

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

Научная статья

УДК 536.24

<https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-10>



**Исследование интенсивности теплообмена прямого и обращенного пламени
на продольном стабилизаторе**

Максим Михайлович Алексеев, Олег Юрьевич Семенов✉
Сургутский государственный университет, г. Сургут, Россия

Аннотация. В статье представлено исследование механизмов обращения и опрокидывания пламени, а также их влияние на процессы теплообмена в камере сгорания. В качестве объекта анализа рассмотрена конфигурация стабилизированного пламени предварительно перемешанной газозооушной смеси. Показано, что явление опрокидывания пламени способствует формированию вихревых структур, которые существенно усиливают теплообменные процессы. Анализ температурных зависимостей демонстрирует значительное увеличение интенсивности теплообмена при инверсии пламени, это открывает перспективы для оптимизации энергетических систем с целью повышения их эффективности.

Ключевые слова: стабилизация пламени, газовая смесь, вихревые структуры, неустойчивость, теплоаассоаеренос, калориметр, гидродинамика

Для цитирования: Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Исследование интенсивности теплообмена прямого и обращенного пламени на продольном стабилизаторе // Вестник кибернетики. 2025. Т. 24, № 3. С. 91–97. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-10>.

Original article

Study on heat exchange rate of direct and inverted flame on longitudinal flame holder

Maksim M. Alekseev, Oleg Yu. Semenov✉
Surgut State University, Surgut, Russia

Abstract. The paper studies the mechanisms that control flame direction and tumbling, as well as their influence on heat exchange processes in the combustion chamber. The configuration of a stabilized flame of a pre-mixed gas-air mixture is the object of analysis. Flame tumbling, as revealed by the authors, creates vortex structures, which boosts heat exchange. Analysis of temperature dependence demonstrates a significant increase in heat exchange rate during flame inversion, giving prospects for optimizing energy systems in order to increase their efficiency.

Keywords: flame stabilization, gas mixture, vortex structures, instability, heat-mass transfer, calorimeter, hydrodynamics

For citation: Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Study on heat exchange rate of direct and inverted flame on longitudinal flame holder. *Proceedings in Cybernetics*. 2025;24(3): 91–97. <https://doi.org/10.35266/1999-7604-2025-3-10>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время процесс сжигания различных видов топлива, включая природный газ, является основным источником энергии. Особое внимание уделяется исследова-

нию характеристик прямого, обращенного и опрокинутого пламени на газовых горелках, так как эти режимы горения оказывают влияние на эффективность работы оборудования и уровень выбросов загрязняющих веществ;

необходимы дополнительные исследования структуры пламени и параметров, определяющих его устойчивость.

В статье [1] показано, что стабилизация пламени происходит только в определенном диапазоне скоростей потока. В работе [2] авторы изучали устойчивость и структуру пламени конической формы при сжигании метановоздушной смеси. В исследовании [3] описаны эксперименты, которые позволили оценить теплотери в обращенном пламени, стабилизированном на срезе тонкого стержня. Авторами работы [4] выявлено, что гидродинамические характеристики обращенного пламени, полученного на продольном стабилизаторе, приводят к возникновению вихрей около фронта пламени и влияют на процессы тепло- и массообмена в камере сгорания. Изучение механизма стабилизации пламени газовой горелки на перфорированной пластине представлено в работе [5]. Результаты исследования особенностей горения газов и теплопереноса в цилиндрической камере сгорания описаны авторами в исследовании [6]. В статье [7] изложена методика определения динамических характеристик температурных и структурных параметров пламени.

В работах [8–11] определялись такие физические параметры: скорость фронта пламени, концентрация газов, входящих в состав горю-

чей смеси, и распределение температур. Газовоздушное пламя благодаря своей высокой устойчивости в широком диапазоне режимов горения находит применение в различных областях, таких как энергетические установки, газовые горелки и экологические системы сжигания [12–15].

