

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Научная статья
УДК 536.46
doi: 10.34822/1999-7604-2022-3-75-83

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ СФЕРЕ

Максим Михайлович Алексеев¹, Олег Юрьевич Семенов^{2✉}

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

¹ amm.iff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>

² ous.tutor.phinma@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>

Аннотация. Исследовано распространение пламени, развивающегося в сферическом объеме однородного предварительно смешанного горючего газа, находящегося в мыльном пузыре и воспламененного с помощью электрического разряда. Проведена визуализация распространения фронта пламени с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры. Получены зависимости скорости фронта пламени от времени и радиальных величин мыльного пузыря в широком диапазоне условий по видеозаписям серии экспериментов.

Результаты экспериментальных исследований могут использоваться для создания современных камер сгорания и более совершенных горелочных устройств.

Ключевые слова: фронт пламени, скорость, горение, пропан, мыльный пузырь, радиус сферы, теплодиффузионная неустойчивость, искровое зажигание, визуализация

Для цитирования: Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Изучение распространения пламени в расширяющейся сфере // Вестник кибернетики. 2022. № 3 (47). С. 75–83. DOI 10.34822/1999-7604-2022-3-75-83.

Original article

STUDY OF FLAME PROPAGATION IN AN EXPANDING SPHERE

Maksim M. Alekseev¹, Oleg Yu. Semenov^{2✉}

^{1,2} Surgut State University, Surgut, Russia

¹ amm.iff@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8657-5803>

² ous.tutor.phinma@mail.ru ✉, <https://orcid.org/0000-0002-3553-7356>

Abstract. The article studies the flame propagation in a soap bubble filled with a spherical volume of a homogeneous pre-mixed combustible gas ignited by an electrical discharge. Visualization of the flame front propagation is carried out using a high-speed digital video camera. The video recordings of an experiment series show the relationship between the flame front velocity and the time and radial values of a soap bubble in various conditions.

The experiment results can be used for the invention of a modern combustion chamber and more sophisticated burner arrangements.

Keywords: flame front, velocity, combustion, propane, soap bubble, sphere radius, thermal diffusion instability, spark ignition, visualization

For citation: Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Study of Flame Propagation in an Expanding Sphere // Proceedings in Cybernetics. 2022. No. 3 (47). P. 75–83. DOI 10.34822/1999-7604-2022-3-75-83.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение пламени является очень важным для расчетов при возгорании газозвушнх смесей в производственных и бытовых помещениях, создания огнепреградителей и защитных мембран. Данным исследованиям посвящено достаточно много работ, но имеются вопросы, требующие дополнительного изучения. Для описания процессов распространения пламени в мыльном пузыре авторами работ [1–5] были проведены исследования сферического пламени, постоянного объема и давления; выявлены большие расхождений в скоростях ламинарного пламени, измеренных в различных экспериментах для одной и той же смеси. В работах [6, 7] приводится описание радиального расширения сферической мыльной оболочки под действием экзотермической реакции горения при распространении фронта пламени в свободном пространстве, заполненном водородно-воздушной смесью.

Эксперименты, описанные в работах [8, 9], по изучению ускорения пламени проводили в трубке с критическим составом газозвушной смеси. Распространение и гашение пламени в каналах изучалось для понимания процессов теплообмена между пламенем и стенками канала, а также их влияния на скорость горения смеси газов. В работе [10] описывается нестационарное распространение пламени в узком канале Хеле-Шоу, оно имеет сложный характер для пламени метана и пропана. В [11] исследователи применили визуализацию потока при горении газа в мыльном пузыре с использованием лазерной томографии и шпирен-методов. Высоко-скоростная шпирен-визуализация использовалась для изучения роста ядер возмущений пламени при различной их эквивалентности. В работах [12, 13] применялась технология высокоскоростной обработки изображений, проведено исследование турбулентного распространения пламени для получения новых данных движения фронта пламени.

