россия*
*[1] amv@mail.tsu.ru*
*[2] 222-pro@mail.ru*
*[3] reyno@iao.ru*
*[4] loboda@mail.tsu.ru*

**Аннотация.** Рассмотрено влияние электрического поля на факел пламени метана. Подготовлен экспериментальный стенд, позволяющий проводить физическое моделирование диффузионного горения метана при наличии внешних источников возмущений в виде электрического поля различной интенсивности. Проведен анализ полей температуры в факеле пламени метана с применением метода инфракрасной термографии. Получено, что при внешнем воздействии электрического поля до 4 кВ происходит уменьшение максимальной амплитуды пульсации температуры, а последующее увеличение напряжения приводит к резкому падению максимальной амплитуды до 4 К. Пульсации температуры связаны со структурой течения в факеле и с пульсациями гидродинамических параметров.
**Ключевые слова:** термография, пульсации температуры, структура пламени, метан, спектр изменения температуры

**Благодарности:** Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-71-10029.

**Для цитирования:** Агафонцев М.В., Старосельцева А.А., Рейно В.В., Лобода Е.Л. Влияние электрического поля на диффузионное горение метана // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2025. № 95. С. 59–71. doi: 10.17223/19988621/95/6

© М.В. Агафонцев, А.А. Старосельцева, В.В. Рейно, Е.Л. Лобода, 2025

Original article

# Effect of an electric field on methane diffusion combustion

**Mikhail V. Agafontsev[1], Asya A. Starosel'tseva[2], Vladimir V. Reyno[3], Egor L. Loboda[4]**

*[1, 2, 4] Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*
*[1, 3, 4] V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russian Federation*
*[1] amv@mail.tsu.ru*
*[2] 222-pro@mail.ru*
*[3] reyno@iao.ru*
*[4] loboda@mail.tsu.ru*

**Abstract.** This paper considers the effect of an electric field on the methane flame plume. The main purpose of this study is to determine the characteristic regimes of the effect of an external electric field on the methane combustion, which are characterized by significant changes in the temperature pulsation spectrum. The temperature distribution in the methane flame plume was analyzed by infrared thermography. When the flame was exposed to an electric field up to a voltage of 4.0 kV, the maximum amplitude of temperature pulsation decreased from 20 K to 12 K. At a voltage of 4.5 kV, a significant reduction in temperature pulsation amplitude was observed up to 4 K. In the voltage range of 5.0 – 8.0 kV, the temperature pulsations in the flame plume were minimal, and there were no characteristic frequency maxima in the spectrum. Further increase of voltage up to 10 kV again led to the appearance of frequency maxima, but they were shifted toward lower frequencies by 3 Hz. The maximum amplitude of the temperature pulsations became equal to 10 Hz, as well as three subsequent harmonics (20, 30, and 40 Hz). The temperature change in the flame plume is related to the flow structure and chemical reactions. This is caused by changes in the main hydrodynamic parameters (velocity, pressure, density, etc.), which in turn affect the transfer coefficients. This fact has an impact on the oxidizer entry into the combustion zone and the chemical reactions occurring in the flame. Thus, the presence of an external electric field has a significant effect on the variation of all the above parameters and leads to changes in the shape and height of the flame, as well as in the characteristic temperatures.

**Keywords:** thermography, temperature pulsations, flame structure, methane, temperature pulsation spectrum

**Acknowledgments:** This study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-71-10029).

**For citation:** Agafontsev, M.V., Starosel'tseva, A.A., Reyno V.V., Loboda E.L. (2025) Effect of an electric field on methane diffusion combustion. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 95. pp. 59–71. doi: 10.17223/19988621/95/6

## Введение

Проведено множество исследований, посвященных процессам, происходящим при горении метановоздушных смесей. Эффективное сжигание метана и разработка соответствующих методик представляют собой сложную научно-техническую задачу.

Одной из актуальных тем для изучения остается проведение расчетных и экспериментальных работ по поиску различных методов воздействия на факел пламени, которые способствуют интенсификации процессов горения метана и диффузии с окружающим воздухом. Введение в основной горючий газ различных добавок является одним из таких методов. Например, некоторые исследования показали, что добавление водорода к метану увеличивает коэффициент полноты его сгорания [1–11]. Также отмечается, что использование различных порошков [12, 13], таких как субмикронные частицы алюминия и микронные частицы хлорида натрия (NaCl) [12], влияет на скорость горения.

В отдельный класс можно выделить различные внешние воздействия на процесс горения. К ним можно отнести звуковые колебаний и электрическое поле. Авторы исследований [14–17] утверждают, что использование акустических волн может быть эффективным методом контроля и управления режимами горения. Они подчеркивают потенциал таких исследований для тушения пожаров, однако точное объяснение механизма тушения в настоящее время затруднено из-за недостатка теоретических и экспериментальных данных. Некоторые исследователи отмечают, что акустические колебания оказывают влияние на диффузионное горение пропана в микроструях [18], что приводит к разделению пламени на две части (бифуркация) и его расширению в определенной плоскости под воздействием поперечного акустического поля. При высокочастотном акустическом воздействии на факел пламени пропановоздушной смеси отмечается эффект бифуркации, который помогает снизить концентрацию NO*x*, температуру пламени и улучшить перемешивание топлива с воздухом. Акустические волны, действуя на поверхность горючего, увеличивают скорость его испарения, что позволяет снизить температуру горения и прекратить процесс горения. В работах [19–22] исследованы некоторые режимы инфразвукового воздействия на факел пламени углеводородов. При воздействии на пламя инфразвуковых пульсаций наблюдается характерный отклик в спектре изменения температуры в виде максимумов амплитуд, частота которых соответствует частоте внешнего воздействия.

