

УДК 536.46

DOI 10.34822/1999-7604-2021-1-63-70

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЮЛЬПАНООБРАЗНОГО ПЛАМЕНИ ПРИ ГОРЕНИИ ГАЗОВ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБЕ

М. М. Алексеев, О. Ю. Семенов ✉

Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

✉ E-mail: ous.tutor.phinma@mail.ru

В статье обсуждаются результаты экспериментальных исследований колебательного распространения пропано-воздушного пламени в длинной вертикальной трубе, закрытой с одного края. Предложены методы физического моделирования тюльпанообразного пламени в цилиндрической трубе, связанные с откликом фронта пламени на внешние воздействия и критические условия его распространения. Дано объяснение физических механизмов, управляющих формированием тюльпанообразной воронки пламени с продольными и поперечными гранями, колебаниями газа, неустойчивостью горения и вихреобразованием в пламени.

Ключевые слова: структура пламени, цилиндрическая труба, релаксационные колебания, неустойчивость горения, тюльпанообразное пламя, нестационарное распространение.

TULIP FLAME PHYSICAL MODELING DURING GASEOUS COMBUSTION IN A CYLINDRICAL VERTICAL PIPE

M. M. Alekseev, O. Yu. Semenov ✉

Surgut State University, Surgut, Russia

✉ E-mail: ous.tutor.phinma@mail.ru

The article discusses the results of experimental studies of the vibrational propagation of a propane-air flame in a long vertical pipe that is closed at one end. Methods for physical modeling of a tulip-shaped flame in a cylindrical pipe are proposed. These methods are associated with the response of the flame front to external influences and critical conditions for its propagation. An explanation of the physical mechanisms governing the formation of a tulip flame with longitudinal and transverse edges, gas oscillations, combustion instability, and vortex formation in the flame is given.

Keywords: flame structure, cylindrical pipe, relaxation oscillations, combustion instability, tulip flame, transient propagation.

Введение

В последние годы изучение закономерностей колебательного распространения фронта пламени с большой амплитудой в модельных камерах сгорания продолжает вызывать интерес, который связан с разработкой новых, более совершенных конструкций двигателей внутреннего сгорания. При распространении пламени в цилиндрических трубах, длина которых превышает диаметр более чем в 2 раза, форма пламени может изменяться с выгнутой воронки по направлению распространения фронта пламени на вогнутую – в противоположную сторону. Для описания этого явления используется название «тюльпанообразное пламя» [1–3]. Проведение экспериментов, направленных на получение распада гладкой поверхности тюльпанообразного пламени на многогранник с различным числом граней, имеет важное научное и практическое значение.

В научных работах [4, 5] описаны результаты исследований тюльпанообразного пламени. Формирование фронта пламени в виде глубокой воронки, или «тюльпана», при его распространении в цилиндрических трубах изучено в работах [6, 7]. Имеющий неправильную форму у основания конуса фронт пламени был также получен в каналах прямоугольного

поперечного сечения [8–11]. Проведены моделирования колебательных процессов столба газа и пламени в трубах в диапазоне частот 1–10 Гц, связанные с ускорением пламени и газа [12–14]. Между гранями пламени состав горючей смеси меняется, образование новой формы пламени связано с увеличением его поверхности и диффузионными процессами в газовой смеси. На формирование различных форм «тюльпана» влияет образование на поверхности фронта пламени ячеистых структур, а также тепловые и гидродинамические явления при дефлаграционном горении газовых смесей [15–19].

Методика исследований

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Для работы применялась вертикальная прозрачная труба (1) длиной 1,5 м и радиусом 11×10^{-2} м, закрытая с одного торца. Труба заполнялась пропано-воздушной смесью через пламегаситель (6) и расходомер газа (9). В опытах применялись горючие газовые смеси с содержанием пропана в воздухе от 2,5 до 9,5 %, которые составлялись в газометре вытеснения (10).