Целью данного исследования является выполнение экспериментальных исследований и количественный анализ характеристик теплообмена в условиях обращения и инверсии пламени в потоке пропано-воздушной смеси на продольном стабилизаторе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения экспериментов исследования пламени и последующего анализа влияния режимов течения была разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1. Цилиндрический калориметр с камерой сгорания являлся основным элементом установки; внутри камеры происходила стабилизация фронта пламени (2), которая способствовала равномерному горению и точному определению тепловых параметров. Различные по форме пламена моделировали с помощью стабилизатора в виде тонкого стержня диаметром 2 мм (3), расположенного вдоль оси сопла (4) с круглым сечением и диаметром 4,8 мм. Часть металли-

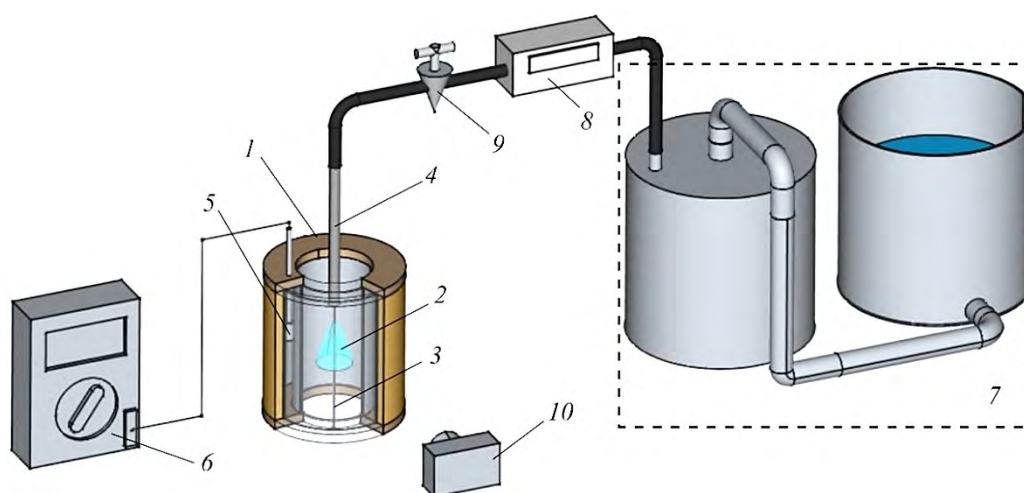


Рис. 1. Общая схема экспериментальной установки: 1 – камера калориметра; 2 – фронт пламени; 3 – стабилизирующий элемент; 4 – сопловой канал; 5 – термопара для измерения температуры; 6 – мультиметр регистрации сигналов; 7 – газометр вытеснения для подготовки газовой смеси; 8 – расходомер учета газа; 9 – регулирующий газовый кран; 10 – устройство визуализации (цифровой фотоаппарат)

Примечание: составлено авторами.

ческого стержня находилась внутри полости сопла для обеспечения необходимого режима стабилизации пламени.

Температурные параметры жидкости измерялись с помощью термопары (5), установленной в центральной области калориметра, а также регистрировались с помощью мультиметра (6). Экспериментальные серии проводились на стехиометрической смеси пропана и воздуха, подготовленной в газометре вытеснения (7). Расходомер газа (8) позволял контролировать скорость подачи пропановоздушной смеси на уровне 2,4 л/мин с помощью газового крана (9) экспериментальной установки. Такой расход обеспечивал устойчивое горение как прямого, так и обращенного пламени на стабилизаторе.

Камера сгорания калориметра, изображенная на рис. 2, состояла из двух полых металлических цилиндров, расположенных в пространстве на одной оси (1, 2). Пространство между внутренней поверхностью внешнего цилиндра и наружной поверхностью внутреннего цилиндра (3) заполнялось изопропиловым спиртом, который использовался в качестве нагреваемой жидкости для измерения тепловых потоков, а его температуру измеряли термопарой (4). Общая высота калориметра составляла 175 мм, внутренний диаметр конструкции – 65 мм, а толщина стенки – 0,1 мм. Для минимизации тепловых потерь калориметр был дополнительно теплоизолирован с внешней стороны (5).