Относительно влияния электромагнитного поля на факел пламени авторы отмечают, что, помимо изменения геометрии факела, данное воздействие приводит к увеличению скорости горения топлива и расширению диапазона устойчивых режимов горения без срывов потока. В работе [23] рассматривается влияние электрического поля на плазму оптического разряда в сверхзвуковом воздушном потоке. Авторы показали, что плазма, генерируемая сфокусированным лазерным излучением, обладает высокой чувствительностью к электрическому полю, и при приложении напряжения 22 кВ было зафиксировано тушение оптического разряда. Ф.Ш. Хафизовым, А.В. Пермяковым и соавт. [24] отмечена перспективность использования электромагнитного воздействия на факел пламени как средства, позволяющего подавить процесс горения. Ими отмечено, что пламя, помещенное в электромагнитное поле напряженности свыше 1 кВ, гаснет, а перед этим факел отклоняется в сторону отрицательного электрода из-за большего количества положительно заряженных ионов. В работах [25, 26] проведено исследование влияния электрического поля на процесс горения метановоздушного диффузионного пламени. Результаты исследования показали, что электрическое поле значительно влияет на поведение пламени, в основном за счет эффектов ионного ветра. В [27] авторы исследуют влияние электрических полей на образование конденсированной фазы

в ламинарном, диффузионном пламени метана. Они делают вывод, что электрические поля могут значительно изменять структуру пламени, уменьшая образование сажи и улучшая стабильность горения. Авторы отмечают, что ионный ветер, возникающий в результате действия электрического поля, способствует изменению распределения температуры и концентрации веществ, участвующих в реакции горения, в пламени.

В настоящей работе представлено исследование изменения мгновенных полей температуры в факеле пламени метана при воздействии на него электрического поля. С использованием метода ИК-термографии были получены наборы термограмм, дальнейшая обработка которых осуществлялась и использованием программного обеспечения Altair и FFT (Fast Fourier Transform – быстрое преобразование Фурье). Цель работы – определение характерных режимов внешнего воздействия электрическим полем на процесс горения метана, при котором происходят значительные изменения в спектре пульсации температуры.

## Описание физического эксперимента

Проведено экспериментальное исследование влияния электрического поля на факел пламени метана. Для этого был подготовлен экспериментальный стенд, который включал в себя: горелочное устройство ГСП-3, закрепленное на столешнице таким образом, чтобы сопловая ее часть располагалась вертикально; державку с закрепленными на ней электродами; двухполярный источник высоковольтного напряжения ВИДН-30. Электроды были выполнены из латуни и имели форму диска диаметром 39 мм. Напряжение между электродами менялось с шагом 0.5 кВ. С обратной стороны электрода была припаяна латунная шпилька с резьбой для возможности крепления на державку и установки контактного соединения с высоковольтным источником. Поверхность электрода, обращенная к пламени, была отполирована. Позиционирование электродов осуществлялось таким образом, чтобы нижняя кромка электрода находилась на 2 мм выше сопла горелки (рис. 1).

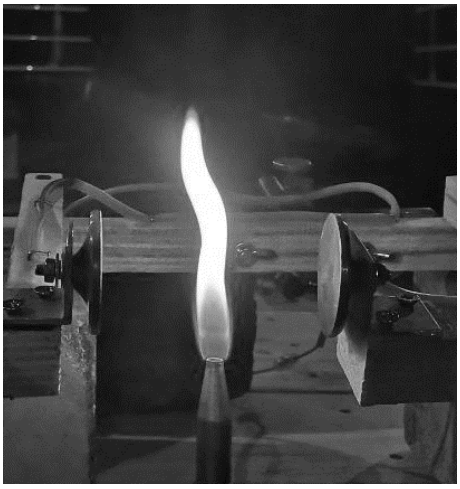

**Рис. 1.** Факел пламени, образующийся при горении метана
**Fig. 1.** Methane flame plume

В качестве горючего газа использовался метан, скорость истечения которого из сопловой части горелки контролировалась с использованием термоанемометра KURZ 444 M. Состав рабочего газа приведен в табл. 1. Анализ газовой смеси проводился на газохроматографическом комплексе «Кристалл 5000.2». Относительная погрешность анализа не превышала 2%.