Скорость подачи горючей смеси регулировалась с помощью газового крана (7), объем газовой смеси в трубе контролировали расходомером РГС–2. В начале экспериментов, при заполнении трубы горючей смесью, открытый край трубы закрывался специальной герметичной газовой заглушкой. После заполнения трубы газовую заглушку убирали, далее производилось зажигание пропано-воздушной смеси с помощью искрового разряда между электродами (5) высоковольтного разрядника (8).

Для моделирования распространения пламени (3) снизу-вверх по трубе воспламенение производилось в нижней части, а при распространении пламени вниз смесь зажигали в верхней точке трубы с помощью дополнительной системы воспламенения, установленной в противоположном торце вертикальной трубы.

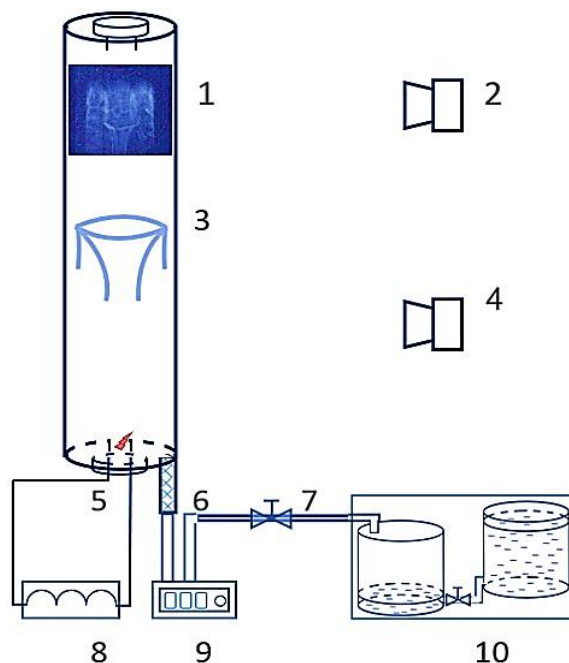


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – вертикальная труба; 2 – фотокамера; 3 – фронт пламени; 4 – видеокамера;
5 – высоковольтные электроды; 6 – пламегаситель; 7 – газовый кран;
8 – разрядник; 9 – расходомер-счетчик газа; 10 – газометр вытеснения

Примечание: составлено авторами.

Видеосъемка и фотографирование процесса распространения фронта пламени осуществлялись через стеклянные прозрачные стенки трубы зеркальной автофокусной фотока-

мерой (2) Sony DSLR-A580 и цифровой скоростной видеокамерой (4) марки AOS Technologies AG X-PRI. Для четкой фиксации распространения фронта пламени применялась скорость видеосъемки от 25 до 500 кадров в секунду.

Моделирование тюльпанообразного пламени

На рис. 2 представлены последовательные кадры из видеосъемок экспериментов, показывающие закономерности формирования тюльпанообразного пламени при его распространении по газовой смеси от закрытого верхнего края к открытому нижнему краю цилиндрической вертикальной трубы.

При движении фронта пламени в вертикальной трубе на него действует ускорение свободного падения, что влияет на скорость пламени. В цилиндрической трубе формируются колебания столба газа инерционного характера с большой амплитудой, приводящие к осциллирующему движению фронта пламени. На фотокадрах 1–5 экспериментов (рис. 2) виден процесс образования цилиндрического пламени, распространяющегося от точки зажигания на закрытом крае трубы к открытому краю. На фрагменте 5 рис. 2 замечен процесс образования воронки пламени, на фрагментах 6 и 7 визуализируется сложная форма тюльпанообразного пламени. После прогорания основной смеси, при достижении пламенем открытого края трубы, происходит обратное движение пламени в результате поступления в трубу воздуха извне и догорания остатков газовой смеси. При этом возникают релаксационные колебания пламени и газового столба (кадры видеосъемки 8, 9, 10, рис. 2).