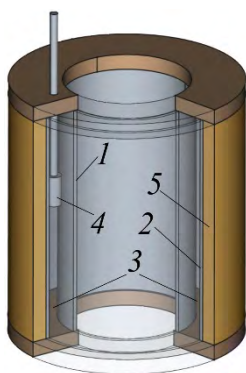


Рис. 2. Устройство калориметра: 1 – внутренняя стенка; 2 – внешняя стенка; 3 – изопропиловый спирт, 4 – термопара, 5 – теплоизоляция
Примечание: составлено авторами.

Исследование влияния положения стабилизированного фронта пламени относительно направления силы тяжести на интенсивность теплообмена проводилось путем поворота камеры сгорания, сочетаемой с соплом и стабилизатором, на 180° вокруг горизонтальной оси. Такой поворот обеспечивал возможность наблюдения за опрокинутыми формами прямого и обращенного пламени.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе под обращенным пламенем понимается конфигурация фронта горения предварительно перемешанной газовой смеси, устойчивого на осевом или поперечном стабилизаторе, в условиях дозвукового потока, при которой фронт формирует инвертированный конус (для осевого стержня) (рис. 3 посередине) или V-образную структуру (для поперечного стабилизатора). Такая конфигурация пламени обеспечивается замедлением потока в пограничном слое у поверхности стабилизатора, локальным балансом скорости горения и скорости потока, а для поперечных тел – зонами рециркуляции и вихревыми структурами, отклоняющими фронт вверх по течению. Это явление принципиально отличается от классического прямого конуса пламени, стабилизированного на срезе горелки, где фронт ориентирован по направлению потока (рис. 3 слева). Обращенные пламена актуальны для систем с экстремальными параметрами (высокоскоростные потоки, бедные смеси), где требуется повышенная устойчивость горения.

На рис. 3 справа показана фотография «опрокинутого» обращенного пламени. При

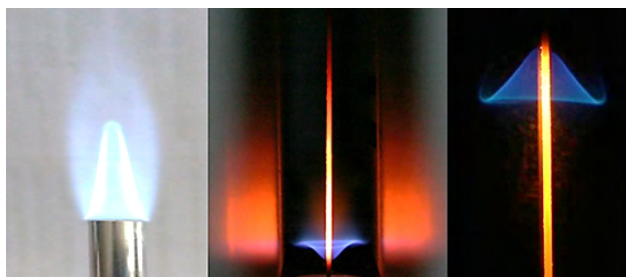


Рис. 3. Изображения различных видов пламени: прямое, обращенное и опрокинутое обращенное
Примечание: фото авторов.

«опрокидывании» фронт, сохраняя положение и форму конуса против направления потока, стабилизируется в условиях, когда поток смеси направлен по ускорению свободного падения (например, подача смеси сверху вниз). Этот случай отличается от классических случаев, где смесь обычно подается против силы тяжести, что создает дополнительные физические эффекты: горячие продукты сгорания, обладающие меньшей плотностью, под действием архимедовой силы стремятся двигаться вверх, навстречу потоку газовой смеси, усиливая тенденцию к срыву пламени. При опрокидывании фронта пламени в экспериментах наблюдалось самопроизвольное возникновение вихревых структур в камере сгорания в области фронта пламени (рис. 4).

Для визуализации турбулентных потоков в пламени применялся метод светящихся частиц: в газоздушную смесь вводились частицы окиси магния, поступающие из контейнера, закрепленного на газовой трубке установки. Эти частицы освещались плоским лазерным лучом, что позволяло осуществлять наблюдение за формированием вихрей, их геометрией и расположением. Формирующиеся турбулентные структуры приводили к усилению теплообмена между областью горения и стенками камеры сгорания, оказывая значительное влияние на процессы теплообмена и протекание химических реакций во фронте пламени.

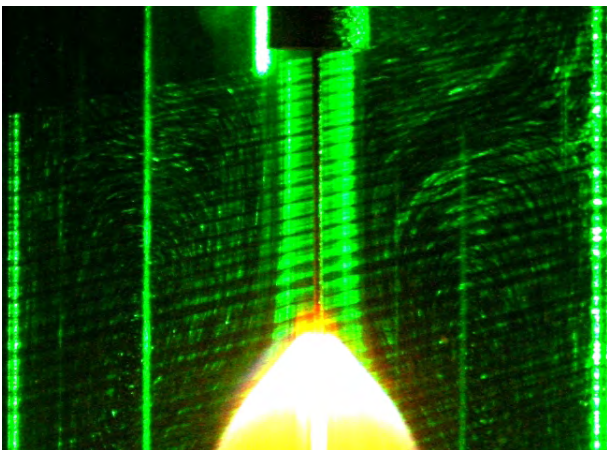


Рис. 4. Турбулентные образования в обращенном пламени на продольном стабилизаторе
 Примечание: фото авторов.