Таблица 1

**Химический состав горючего газа**

| Название компонента | Объемная доля компонента, % |
|---|---|
| Кислород | 0.002 |
| Азот | 0.13 |
| Водяные пары | 0.001 |
| Углеводороды состава $C_3$–$C_6$ | 0.0002 |
| Серосодержащие соединения | Отсутствуют |
| Монооксид углерода CO | 0.00002 |
| Диоксид углерода $CO_2$ | Отсутствует |
| Метан $CH_4$ | Остальное |

Для регистрации температуры в факеле пламени применялся метод ИК-термографии. В качестве регистрирующей аппаратуры была использована инфракрасная камера JADE J530SB с узкополосным оптическим фильтром с полосой пропускания от 2.5 до 2.7 мкм [28]. Частота регистрации составляла 150 кадров в секунду, а длительность 60 с. Поскольку ИК-камеры калибруются заводом-изготовителем по эталонному излучателю – модели абсолютно черного тела, для корректного определения температуры в факеле пламени необходимо знать коэффициент излучения. Для этого было проведено дополнительное измерение температуры пламени термопарным способом. Использовалась термопара типа К (хромель-алюмель) с диаметром спая 200 мкм. Термопара располагалась над соплом горелки на расстоянии 15 мм. Одновременно измеряя температуру в пламени контактным и бесконтактным способами, было получено значение эффективного коэффициента излучения в пламени $\varepsilon = 0.225$, а усредненная температура в пламени составила 930°C. В табл. 2 приведены параметры, которые менялись в ходе проведения эксперимента.

Таблица 2

**Описание режимов работы экспериментальной установки**

| $d$, мм | $v$, м/с | $L$, мм | $V$, кВ | Номер режима работы |
|---|---|---|---|---|
| 4.0 | 0.5 | 55 | 0 ÷ 5.5 | 1 |
| | 0.5 | 70 | 0 ÷ 10 | 2 |

*Примечание*. $d$ – диаметр сопла горелки; $v$ – скорость истечения газа из сопла горелки; $L$ – расстояние между электродами, $V$ – диапазон изменения напряжения

## Результаты

В ходе регистрации процесса горения метана с использованием внешнего источника возмущений были получены термограммы (рис. 2, 3). Обработка данных проводилась в программной среде Altair следующим образом: в центре факела на одной вертикальной оси было установлено 20 контрольных точек с фиксированным шагом 5 пикселей. Для каждой точки была составлена таблица изменения

температуры во времени. Для получения спектров изменения температуры использовалась программа, разработанная в среде MatLab, которая реализует алгоритм быстрого преобразования Фурье. С ее помощью для каждой контрольной точки был получен спектр изменения температуры. Путем усреднения был сформирован спектр изменения температуры для всего факела пламени.

**Рис. 2.** Термограмма факела пламени (режим 1)
**Fig. 2.** Thermogram of the flame plume (regime 1)

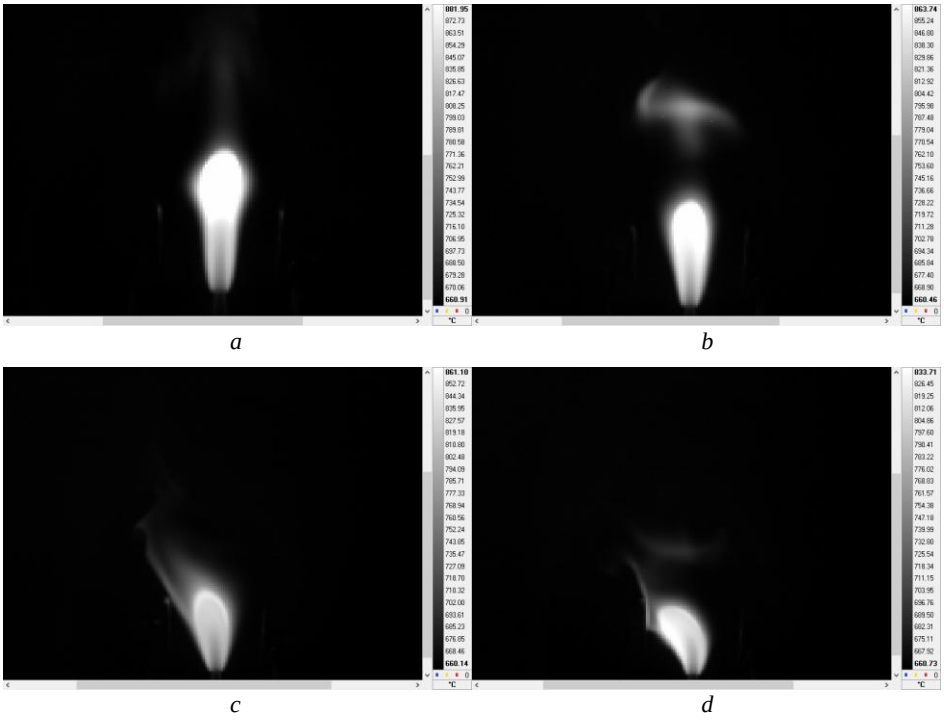


**Рис. 3.** Термограмма факела пламени метана (режим 1), полученная при заданном значении напряжения между электродами (*a* – 1.5 кВ, *b* – 2.5 кВ, *c* – 4.5 кВ, *d* – 5.5 кВ)
**Fig. 3.** Thermogram of the methane flame plume (regime 1) obtained at a given voltage between electrodes: (*a*) 1.5, (*b*) 2.5, (*c*) 4.5, and (*d*) 5.5 kV