В работе [14] произведены численные расчеты с помощью программы расчета объемных течений пропано- и метано-воздушной смесей. Нестационарное распространение пламени смешанных с воздухом метана и пропана было исследовано с использова-

нием дисковой горелки с параллельными пластинами в работах [15, 16]. Влияние тепловых и диффузионных процессов на структуру пламени в камерах сгорания описано в работах [17–19]. Значительное количество экспериментальных работ по исследованию процессов горения не дают достаточных сведений по описанию влияния теплодиффузионных и гидродинамических условий на характер движения и структуру пламени в сферически расширяющейся оболочке.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Изучение распространения пламени в замкнутых объемах проводилось с использованием сферической емкости, в которой источник инициации находился в центре. На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Газозвушные смеси с разной концентрацией пропана в воздухе готовили в газометре вытеснения, объем подаваемой смеси фиксировали с помощью расходомера газа. Для предотвращения обратного движения пламени в газовой трубке устанавливали пламегаситель.

Мыльный пузырь надували с помощью пропано-воздушной газовой смеси через газовую трубку системы подачи газа с воздухом. Далее, при достижении требуемых размеров мыльного пузыря – ситуации, когда искровой промежуток между электродами, выполненными из тонкой стальной проволоки, оказывался в центре сферы – производили воспламенение смеси электрической искрой с помощью электронной системы зажигания, подключенной к источнику напряжения.

После зажигания образовывалось пламя в форме сферы, постепенно распространяющееся по всему объему газовой смеси – от центра мыльного пузыря к его краям. Для видеофиксации результатов экспериментов применяли высокоскоростную камеру марки AOS Technologies AGX-PRI с автоматической передачей экспериментальных данных в персональный компьютер и зеркальную цифровую камеру Sony DSLRA580. Для качественной визуализации процесса распространения пламени устанавливали электрическую лампу, световой поток которой был направлен на мыльный пузырь.

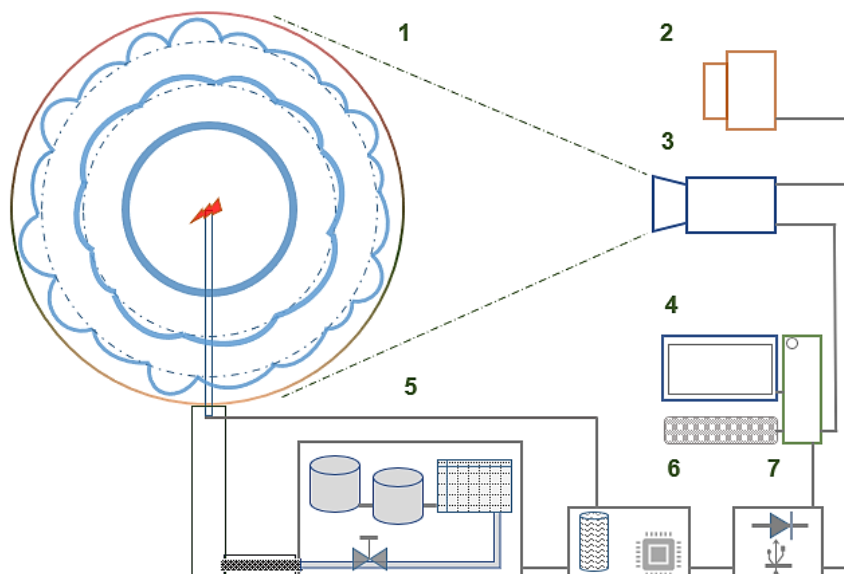


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – распространяющийся фронт пламени в мыльном пузыре; 2 – электрическая лампа подсветки;
3 – высокоскоростная камера; 4 – компьютер обработки данных;
5 – система подачи газовой смеси: газометр, трубка подачи газа с пламегасителем и расходомер;
6 – электронная система зажигания; 7 – источник напряжения

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Фронт пламени, инициированный в замкнутой емкости – мыльной сфере, распространяется в сторону несгоревшего газа при поджигании горючей смеси электрической искрой. Нормальная скорость пламени является важным параметром процесса горения, имеющего свойство физико-химической постоянства для определенной газовой смеси. Наблюдаемую скорость пламени u в мыльной сфере можно определить, зная скорость движения газовой смеси w в процессе ее сферического расширения, а также с помощью нормальной скорости u_n пламени.