Одним из критериев подобия, используемых для количественной оценки теплообмена между газовым потоком и твердой поверхностью, является безразмерное число Нуссельта (Nu), которое определяется по следующей формуле:

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, L – характерный размер исследуемой области, а λ – коэффициент теплопроводности среды.

Для сравнения интенсивности процессов теплообмена в двух случаях можно воспользоваться отношением Nu_1/Nu_2 . Скорость роста температуры поверхности dT_s/dt определяется тепловым потоком q и теплоемкостью материала:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{q}{\rho c_p \delta}, \quad (2)$$

где ρ – плотность материала поверхности, c_p – удельная теплоемкость, δ – характерная толщина прогрева. Тепловой поток q выражается через α и разность температур:

$$q = \alpha \cdot (T_g - T_s), \quad (3)$$

T_g – температура газа, T_s – температура поверхности.

Подставляя q из уравнения (3) в уравнение (2) и выражая коэффициент теплоотдачи α через число Нуссельта Nu (1), получаем:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{Nu \cdot \lambda \cdot (T_g - T_s)}{L \cdot \rho c_p \delta}. \quad (4)$$

Для двух разных условий отношение Nu_1/Nu_2 пропорционально отношению скоростей роста температуры:

$$\frac{(dT_s/dt)_1}{(dT_s/dt)_2} = \frac{Nu_1}{Nu_2} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot \frac{(T_g - T_s)_1}{(T_g - T_s)_2} \cdot \frac{L_2}{L_1} \cdot \frac{(t \rho c_p \delta)_2}{(t \rho c_p \delta)_1} \quad (5)$$

Если геометрия и свойства материалов поверхностей и газов одинаковы, а разности температур сопоставимы, то согласно (4) и (5):

$$\frac{Nu_1}{Nu_2} \approx \frac{(dT_s/dt)_1}{(dT_s/dt)_2}. \quad (6)$$

Таким образом, для сравнения интенсивностей процессов теплообмена можно использовать отношение скоростей нагрева поверхностей теплообмена (6). Анализ временных зависимостей изменения температуры в калориметре, представленных на рис. 5, позволил оценить скорости нагрева жидкости в калориметре для различных типов пламени.

После анализа экспериментальных данных установлено, что интенсивность теплообмена возрастает в диапазоне 2,81–3,94 раза при стабилизации фронта горения на продольном стержне в условиях, отличающихся от прямого пламени. При инверсии пламени наблюдается рост скорости нагрева жидкости в калориметре в 4,92–5,23 раза. Обнаружено, что при опрокидывании пламени зафиксировано увеличение скорости нагрева в 6,43–8,42 раза по сравнению с режимом прямого конусообразного пламени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эксперименты показали, что опрокидывание фронта пламени приводит к возникновению вихревых структур, которые значительно усиливают теплообмен и интенсифицируют процессы сгорания, что подтверждается увеличением скорости нагрева жидкости в кало-

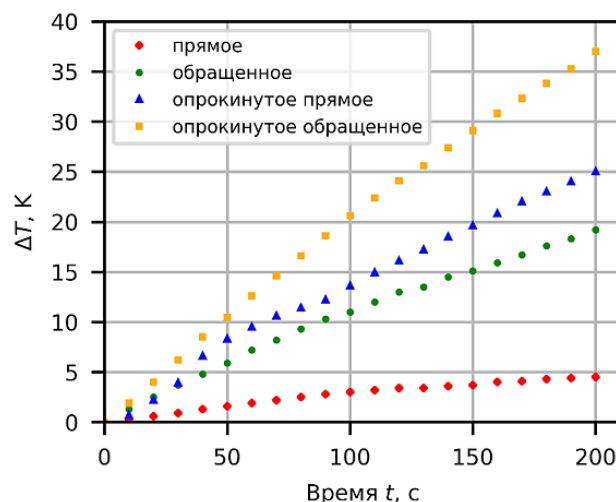


Рис. 5. Зависимости температуры жидкости в калориметре от времени при различных режимах стабилизации пламени

Примечание: составлено авторами.