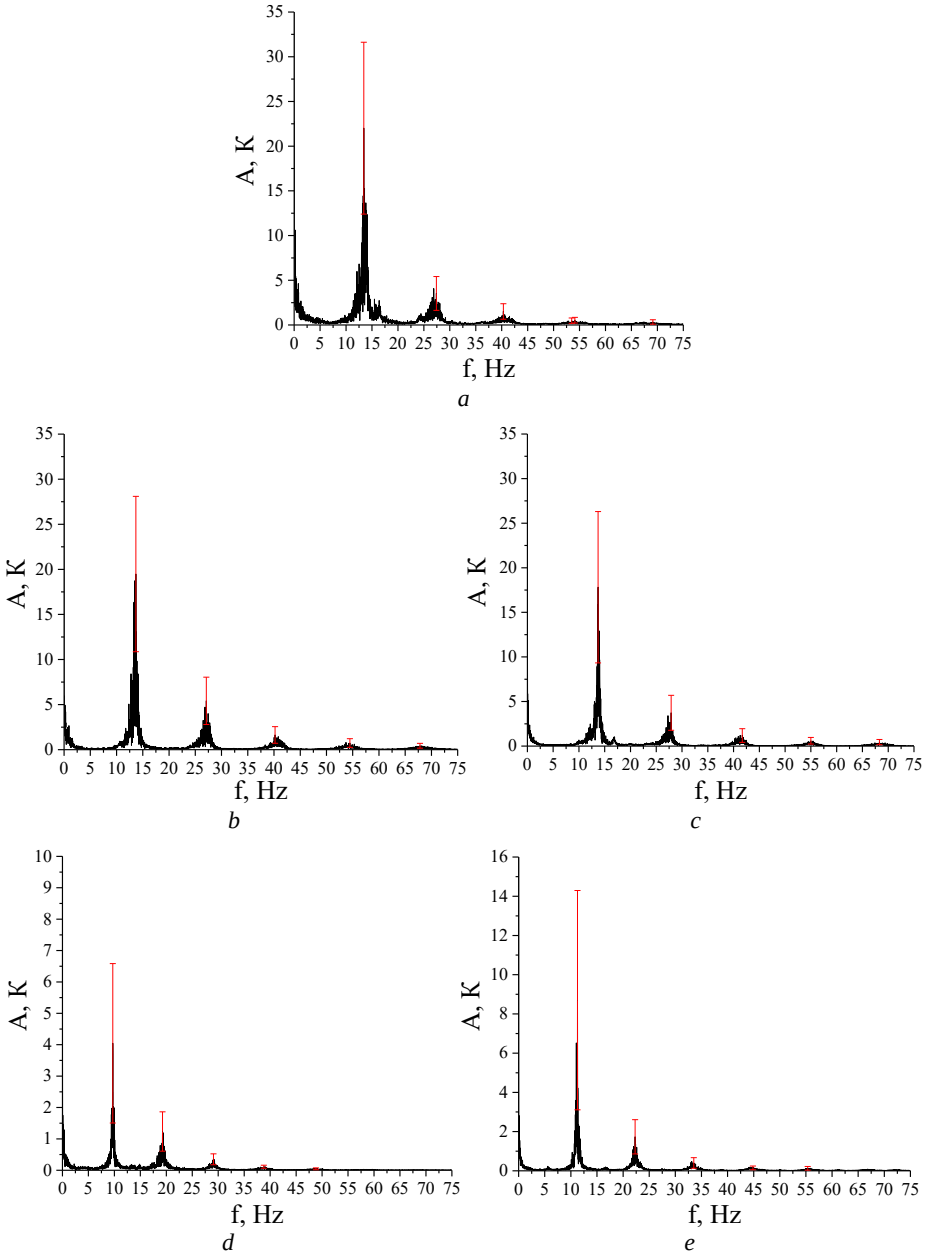


**Рис. 4.** Спектр пульсации температуры в факеле пламени метана при наличии электрического поля с различным напряжением между электродами (*a* – без внешнего воздействия; *b* – 1.5 кВ, *c* – 2.5 кВ; *d* – 4.5 кВ; *e* – 5.5 кВ). Красным цветом выделен доверительный интервал

**Fig. 4.** Spectrum of temperature variation in the methane flame plume in the presence of an electric field with different voltage between electrodes: (*a*) without external action, (*b*) 1.5, (*c*) 2.5, (*d*) 4.5, and (*e*) 5.5 kV. The confidence interval is indicated in red

Стоит отметить, что после усреднения максимальная амплитуда пульсации температуры по своей величине оказывается несколько ниже по сравнению со спектрами, полученными для отдельных точек. Это объясняется тем, что анализ пульсации температуры в пламени проводился на различных участках факела, включая область около сопловой части горелочного устройства, где преимущественно наблюдается ламинарный режим течения продуктов горения.

Воздействие на пламя электрическим полем (режим 1) до напряжения 3.0 кВ проявляется в снижении максимальной амплитуды пульсации температуры (рис. 4) от 23 до 18 К. Последующее увеличение напряжения приводит к резкому уменьшению максимальной амплитуды пульсации температуры до 3 К. При этом основная частота колебаний температуры составляет 13 Гц, и три гармоники (26, 39, 52 Гц) остаются постоянными.