Скорость фронта пламени u горючей смеси в мыльном пузыре характеризуется следующим выражением:

$$u = u_n + w, \quad (1)$$

где u_n – нормальная скорость фронта пламени, w – радиальный поток.

Степень расширения газовой смеси зависит от объема V_2 продуктов сгорания в расширяющейся сфере:

$$V_2 = \frac{4 \times \pi \times R_2^3}{3} \quad (2)$$

и начального объема V_1 пропано-воздушной горючей смеси:

$$V_1 = \frac{4 \times \pi \times R_1^3}{3}, \quad (3)$$

где R_1 – начальный радиус;

R_2 – конечный радиус мыльного пузыря.

Таким образом, нормальная скорость распространения пламени в мыльном пузыре будет определяться из уравнения:

$$u_n = u \times \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^3. \quad (4)$$

Производя измерения наблюдаемой скорости фронта пламени u по цифровой видеозаписи, применяя уравнение (4) с учетом начального R_1 и конечного R_2 радиусов мыльного пузыря, можно вычислить нормальную скорость распространения пламени u_n в сферическом объеме.

Из опытов было установлено, что пламя принимает форму расширяющейся сферы с неровной поверхностью, увеличивающейся в объеме от центра к стенкам. Через некото-

рое время после воспламенения смеси давление в мыльном пузыре сначала растет пропорционально времени, после чего происходит незначительное его изменение, связанное с возрастанием скорости горения в результате нагревания новой несгоревшей смеси перед фронтом пламени в результате адиабатического сжатия. В сферическом мыльном пузыре возникают колебания давления газа, которые влияют на формирование ячеек на поверхности фронта пламени. Радиальные потоки смеси газа в мыльной сфере появляются из-за разности температур и давлений между продуктами сгорания и горючей смесью. Осцилляции фронта пламени вызваны теплодиффузионной и гидродинамической неустойчивостью процесса

горения при распространении пламени, развивающегося в определенных условиях эксперимента.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показана эволюция фронта пламени при воспламенении пропано-воздушной смеси. Мыльный пузырь практически не оказывает влияния на тепловое расширение находящегося в нем пропана с воздухом, и пламя распространяется сферически при постоянном давлении. Светящийся шар в мыльном пузыре состоит из горячих продуктов горения, ограниченных по периферии узким сферическим фронтом пламени, разделяющим сгоревший и несгоревший газ.

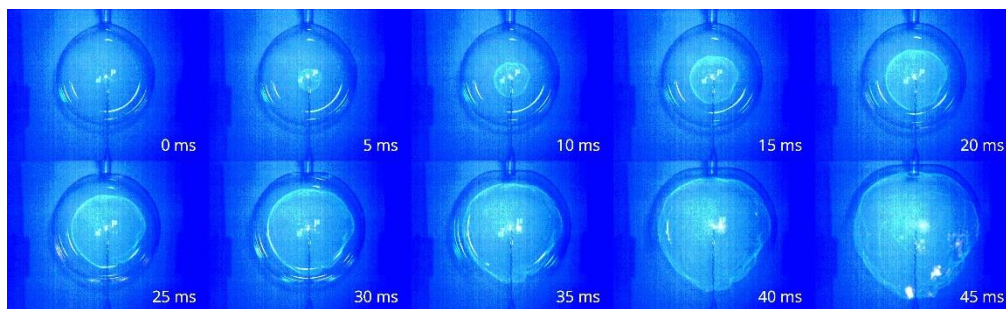


Рис. 2. Фотокадры дефлаграционного горения 5 %-го пропана и 95 %-го воздуха в мыльном пузыре (интервал времени между кадрами – 5 мс)

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

На фотокадрах записи хорошо видно развитие гладкой сферической формы пламени, которая сохраняется по мере распространения несгоревшей смеси. Далее, после некоторого времени возникают возмущения – об-

разуются ячейки различного масштаба на поверхности пламени.

Рис. 3 иллюстрирует динамику развития пламени с содержанием 7 %-го пропана.