риметре. Эти результаты подчеркивают важность изучения нестандартных конфигураций пламени для оптимизации процессов сгорания и повышения эффективности теплопередачи в энергетических системах. Полученные результаты могут применяться в технологиях, ориентированных на снижение экологических выбросов и повышение эффективности работы газовых устройств.

Список источников

1. Brailovsky I., Sivashinsky G. On stabilization and blowoff of inverted spherical flames // *Combustion Science and Technology*. 1997. Vol. 122, no. 1–6. P. 95–111. <https://doi.org/10.1080/00102209708935606>.
2. Dakka S. M. Numerical analysis of flame characteristics and stability for conical nozzle burner // *Journal of Thermal Engineering*. 2019. Vol. 5, no. 5. P. 422–445. <https://doi.org/10.18186/thermal.624070>.
3. Шошин Ю. Л., Гозь Л. П. Х. О корреляции между пределами стабилизации обращенного пламени и градиентом скорости вблизи поверхности стабилизатора // *Физика горения и взрыва*. 2015. Т. 51, № 5. С. 13–21. <https://doi.org/10.15372/FGV20150502>.
4. Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Визуализация структуры обращенного пламени // *Россия молодая : сб. материалов XVI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, 16–19 апреля 2024 г., г. Кемерово. Кемерово : Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2024. С. 021218.1–021218.4.*

References

1. Brailovsky I., Sivashinsky G. On stabilization and blowoff of inverted spherical flames. *Combustion Science and Technology*. 1997;122(1–6):95–111. <https://doi.org/10.1080/00102209708935606>.
2. Dakka S. M. Numerical analysis of flame characteristics and stability for conical nozzle burner. *Journal of Thermal Engineering*. 2019;5(5):422–445. <https://doi.org/10.18186/thermal.624070>.
3. Shoshin Yu. L., Goei L. P. H. On the correlation of inverted flame blow-off limits with the boundary velocity gradient at the flame holder surface. *Fizika gorennya i vzryva*. 2015;51(5):13–21. <https://doi.org/10.15372/FGV20150502>. (In Russ.).
4. Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Visualizatsiya struktury obrashchennogo plameni. In: *Proceedings of the 16th All-Russian Research-to-Practice Conference of young scientists with international participation "Rossiya molodaya"*, April 16–19, 2024, Kemerovo. Kemerovo: T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University; 2024. p. 21218.1–21218.4. (In Russ.).
5. Kedia K. S., Ghoniem A. F. Mechanisms of stabilization and blowoff of a premixed flame downstream of a heat-