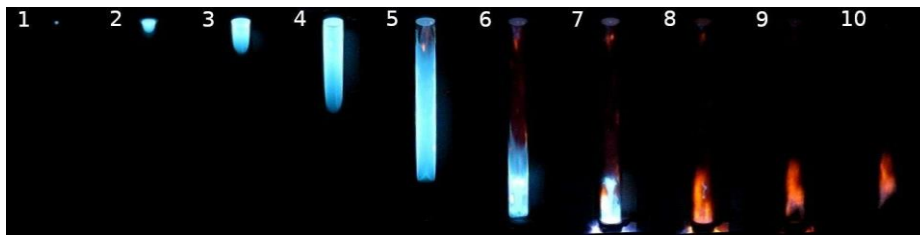


Рис. 2. Распространение пламени в вертикальной трубе от верхнего закрытого края к нижнему открытому краю
(газовая смесь – 3,5 % пропана в воздухе, скорость видеосъемки – 60 кадров в секунду)
Примечание: фото авторов.

Кадры видеосъемки, показывающие распространение пламени газовой смеси – 8 % пропана в воздухе, представлены на рис. 3. Фронт пламени движется вниз по трубе ускоренно (кадры 1–6), это способствует втягиванию переднего края фронта внутрь закругленного цилиндра пламени с образованием в нем воронки – тюльпанообразного пламени. К концу периода колебаний пламени происходит воспламенение остатков горючей смеси, перемешанных с воздухом, поступающих в открытую трубу в результате падения давления в ней. После прекращения колебаний догорание остатков смеси в трубе происходит еще в течение нескольких секунд (фрагменты 6–10, рис. 3).

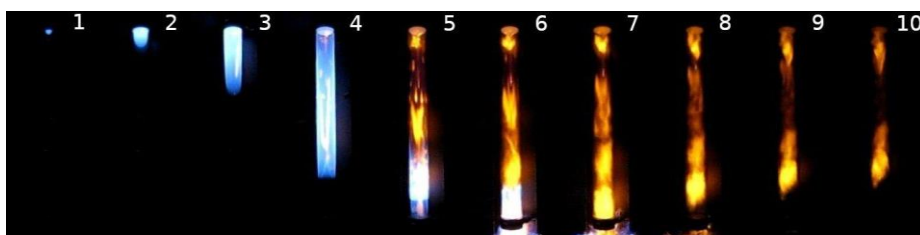


Рис. 3. Образование «тюльпана» пламени в вертикальной трубе
(газовая смесь – 8 % пропана в воздухе, скорость видеосъемки – 60 кадров в секунду)
Примечание: фото авторов.

На рис. 4 представлены последовательные кадры видеосъемки эксперимента, на которых видны закономерности образования тюльпанообразного пламени при его распространении по газовой смеси от закрытого нижнего торцевого края к открытому верхнему краю цилиндрической вертикальной трубы. На фотокадрах 1–7 видно ускоренное развитие фронта пламени в тюльпанообразную воронку к открытой верхней торцевой стороне трубы. При амплитуде колебаний, превышающей диаметр трубы в три раза, фронт пламени принимает форму воронки, из которой вытягивается тонкий длинный шнур пламени, имеющий форму заостренного конуса, направленного вдоль оси трубы, на видеосъемке опытов заметно его вращение (кадры 4–6, рис. 4). В результате инерционных процессов начинается обратное затухающее движение пламени, несгоревшей смеси и окружающего воздуха в трубу (кадры 7–10, рис. 4).