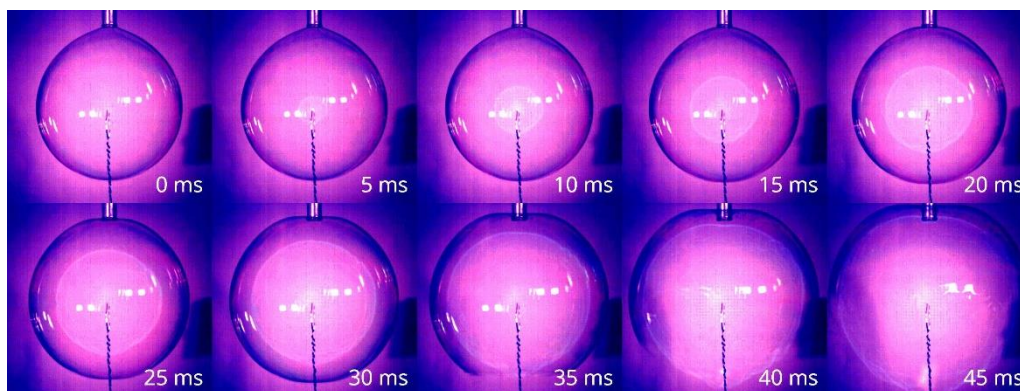


Рис. 3. Фотокадры дефлаграционного горения 7 %-го пропана и 93 %-го воздуха

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Пламя остается почти сферическим до момента, когда оно начинает подниматься. Рост мыльного пузыря происходит по мере распространения пламени к его краям, из фотографий экспериментов видны неустойчивости, развивающиеся в структуре пламени. Сфера сгоревших продуктов стремится подняться вверх в результате конвекции. Мыльный сферический пузырь растягивает-

ся по мере распространения пламени в соответствии с увеличением объема за счет теплового расширения. Объем зависит от диаметра пузыря в третьей степени, и мыльный пузырь расширяется постепенно – до тех пор, пока диаметр пламени не станет равным половине первоначального диаметра пузыря (рис. 4).

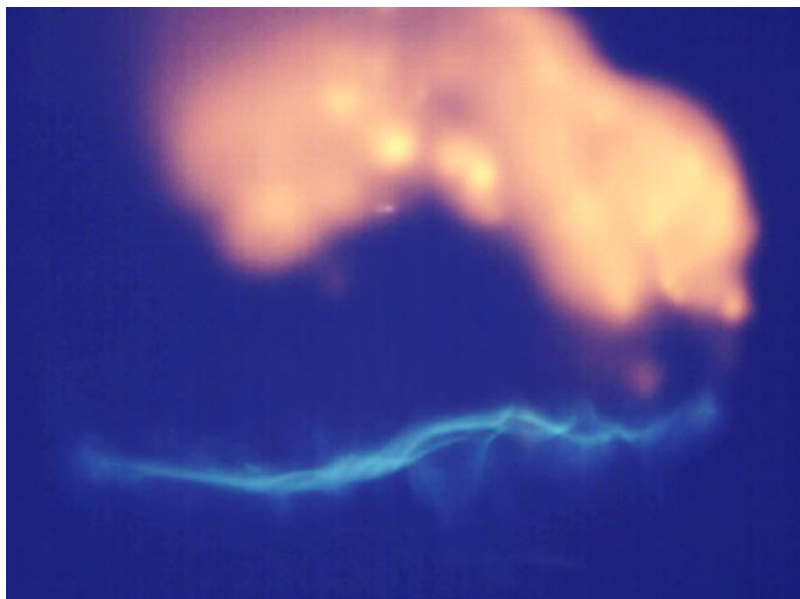


Рис. 4. Грибовидный фронт пламени

Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Далее происходит подъем и растяжение фронта пламени по мере его приближения к верхней поверхности пленки пузыря. При достижении фронта пламени мыльной пленки она лопается. После ее разрушения сфера пламени принимает грибовидную форму и существует еще в течение некоторого времени, затем ее граница размывается и становится неровной вследствие перемешивания смеси с окружающим воздухом и остатками мыльной пленки.