При воздействии на пламя электрическим полем (режим 2) до напряжения 4.0 кВ происходит снижение максимальной амплитуды пульсации температуры (см. рис. 4) от 20 до 12 К. При напряжении 4.5 кВ происходит значительное уменьшение амплитуды пульсации температуры до 4 К. В диапазоне напряжений 5.0–8.0 кВ пульсации температуры в факеле пламени минимальны и в спектре отсутствуют какие-либо характерные частотные максимумы. Это свидетельствует о том, что течение продуктов горения при таком режиме стабилизируется. Дальнейшее увеличение напряжения до 10 кВ снова приводит к появлению частотных максимумов, однако они смещены сторону меньших частот на 3 Гц. Таким образом амплитудный максимум пульсации температуры становится равным 10 Гц, как и три последующие гармоники (20, 30, 40 Гц).

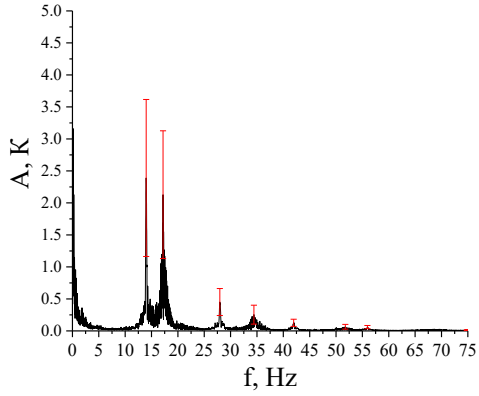


**Рис. 5.** Спектр пульсации температуры в факеле пламени метана при наличии электрического поля (режим 2) с напряжением между электродами 5.5 кВ
**Fig. 5.** Spectrum of temperature variation in the methane flame plume in the presence of an electric field (regime 2) with a voltage between electrodes of 5.5 kV

Следует отметить, что при напряжении выше 3 кВ наблюдается отклонение факела пламени в сторону электрода с отрицательным потенциалом, что, согласно [19], связано с образованием в процессе горения положительных ионов, которое, в свою очередь, приводит к наклону факела. При изменении напряжения внешнего воздействия в диапазоне от 3.5 до 6 кВ на соответствующих спектрах пульсации температуры выделяется характерная пульсация с частотой 17 Гц (рис. 5).

## Выводы

Проведено экспериментальное исследование процесса горения метана при воздействии электрического поля. Показано, что при напряжении до 4 кВ происходит уменьшение максимальной амплитуды пульсации температуры. Дальнейшее увеличение напряжения приводит к резкому падению максимальной амплитуды до 4 К, что свидетельствует о стабилизации режима горения в факеле. Дальнейшее увеличение напряжения снова приводит к появлению частотных максимумов, однако они уже смещены сторону меньших частот на несколько единиц. При увеличении напряжения между электродами выше 3 кВ наблюдается отклонение факела пламени в сторону отрицательного электрода, что является следствием большого образования положительных ионов в пламени [19]. В диапазоне напряжений 3.5 ÷6.0 кВ на спектре изменения температуры помимо основной частоты 13 Гц выделяется частота 17 Гц со своими гармониками. Очевидно, что изменение температуры в факеле пламени связано со структурой течения и происходящих химических реакций. Это обусловлено изменением основных гидродинамических параметров (скорость, давление, плотность и др.), которые, в свою очередь, влияют на изменение коэффициентов переноса и поступления окислителя в зону горения. Очевидно, что наличие внешнего электрического поля оказывает существенное воздействие на изменение всех указанных параметров и проявляется в изменении формы, высоты пламени и характерных температур.

### Список источников

1. *Schefer R.W., Wicksal D.M., Agrawal A.K.* Combustion of hydrogen-enriched methane in a lean premixed swirl-stabilized burner // Proc. Combust. Inst. 2002. V. 29. P. 843–851. doi: 10.1016/S1540-7489(02)80108-0
2. *Day M.S., Gao X., Bell J.B.* Properties of lean turbulent methane-air flames with significant hydrogen addition // Proc. Combust. Inst. 2011. V. 33. P. 1601–1608. doi: 10.1016/j.proci.2010.05.099
3. *Dinkelacker F., Manickam B., Muppal S.P.R.* Modelling and simulation of lean premixed turbulent methane/hydrogen/air flames with an effective Lewis number approach // Combust. Flame. 2011. V. 158. P. 1742–1749. doi: 10.1016/j.combustflame.2010.12.003
4. *Therkelsen P.L., Enrique P.J., Littlejohn D., Martin S.M., Cheng R.K.* Self-induced unstable behaviors of $CH_4$ and $H_2/CH_4$ flames in a model combustor with a low-swirl injector // Combust. Flame. 2013. V. 160. P. 307–321. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.11.008
5. *Afarin Y., Tabejamaat S.* Effect of hydrogen on $H_2/CH_4$ flame structure of MILD combustion using the LES method // Int. J. Hydrogen Energy. 2013. V. 38. P. 3447–3458. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.065
6. *Zhang M., Wanga J., Xie Y., Jin W., Wei Z., Huang Z., Kobayashi H.* Flame front structure and burning velocity of turbulent premixed $CH_4/H_2$/air flames // Int. J. Hydrogen Energy. 2013. V. 38. P. 11421–11428. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.05.051
7. *Hernandez-Perez F.E., Groth C.P.T., Gulder O.L.* Large-eddy simulation of lean hydrogen-methane turbulent premixed flames in the methane-dominated regime // Int. J. Hydrogen Energy. 2014. V. 39. P. 7147–7157. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.02.028
8. *Sun Z.-Y., Li G.-X.* Turbulence influence on explosion characteristics of stoichiometric and rich hydrogen/air mixtures in a spherical closed vessel // Energy Convers. Manag. 2017. V. 149. P. 526–535. doi: 10.1016/j.enconman.2017.07.051
9. *Sun Z.-Y.* Experimental studies on the explosion indices in turbulent stoichiometric $H_2/CH_4$/air mixtures // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. V. 44. P. 469–476. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.094