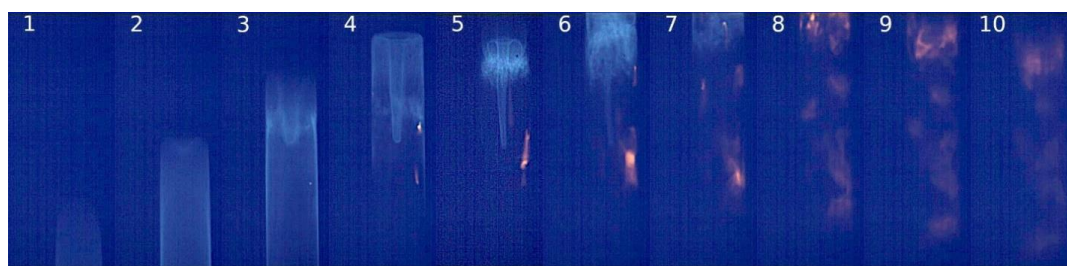


Рис. 4. Формирование «тюльпана» в трубе диаметром 0,11 м при горении газовой смеси от нижнего закрытого края к верхнему открытому краю (газовая смесь – 8 % пропана в воздухе, скорость видеосъемки – 120 кадров в секунду)

Примечание: фото авторов.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что поверхность тюльпанообразного пламени гладкая, а в опытах с вертикальным расположением трубы конус пламени скручивался в длинную воронку. На структуру воронки пламени влияют амплитуда колебаний газа и его скорость. Равенство видимой скорости движения фронта пламени и газа является условием возникновения колебаний фронта пламени. Возникающая кривизна фронта пламени способствует новым гидродинамическим эффектам при двумерном течении газа. На поверхности «тюльпана» образуются складки, в дальнейшем это приводит к возникновению вихреобразования в расширяющемся сечении трубы и распаду фронта пламени. Изучение влияния избирательной диффузии газов горючей смеси на формирование многогранника пламени проводили с увеличением диаметра трубы и изменением состава горючей смеси. Круглый конус (кадры 4–5, рис. 4) является лишь частным случаем среди возможных форм «тюльпана». Число граней – изломов тюльпанообразного фронта пламени – зависит от диаметра «тюльпана» пламени и ширины грани на его поверхности. Период колебаний фронта пламени и газа в трубе, влияющий на появление тюльпанообразного фронта пламени, характеризуется временем $T = (0,1 \div 1,0)$ с.

Время диффузии пропана на расстоянии, соизмеримом с радиусом трубы, определяется уравнением $\tau = \frac{R^2}{D}$, где $D \cong 1 \cdot 10^{-4}$ м²/с – коэффициент диффузии пропана.

Сравнивая время τ и период T , получаем радиус трубы экспериментальной установки $R = \sqrt{TD} \cong 0,05$ м, при котором возможно образование из круглого тюльпанообразного пламени многогранного конуса или призмы. Число Рейнольдса в экспериментах составляло

$$Re = \frac{2R \cdot u_f}{\nu} = 1000,$$

где R – радиус трубы, u_f – видимая скорость распространения пламени в трубе, ν – коэффициент кинематической вязкости.

На кадрах рис. 5 видно, что изменение структуры «тюльпана» пламени происходит при числах Рейнольдса $Re = 650$. В процессе распространения фронта пламени на его поверхности развиваются мелкомасштабные ячеистые возмущения (кадры 1–3, рис. 5), далее на круглом изначально гладком конусе пламени появляется поперечная выраженная складка, сверху и снизу от нее формируются шесть боковых граней (кадры 4–8, рис. 5).

Относительно трубы образованный конус неподвижен и принимает форму шестигранного цилиндра, т. к. радиальная и осевая составляющие скорости движения газа на поверхности тюльпанообразного пламени оказываются минимальными. По мере движения пламени к открытому краю трубы происходит вытягивание цилиндра воронки с дальнейшим распадом пламени (кадры 9–10, рис. 5).

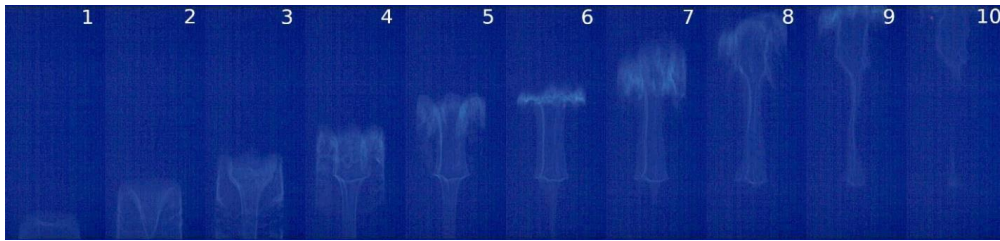


Рис. 5. Эволюция тюльпанообразного пламени при горении пропано-воздушной смеси в трубе
(газовая смесь – 3, 5 % пропана в воздухе, скорость видеосъемки – 120 кадров в секунду)

Примечание: фото авторов.