При разрыве пузырьковой пленки на поверхности пламени наблюдались возмущения (рис. 5). Эти возмущения через некоторое время нарастали из-за неустойчивостей Рэлея – Тейлора. Идентификация фронта пламени становится затруднительной после разрыва мыльного пузыря. Несгоревшая часть газа остается непрореагировавшей во

время переходного конвекционного процесса, что подавляет распространение пламени.

На рис. 6 приведены зависимости диаметра фронта пламени и мыльного пузыря от времени. Как следует из графика, скорость распространения пламени относительно размера мыльной сферы остается практически постоянной. Диаметр фронта пламени возрастает линейно при достижении стенок пузыря.

Из графика зависимости диаметра пузыря от диаметра фронта пламени (рис. 7) возможно определить нормальную скорость распространения пламени в мыльном пузыре.

Значение нормальной скорости фронта пламени движущегося по горючей пропановоздушной смеси определенного состава является различным в зависимости от процентного соотношения пропана в воздухе.



Рис. 5. Кадр распада мыльного пузыря с волнообразными возмущениями на его поверхности
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

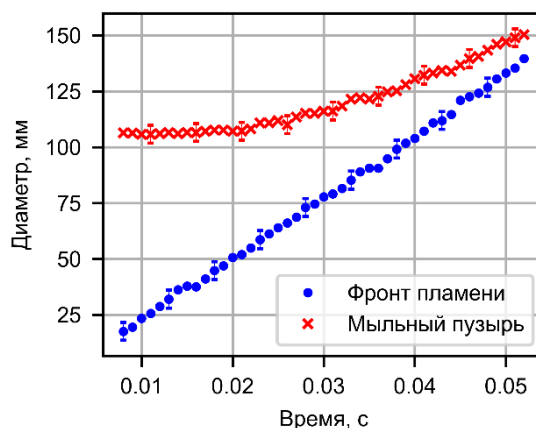


Рис. 6. График зависимости диаметра фронта пламени и мыльного пузыря от времени
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

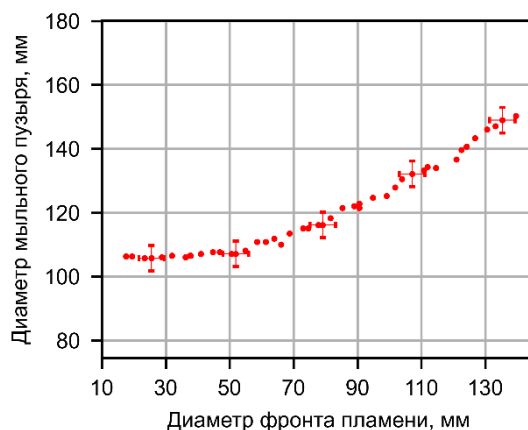


Рис. 7. График зависимости диаметра пузыря от диаметра фронта пламени
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

Искривленная форма поверхности фронта пламени стабилизируется за счет увеличения скорости газа и уменьшения скорости горения в одних участках, а также уменьшения

скорости газа и увеличения скорости горения в других. На рис. 8 представлены зависимости скорости движения границы пузыря и фронта пламени от их диаметров. Они вы-

числены через производную зависимостей радиусов от времени. Так как радиусы измеряются по изображениям с точностью до од-

ного пикселя, исходные данные о зависимости радиусов от времени получаются «зашумленными» из-за погрешности измерений.

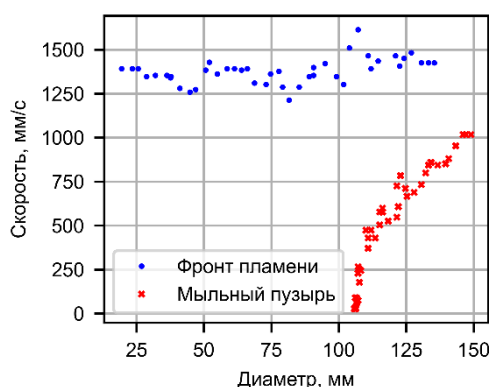


Рис. 8. Скорость движения границы пузыря и фронта пламени в зависимости от их диаметров
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

При численном нахождении производной от таких «зашумленных» данных скорость меняется в больших пределах (рис. 9).