5. Kedia K. S., Ghoniem A. F. Mechanisms of stabilization and blowoff of a premixed flame downstream of a heat-conducting perforated plate // *Combustion and Flame*. 2012. Vol. 159, no. 3. P. 1055–1069. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.10.014>.
6. Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Физическое моделирование тьюльпанообразного пламени при горении газов в цилиндрической вертикальной трубе // *Вестник кибернетики*. 2021. № 1. С. 63–70. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2021-1-63-70>.
7. Ефимова А. В., Жилкин Б. П., Шевелев М. М. и др. Тепловизионная идентификация структуры турбулентной воздушной струи при ее взаимодействии с приемником потока // *Альтернативная энергетика и экология*. 2012. № 4. С. 87–90.
8. Дулин В. М., Маркович Д. М., Токарев М. П. и др. Применение современных оптических методов для диагностики и пространственной структуры турбулентных пламен // *Автометрия*. 2012. № 3. С. 22–32.
9. Li J., Acharya S. Flame stabilization through forcing: Velocity measurements // *Combustion Science and Technology*. 2000. Vol. 152, no. 1. P. 1–21. <https://doi.org/10.1080/00102200008952124>.
10. Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Изучение распространения пламени в расширяющейся сфере // *Вестник кибернетики*. 2022. № 3. С. 75–83. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-3-75-83>.
11. Vance F. H., Shoshin Y., Goey L. P. H. et al. Flame stabilization regimes for premixed flames anchored behind cylindrical flame holders // *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021. Vol. 38, no. 2. P. 1983–1992. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.07.008>.
12. Su H., Wu Y., Yan J. et al. Experimental study on chemiluminescence properties of ammonia-methane non-premixed laminar flames // *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 2. P. 1–13. <https://doi.org/10.3390/en18020402>.
13. Kazemimanesh M., Moallemi A., Thomson K. et al. A novel miniature inverted-flame burner for the generation of soot nanoparticles // *Aerosol Science and Technology*. 2019. Vol. 53, no. 2. P. 184–195. <https://doi.org/10.1080/02786826.2018.1556774>.
14. Балабанов Р. А. Изучение влияния трехмерности на стабилизацию фронта пламени в дозвуковом течении с перемешанным горением // *Горение и взрыв*. 2024. Т. 17, № 4. С. 15–28. <https://doi.org/10.30826/CE24170402>.
15. Rabee B. A. The effect of inverse diffusion flame burner-diameter on flame characteristics and emissions // *Energy*. 2018. Vol. 160. P. 1201–1207. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.061>.
- conducting perforated plate. *Combustion and Flame*. 2012;159(3):1055–1069. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2011.10.014>.
6. Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Tulip flame physical modeling during gaseous combustion in a cylindrical vertical pipe. *Proceedings in Cybernetics*. 2021;(1):63–70. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2021-1-63-70>. (In Russ.).
7. Efimova A. V., Zhilkin B. P., Shevelev M. M. et al. Thermal imaging characterization of turbulent air flow structure during its interaction with airflow receiver. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*. 2012;(4):87–90. (In Russ.).
8. Dulin V. M., Markovich D. M., Tokarev M. P. et al. Primenenie sovremennykh opticheskikh metodov dlya diagnostiki prostranstvennoy struktury turbulentnykh plamyon. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2012;(3):22–32. (In Russ.).
9. Li J., Acharya S. Flame stabilization through forcing: Velocity measurements. *Combustion Science and Technology*. 2000;152(1):1–21. <https://doi.org/10.1080/00102200008952124>.
10. Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Study of flame propagation in an expanding sphere. *Proceedings in Cybernetics*. 2022;(3):75–83. <https://doi.org/10.34822/1999-7604-2022-3-75-83>. (In Russ.).
11. Vance F. H., Shoshin Y., Goey L. P. H. et al. Flame stabilization regimes for premixed flames anchored behind cylindrical flame holders. *Proceedings of the Combustion Institute*. 2021;38(2):1983–1992. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2020.07.008>.
12. Su H., Wu Y., Yan J. et al. Experimental study on chemiluminescence properties of ammonia-methane non-premixed laminar flames. *Energies*. 2025;18(2):1–13. <https://doi.org/10.3390/en18020402>.
13. Kazemimanesh M., Moallemi A., Thomson K. et al. A novel miniature inverted-flame burner for the generation of soot nanoparticles. *Aerosol Science and Technology*. 2019;53(2):184–195. <https://doi.org/10.1080/02786826.2018.1556774>.
14. Balabanov R. A. Investigation of three-dimension at effects on flame stabilization in a subsonic flow with premixed combustion. *Combustion and explosion*. 2024;17(4):15–28. <https://doi.org/10.30826/CE24170402>. (In Russ.).
15. Rabee B. A. The effect of inverse diffusion flame burner-diameter on flame characteristics and emissions. *Energy*. 2018;160:1201–1207. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.061>.

Информация об авторах

М. М. Алексеев – кандидат физико-математических наук, доцент;

<https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>,
amm.iff@gmail.com

О. Ю. Семенов – кандидат физико-математических наук, доцент;

<https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>,
ous.tutor.phinma@mail.ru✉

About the authors

M. M. Alekseev – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent;

<https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>,
amm.iff@gmail.com

O. Yu. Semenov – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Docent;

<https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>,
ous.tutor.phinma@mail.ru✉