Обсуждение результатов

Появление поперечных и продольных граней на поверхности «тюльпана» пламени связано с потерей устойчивости пространственно-однородного распределения концентрации пропана в горючей смеси вблизи цилиндрического конуса пламени (рис. 6).

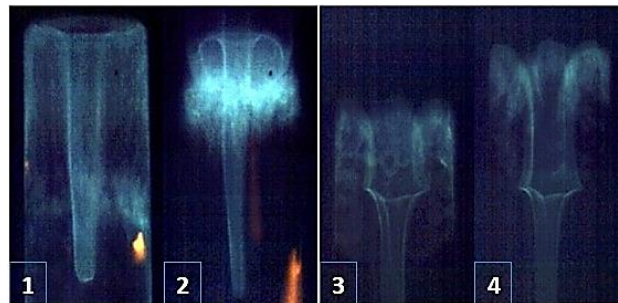


Рис. 6. Структура «тюльпана» фронта пламени в круглой трубе
(1, 2 – формирование и распад гладкого цилиндра фронта пламени;
3, 4 – образование продольных и поперечных складок на поверхности пламени)

Примечание: фото авторов.

Математическая модель, которая описывает распределение концентрации, определяется выражением [20]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \beta \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} \right) + \gamma \cdot f(c), \quad (1)$$

где c – концентрация пропана, β – коэффициент стехиометрии, γ – геометрический параметр уравнения и $f(c)$ – скорость проникновения газа в зону горения (1). Краевыми условиями для уравнения (1) будут: $c(0, x, y) = c(2\pi R, x, t)$ и $\left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)_{y=0} = \left(\frac{\partial c}{\partial y} \right)_{y=2\pi R}$ – на линии разделения

цилиндрической поверхности пламени, а на его основаниях условия связаны с отсутствием потока вещества: $\left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=0} = \left(\frac{\partial c}{\partial x}\right)_{x=l} = 0$, где R и l – радиус и длина поверхности цилиндрического пламени, x и y – продольная и поперечная координаты системы. Концентрации, определяющие возникновение возмущений – граней на «тюльпане» – имеют следующий вид:

$$V_{m,n} = \cos \frac{\pi m}{l} x \left[\cos \left(\frac{y}{R} n \right) + \sin \left(\frac{y}{R} n \right) \right], \quad (2)$$

где m, n – параметры, определяющие концентрацию газа. Рассматриваемая поверхность тюльпанообразного фронта пламени с продольными и поперечными гранями существует при выполнении условия: $c_1 \leq V_{m,n} \leq c_2$, где c_1 и c_2 – объемные доли концентрации горючей компоненты газовой смеси при нижнем и верхнем пределах ее воспламенения и дальнейшем распространении пламени. Представим неравенство в виде:

$$c_1 \leq \sqrt{2} \cos \left(\frac{\pi m}{l} x \right) \cdot \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{y}{R} n \right) \leq c_2. \quad (3)$$

Для случая, когда $m = 0$, т. е. поперечные возмущения на поверхности пламени не образуются, из формулы (3) получим следующее выражение (при $\frac{y}{R} = 1$):

$$\frac{9}{4} \pi - \arccos \left(\frac{c_1}{\sqrt{2}} \right) \leq n \leq \frac{9}{4} \pi + \arccos \left(\frac{c_2}{\sqrt{2}} \right). \quad (4)$$

Динамические процессы из-за ускорения фронта пламени определяются интервалом критических чисел Фруда $2 \div 4 \leq Fr \leq 10 \div 25$ и чисел Рейнольдса $Re = 750 \div 2250$, представленных на рис. 7.