Линии на графиках зависимостей диаметров от времени – это и есть сглаженные данные, но даже по сглаженным фильтром данным скорость немного меняется, т. к. движения границы пузыря и фронта неравномерны.

Для того чтобы вычислить производную от радиуса по времени, исходные измерения были сглажены фильтром Савицкого – Голея. При более сильном сглаживании любым фильтром кроме устранения шумов теряются особенности на исходных данных, что совершенно не соответствует действительности, связанной с особенностью этого фильтра.



Рис. 9. Скорость движения границы пузыря и фронта от времени
Примечание: составлено авторами на основании данных, полученных в исследовании.

По графикам зависимости скорости движения границы мыльного пузыря и фронта пламени от их диаметров и времени зафиксировано, что сферически распространяющееся пламя действует на мыльную оболочку пузыря, заставляя ее радиально расширяться от центральной точки зажигания с проявлением гидродинамических, диффузионных и тепловых явлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе применена методика исследования процессов распространения газоздушного пламени в мыльных пузырях. Из экспериментов установлено, что максимум нормальной скорости пламени смещен в сторону избытка горючего газа по отношению к смеси стехиометрического состава, в сферическом пламени поток тепла от сгоревшего га-

за к несгоревшему является расходящимся. Результаты экспериментальных исследований могут использоваться для создания со-

временных камер сгорания и более совершенных горелочных устройств.

Список источников

1. Faghih M., Chen Z. The Constant-Volume Propagating Spherical Flame Method for Laminar Flame Speed Measurement Science // Science Bulletin. 2016. Vol. 61, Is. 16. P. 1296–1310. DOI 10.1007/s11434-016-1143-6.
2. Vledouts A., Quinard J., Vandenberghe N., Villermaux E. Explosive Fragmentation of Liquid Shells // J Fluid Mech. 2016. Vol. 788. P. 246–273. DOI 10.1017/jfm.2015.716.
3. Li F.-S., Li G.-X., Jiang Y.-H., Li H.-M., Sun Z.-Y. Study on the Effect of Flame Instability on the Flame Structural Characteristics of Hydrogen/Air Mixtures Based on the Fast Fourier Transform // Energies. 2017. Vol. 10, No. 5. P. 678. DOI 10.3390/en10050678.
4. Askari O., Elia M., Ferrari M., Metghalchi H. Cell Formation Effects on the Burning Speeds and Flame Front Area of Synthetic Gas at High Pressures and Temperatures // Appl Energy 2017. Vol. 189, Is. C. P. 568–577.
5. Choi O., Lee M. C. Investigation into the Combustion Instability of Synthetic Natural Gases Using High Speed Flame Images and Their Proper Orthogonal Decomposition // Int J Hydrog Energy. 2016. Vol. 41, Is. 45. P. 20731–20743.
6. Володин В. В., Голуб В. В., Ельянов А. Е., Коробов А. Е., Микушкин А. Ю., Петухов В. А. Влияние объема водородно-воздушной газовой смеси, типа и энергии инициирования на распространение сферического фронта пламени // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2019. № 2. С. 64–80. DOI 10.18698/1812-3368-2019-2-64-80.
7. Vledouts A., Quinard J., Vandenberghe N., Villermaux E. Explosive Fragmentation of Liquid Shells // J Fluid Mech Cambridge University Press. 2016. Vol. 788. P. 246–273. DOI 10.1017/jfm.2015.716.
8. Семенов О. Ю. Исследование релаксационного распространения пламени в каналах : автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 2014. 23 с. URL: <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000476181> (дата обращения: 01.04.2022).
9. Ciccarelli G., Chaumeix N., Mendiburu A. Z., N'Guessan K., Comandini A. Fast-Flame Limit for Hydrogen/Methane-Air Mixtures // Proceedings of the Combustion Institute. 2019. Vol. 37, Is. 3. P. 3661–3668. DOI 10.1016/j.proci.2018.06.045.
10. Alekseev M. M., Alekseev M. V., Samsonov V. P., Semenov O. Yu. Simulation of Hydrodynamic Phenomena Attendant on the Flame Front Propagation in a Tube Behind a Piston // Tech Phys. 2014. Vol. 59, No. 1. P. 52–59.