10. *Li D., Wang R., Yang G., Wan J.* Effect of hydrogen addition on the structure and stabilization of a micro-jet methane diffusion flame // Int. J. Hydrogen Energy. 2021. V. 46. P. 5790–5798. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.034
11. *Grishin I., Zakharov V., Arefiev K.* Experimental Study of Methane Combustion Efficiency in a High-Enthalpy Oxygen-Containing Flow // Appl. Sci. 2022. V. 12 (2). Art. 899. doi: 10.3390/app12020899
12. *Xu W., Jiang Y.* Combustion Inhibition of Aluminum–Methane–Air Flames by Fine NaCl Particles // Energies. 2018. V. 11. P. 1–12. doi: 10.3390/en11113147
13. *Linteris G.T., Knyazev V.D., Babushok V.I.* Inhibition of premixed methane flames by manganese and tin compounds // Combustion and Flame. 2002. V. 129 (3). P. 221–238. doi: 10.1016/S0010-2180(02)00346-2
14. *Кривокорытов М.С., Голуб В.В., Моралев И.А., Володин В.В.* Экспериментальное исследование развития струи гелия при акустическом воздействии // Теплофизика высоких температур. 2014. Т. 52, № 3. С. 450–455. doi: 10.7868/S004036441403017X
15. *Голуб В.В., Иванов М.Ф., Володин В.В., Благодатских Д.В., Головастов С.В.* Влияние акустических волн на зону воспламенения и переход горения в детонацию: эксперимент и расчет // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47, № 2. С. 315–316. doi: 10.1134/S0018151X09020229
16. *Голуб В.В., Бакланов Д.И., Головастов С.В., Иванов К.В., Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Володин В.В.* Воздействие акустического поля на развитие пламени и переход в детонацию // Теплофизика высоких температур. 2010. Т. 48, № 6. С. 901–907. doi: 10.1134/S0018151X1006012X
17. *Левина Т.А., Просин М.В.* Электромагнитное и акустическое воздействие на распространение пламени // Пищевые инновации в биотехнологии : сб. тез. VI Междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / под общ. ред. А.Ю. Просекова. Кемерово: Кем. гос. ун-т, 2018. Т. 2. С. 338–341.
18. *Довгаль А.В., Козлов В.В., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г.* Режимы горения микроструй водорода // Прикладная механика техническая физика. 2023. Т. 64, № 1. С. 3–12. doi: 10.15372/PMTF202215145
19. *Агафонцев М.В., Ануфриев И.С., Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю., Лобода Е.Л., Луценко А.В.* Исследование характеристик турбулентного пламени при воздействии малых энергетических возмущений // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 55. С. 57–71. doi: 10.17223/19988621/55/6
20. *Agafontsev M.V., Reyno V.V.* Effect of low-frequency vibrations on the characteristics of the diffusion flame // Journal of Physics: Conference Series. 2022. V. 2389. Art. 012004. doi: 10.1088/1742-6596/2389/1/012004
21. *Loboda E.L., Agafontsev M.V., Rejno V.V., Kliment`ev A.S.* Studing the effect of low-amplitude pressure fluctuations on the field of temperatures in flame using thermography // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2018. V. 10833. P. 1–5. doi: 10.1117/12.2504423
22. *Агафонцев М.В., Ануфриев И.С., Копьев Е.П., Шадрин Е.Ю., Лобода Е.Л., Луценко А.В.* Исследование характеристик турбулентного пламени при воздействии малых энергетических возмущений // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2018. № 55. С. 57–71. doi: 10.17223/19988621/55/6
23. *Зудов В.Н., Тупикин А.В.* Влияние внешнего электрического поля на оптический разряд в скоростном потоке // Журнал технической физики. 2022. Т. 92, № 2. С. 209–215.
24. *Хафизов Ф.Ш., Пермяков А.В., Хафизов И.Ф., Краснов А.В., Пережогин Д.Ю., Еникеева Э.Д.* Исследование влияния электромагнитного поля высокой напряженности на пламя // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2016. Т. 104, № 2. С. 105–110.
25. *Hu J., Rivin B., Sher E.* The effect of an electric field on the shape of co-flowing and candle-type methane–air flames // Experimental Thermal and Fluid Science. 2000. V. 21 (1-3). P. 124–133. doi: 10.1016/S0894-1777(99)00062-X

26. *Sayed-Kassem A., Elorf A., Gillon P., Idir M., Sarh B., Gilard V.* Numerical modelling to study the effect of DC electric field on a laminar ethylene diffusion flame // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2021. V. 122. P. 1–19. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105167
27. *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. V. 191 (2). P. 325–338. doi: 10.1080/00102202.2018.1467404
28. *Лобода Е.Л., Рейно В.В., Агафонцев М.В.* Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 2. С. 124–128.