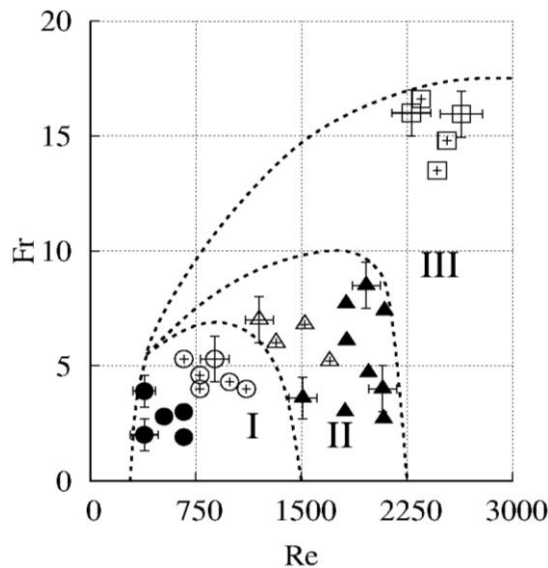


Рис. 7. Зависимость чисел Фруда от чисел Рейнольдса
(штрихпунктирные линии ограничивают области различных режимов горения)

Примечание: составлено авторами.

Ускорение фронта пламени порождает критические явления: нарушение формы, устойчивости фронта пламени и смену стационарного режима горения вибрационным. На рис. 7: I – светлые кружки $\left(\frac{L}{d} \leq 25\right)$ на плоскости графика – для области «тюльпана»

пламени с ровной поверхностью, темные кружки $\left(\frac{L}{d} \leq 15\right)$ – для области формирования продольных возмущений на «тюльпане»; II – белые треугольники показывают образование поперечных изломов на фронте пламени, черные треугольники соответствуют области инерционных колебаний; III – область перехода дефлаграционного горения в детонацию.

Эффекты перестройки структуры пламени как при стационарном, так и нестационарном распространении фронта пламени порождены критическими процессами теплообмена, связаны с геометрическими размерами и формой трубы, а также с потерями тепла из зоны горения в стенки трубы.

Заключение

Авторами статьи разработана и испытана методика изучения физических процессов, возникающих в результате распространения пропано-воздушного пламени, имеющего релаксационный характер. Показано, что динамические явления, связанные с ускорением фронта пламени в полуоткрытой трубе, определяются интервалом критических чисел Фруда. Выявлено, что глубина воронки фронта пламени связана с амплитудой колебаний и определяется длиной трубы. Результаты экспериментальных исследований могут применяться при создании релаксационных горелочных устройств и камер сгорания для двигателей.