**References**

1. Schefer R.W., Wicksal D.M., Agrawal A.K. (2002) Combustion of hydrogen-enriched methane in a lean premixed swirl-stabilized burner. *Proceedings of the Combustion Institute*. 29. pp. 843–851. doi: 10.1016/S1540-7489(02)80108-0
2. Day M.S., Gao X., Bell J.B. (2011) Properties of lean turbulent methane-air flames with significant hydrogen addition. *Proceedings of the Combustion Institute*. 33. pp. 1601–1608. doi: 10.1016/j.proci.2010.05.099
3. Dinkelacker F., Manickam B., Muppal S.P.R. (2011) Modelling and simulation of lean premixed turbulent methane/hydrogen/air flames with an effective Lewis number approach. *Combustion and Flame*. 158. pp. 1742–1749. doi: 10.1016/j.combustflame.2010.12.003
4. Therkelsen P.L., Enrique P.J., Littlejohn D., Martin S.M., Cheng R.K. (2013) Self-induced unstable behaviors of $CH_4$ and $H_2/CH_4$ flames in a model combustor with a low-swirl injector. *Combustion and Flame*. 160. pp. 307–321. doi: 10.1016/j.combustflame.2011.11.008
5. Afarin Y., Tabejamaat S. (2013) Effect of hydrogen on $H_2/CH_4$ flame structure of MILD combustion using the LES method. *International Journal of Hydrogen Energy*. 38. pp. 3447–3458. doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.12.065
6. Zhang M., Wanga J., Xie Y., Jin W., Wei Z., Huang Z., Kobayashi H. (2013) Flame front structure and burning velocity of turbulent premixed $CH_4/H_2$/air flames. *International Journal of Hydrogen Energy*. 38. pp. 11421–11428. doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.05.051
7. Hernandez-Perez F.E., Groth C.P.T., Gulder O.L. (2014) Large-eddy simulation of lean hydrogen-methane turbulent premixed flames in the methane-dominated regime. *International Journal of Hydrogen Energy*. 39. pp. 7147–7157. doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.02.028
8. Sun Z.-Y., Li G.-X. (2017) Turbulence influence on explosion characteristics of stoichiometric and rich hydrogen/air mixtures in a spherical closed vessel. *Energy Conversion and Management*. 149. pp. 526–535. doi: 10.1016/j.enconman.2017.07.051
9. Sun Z.-Y. (2019) Experimental studies on the explosion indices in turbulent stoichiometric $H_2/CH_4$/air mixtures. *International Journal of Hydrogen Energy*. 44. pp. 469–476. doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.02.094
10. Li D., Wang R., Yang G., Wan J. (2021) Effect of hydrogen addition on the structure and stabilization of a micro-jet methane diffusion flame. *International Journal of Hydrogen Energy*. 46. pp. 5790–5798. doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.11.034
11. Grishin I., Zakharov V., Arefiev K. (2022) Experimental study of methane combustion efficiency in a high-enthalpy oxygen-containing flow. *Applied Sciences*. 12. Article 899. doi: 10.3390/app12020899
12. Xu W., Jiang Y. (2018) Combustion inhibition of aluminum–methane–air flames by fine NaCl particles. *Energies*. 11. pp. 1–12. doi: 10.3390/en11113147
13. Linteris G.T., Knyazev V.D., Babushok V.I. (2002) Inhibition of premixed methane flames by manganese and tin compounds. *Combustion and Flame*. 129(3). pp. 221–238. doi: 10.1016/S0010-2180(02)00346-2