Литература

1. Xiao H., Makarov D., Sun J., Molkov V. Experimental and Numerical Investigation of Premixed Flame Propagation with Distorted Tulip Shape in a Closed Duct // *Combustion and Flame*. 2012. Vol. 159, No. 4. P. 1523–1538. DOI 10.1016/j.combustflame.2011.12.003.
2. Petchenko A., Bychkov V., Akkerman V. Violent Folding of a Flame Front in a Flame-Acoustic Resonance // *Physical Review Letters*. 2006. Vol. 97. P. 164501–164504.
3. Bi M., Dong Ch., Zhou Y. Numerical Simulation of Premixed Methane–Air Deflagration in Large L/D Closed Pipes // *Applied Thermal Engineering*. 2012. Vol. 40, P. 337–342. DOI 10.1016/j.applthermaleng.2012.01.065.
4. Wang M., Wen X., Zhang S., Wang F., Zhu Q., Pan R., Ji W. Effect of Metal Foam Mesh on Flame Propagation of Biomass-Derived Gas in a Half-Open Duct // *ACS Omega*. 2020. Vol. 5, 32, P. 20643–20652.
5. Alekseev M. M., Alekseev M. V., Samsonov V. P., Semenov O. Y. Simulation of Hydrodynamic Phenomena Attendant on the Flame Front Propagation in a Tube Behind a Piston // *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 59, No. 1. P. 52–59.
6. Valiev D.M., Akkerman V., Kuznetsov M., Eriksson L. E. et al. Influence of Gas Compression on Flame Acceleration in the Early Stage of Burning in Tubes // *Combustion and Flame*. 2013. Vol. 160, P. 97–111.
7. Bychkov V., Akkerman V., Fru G., Petchenko A., Eriksson L. E. Flame Acceleration in the Early Stages of Burning in Tubes // *Combustion and Flame*. 2007. Vol. 150. P. 263–276.
8. Fedorov A. V., Istratov A. G., Kidin N. I. Investigation of Flame Front Tulip and Cellular Configurations // *Ninth International Conference on Numerical Combustion, Italy, Sorrento. Book of Abstract Paper*. 2002. No. 48. P. 101–102.
9. Alekseev M. M., Samsonov V. P., Semenov O. Y. Relaxation Combustion of Gas Mixture in a Tube: Paradox Piston Motion // *Technical Physics Letters*. 2013. No. 5 (39). P. 435–437.
10. Radisson B., Piketty-Moine J., Almarcha C. Coupling of Vibro-Acoustic Waves with Premixed Flame // *Physical Review Fluids, American Physical Society*. 2019. Vol. 4 (12), P. 1–12.

11. Alexeev M. M., Semenov O. Yu., Yakush S. E. Experimental Study on Cellular Premixed Propane Flames in a Narrow Gap between Parallel Plates // *Combustion Science and Technology*. 2019. Vol. 191, No. 7. P. 1256–1275.
12. Zhao D., Li J. Feedback Control of Combustion Instabilities Using a Helmholtz Resonator with an Oscillating Volume // *Combustion Science and Technology*. 2012. Vol. 184, No. 5. P. 694–716.
13. Максимов Д. Ю. Асимптотические режимы горения в широких трубах // *Матем. моделирование*. 2007. Т. 19, № 10. С. 15–28.
14. Подымов В. Н., Гильфанов К. Х., Сибгатуллин И. Ф., Мингатын И. И. Характеристики в одномерном приближении релаксационных колебаний пламени в канале // *Проблемы энергетики*. 2012. № 1–2. С. 34–40.
15. Huahua X., Jinhua S., Peng Ch. Experimental and Numerical Study of Premixed Hydrogen/Air Flame Propagating in a Combustion Chamber // *Journal of Hazardous Materials*. 2014. Vol. 268, P. 132–139. DOI 10.1016/j.jhazmat.2013.12.060.
16. Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Диффузионно-тепловые и гидродинамические эффекты при распространении фронта пламени в релаксационной камере сгорания с изменяющейся площадью поперечного сечения // *Вестник кибернетики*. 2020. № 3. С. 6–15.
17. Рубцов Н. М., Сеплярский Б. С., Набоко И. М., Черныш В. И., Цветков Г. И., Трошин К. Я. Взаимодействие ламинарных пламен метано-воздушных смесей с мелкоячеистыми плоскими и сферическими препятствиями в замкнутом цилиндрическом реакторе при инициировании искровым разрядом // *Химическая физика и мезоскопия*. 2015. Т. 17, № 2. С. 183–191.
18. Иванов В. С., Фролов С. М. Математическое моделирование распространения пламени в гладких трубах и трубах с регулярными препятствиями // *Пожаробезопасность*. 2010. Т. 19, № 1. С. 14–19.
19. Шрагер Э. Р., Васенин И. М., Сабденов К. О. Сравнительный анализ результатов решения задачи о диффузионно-тепловой неустойчивости пламени // *Изв. Томск. политех. ун-та*. 2005. Т. 308, № 6. С. 28–33.
20. Семенов О. Ю. Исследование релаксационного распространения пламени в каналах : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2014. 23 с. URL: <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000476181> (дата обращения: 22.02.2021).