14. Krivokorytov M.S., Golub V.V., Moralev I.A., Volodin V.V. (2014) Eksperimental'noe issledovanie razvitiya strui geliya pri akusticheskom vozdeystvii [Experimental study of helium jet development under acoustic impact]. *High Temperature*. 52(3). pp. 450–455. doi: 10.7868/S004036441403017X
15. Golub V.V., Ivanov M.F., Volodin V.V., Blagodatskikh D.V., Golovastov S.V. (2009) Issledovanie akusticheskikh voln v zone vosplameneniya i perekhoda goreniya v detonatsiyu: eksperiment i raschet [Influence of acoustic waves on the ignition zone and combustion-to-detonation transition: experiment and calculation]. *High Temperature*. 47(2). pp. 315–316. doi: 10.1134/S0018151X09020229
16. Golub V.V., Baklanov D.I., Golovastov S.V., Ivanov K.V., Ivanov M.F., Kiverin A.D., Volodin V.V. (2010) Vozdeystvie akusticheskogo polya na razvitie plameni i perekhod v detonatsiyu [Impact of an acoustic field on flame development and transition to detonation]. *High Temperature*. 48(6). pp. 901–907. doi: 10.1134/S0018151X1006012X
17. Levina T.A., Prosin M.V. (2018) Elektromagnitnoe i akusticheskoe vozdeystvie na rasprostranenie plameni [Electromagnetic and acoustic impact on flame propagation]. *Pishchevye innovatsii v biotekhnologii: sbornik tezisov VI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh – Food Innovations in Biotechnology: a collection of abstracts of the VI International Scientific Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. Ed. by A.Y. Prosekov; FGBOU VO "Kemerovo State University". Kemerovo. 2. pp. 338–341.
18. Dovgal' A.V., Kozlov V.V., Litvinenko M.V., Litvinenko Yu.A., Shmakov A.G. (2023) Rezhimy goreniya mikrostruy vodoroda [Combustion modes of hydrogen microjets]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika – Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 64(1). pp. 3–12. doi: 10.15372/PMTF202215145
19. Agafontsev M.V., Anufriev I.S., Kop'ev E.P., Shadrin E.Yu., Loboda E.L., Lutsenko A.V. (2018) Issledovanie kharakteristik turbulentnogo plameni pri vozdeystvii malykh energeticheskikh vozmushcheniy [Study of turbulent flame characteristics under the influence of small energy perturbations]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 55. pp. 57–71. doi: 10.17223/19988621/55/6
20. Agafontsev M.V., Reyno V.V. (2022) Effect of low-frequency vibrations on the characteristics of the diffusion flame. *Journal of Physics: Conference Series*. 2389. Article 012004. doi: 10.1088/1742-6596/2389/1/012004
21. Loboda E.L., Agafontsev M.V., Rejno V.V., Kliment'ev A.S. (2018) Studing the effect of low-amplitude pressure fluctuations on the field of temperatures in flame using thermography. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. 10833. pp. 1–5. doi: 10.1117/12.2504423
22. Agafontsev M.V., Anufriev I.S., Kop'ev E.P., Shadrin E.Yu., Loboda E.L., Lutsenko A.V. (2018) Issledovanie kharakteristik turbulentnogo plameni pri vozdeystvii malykh energeticheskikh vozmushcheniy [Study of turbulent flame characteristics under the influence of small energy perturbations]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 55. pp. 57–71. doi: 10.17223/19988621/55/6.
23. Zudov V.N., Tupikin A.V. (2022) Issledovanie vneshnikh poley vozdeystviya na opticheskiy razryad v skorostnom potoke [Influence of an external electric field on an optical discharge in a high-speed flow]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki – Journal of Technical Physics*. 92(2). pp. 209–215.
24. Khafizov F.Sh., Permyakov A.V., Khafizov I.F., Krasnov A.V., Perezhogin D.Yu., Enikeeva E.D. (2016) Issledovanie vozdeystviya elektromagnitnogo polya s vysokoy vyderzhkoy plameni [Study of the effect of high intensity electromagnetic field on the flame]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov – Problems of Collection, Preparation and Transportation of Oil and Petroleum Products.* Ufa State Petroleum Technical University. 104(2). pp. 105–110.

25. Hu J., Rivin B., Sher E. (2000) The effect of an electric field on the shape of co-flowing and candle-type methane–air flames. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 21(1-3). pp. 124–133. doi: 10.1016/S0894-1777(99)00062-X
26. Sayed-Kassem A., Elorf A., Gillon P., Idir M., Sarh B., Gilard V. (2021) Numerical modelling to study the effect of DC electric field on a laminar ethylene diffusion flame. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 122. pp. 1–19. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105167
27. Gillon P., Gilard V., Idir M., Sarh B. (2018) Electric field influence on the stability and the soot particles emission of a laminar diffusion flame. *Combustion Science and Technology*. 191(2). pp. 325–338. doi: 10.1080/00102202.2018.1467404
28. Loboda E.L., Reyno V.V., Agafontsev M.V. (2015) Vybor spektral'nogo intervala dlya izmereniya poley temperatury v plameni i registratsii ekranirovannykh plamenem vysokotemperaturnykh ob"ektov s primeneniem metodov IK-diagnostiki [Spectral interval selection for measuring the temperature fields in a flame and registration of high-temperature objects shielded by a flame with application of IR-diagnostics methods]. *Izvestiya vuzov. Fizika* – I*zvestiya Vuzov. Physics*. 58(2). pp. 124–128.

***Сведения об авторах*:**
**Агафонцев Михаил Владимирович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физической и вычислительной механики механико-математического факультета Томского государственного университета; старший научный сотрудник лаборатории прогнозирования состояния атмосферы Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской Академии наук (Томск, Россия). E-mail: amv@mail.tsu.ru
**Старосельцева Ася Алексеевна** – аспирант Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: 222-pro@mail.ru
**Рейно Владимир Владимирович** – старший научный сотрудник лаборатории распространения волн Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской Академии наук (Томск, Россия). E-mail: reyno@iao.ru
**Лобода Егор Леонидович** – доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой физической и вычислительной механики механико-математического факультета Томского государственного университета; главный научный сотрудник лаборатории прогнозирования состояния атмосферы Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской Академии наук (Томск, Россия). E-mail: loboda@mail.tsu.ru

***Information about the authors*:**
**Agafontsev Mikhail V.** (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russian Federation). E-mail: amv@mail.tsu.ru
**Staroseltseva Asya A.** (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: 222-pro@mail.ru
**Reyno Vladimir V.** (V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russian Federation). E-mail: reyno@iao.ru
**Loboda Egor L.** (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Tomsk, Russian Federation). E-mail: loboda@mail.tsu.ru

*Статья поступила в редакцию 02.12.2024; принята к публикации 09.06.2025*

*The article was submitted 02.12.2024; accepted for publication 09.06.2025*