References

1. Faghih M., Chen Z. The Constant-Volume Propagating Spherical Flame Method for Laminar Flame Speed Measurement Science // Science Bulletin. 2016. Vol. 61, Is. 16. P. 1296–1310. DOI 10.1007/s11434-016-1143-6.
2. Vledouts A., Quinard J., Vandenberghe N., Villermaux E. Explosive Fragmentation of Liquid Shells // J Fluid Mech. 2016. Vol. 788. P. 246–273. DOI 10.1017/jfm.2015.716.
3. Li F.-S., Li G.-X., Jiang Y.-H., Li H.-M., Sun Z.-Y. Study on the Effect of Flame Instability on the Flame Structural Characteristics of Hydrogen/Air Mixtures Based on the Fast Fourier Transform // Energies. 2017. Vol. 10, No. 5. P. 678. DOI 10.3390/en10050678.
4. Askari O., Elia M., Ferrari M., Metghalchi H. Cell Formation Effects on the Burning Speeds and Flame Front Area of Synthetic Gas at High Pressures and Temperatures // Appl Energy 2017. Vol. 189, Is. C. P. 568–577.
5. Choi O., Lee M. C. Investigation into the Combustion Instability of Synthetic Natural Gases Using High Speed Flame Images and Their Proper Orthogonal Decomposition // Int J Hydrog Energy. 2016. Vol. 41, Is. 45. P. 20731–20743.
6. Volodin V. V., Golub V. V., Elyanov A. E., Korobov A. E., Mikushkin A. Yu., Petukhov V. A. Effects of Hydrogen-Air Gas Mixture Volume and Initiation Type and Energy on the Propagation of a Spherical Flame Front // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences. 2019. No. 2. P. 64–80. DOI 10.18698/1812-3368-2019-2-64-80. (In Russian).
7. Vledouts A., Quinard J., Vandenberghe N., Villermaux E. Explosive Fragmentation of Liquid Shells // J Fluid Mech Cambridge University Press. 2016. Vol. 788. P. 246–273. DOI 10.1017/jfm.2015.716.
8. Semenov O. Yu. Issledovanie relaksatsionnogo rasprostraneniia plameni v kanalakh : Extended abstract Can. Sci. Dissertation (Physics and Mathematics). Tomsk, 2014. 23 p. URL: <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vtls:000476181> (accessed: 01.04.2022). (In Russian).
9. Ciccarelli G., Chaumeix N., Mendiburu A. Z., N'Guessan K., Comandini A. Fast-Flame Limit for Hydrogen/Methane-Air Mixtures // Proceedings of the Combustion Institute. 2019. Vol. 37, Is. 3. P. 3661–3668. DOI 10.1016/j.proci.2018.06.045.
10. Alekseev M. M., Alekseev M. V., Samsonov V. P., Semenov O. Yu. Simulation of Hydrodynamic Phenomena Attendant on the Flame Front Propagation in a Tube Behind a Piston // Tech Phys. 2014. Vol. 59, No. 1. P. 52–59.

11. Nandan V. D., Deore N. Developments of Flame Propagation in Micro and Mesoscale Channels // IOSR Journal of Engineering. 2014. Vol. 04, Is. 06. P. 26–29.
12. Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Физическое моделирование тюльпанообразного пламени при горении газов в цилиндрической вертикальной трубе // Вестн. кибернетики. 2021. № 1 (41). С. 63–70.
13. Jang H. J., Lee S. M., Kim N. I. Effects of Ignition Disturbance on Flame Propagation of Methane and Propane in a Narrow-Gap-Disk-Burner // Combustion and Flame. 2020. Vol. 215. P. 124–133. DOI 10.1016/j.combustflame.2020.01.019.
14. Алексеев М. М., Борисов В. Е., Семенов О. Ю., Якуш С. Е. Моделирование горения в узком плоском канале // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2016. Т. 134. 32 с. DOI 10.20948/prepr-2016-134.
15. Badawy T., Chao X. B., Xu H. Impact of Spark Plug Gap on Flame Kernel Propagation and Engine Performance // Applied Energy. 2017. Vol. 191. P. 311–327. DOI 10.1016/j.apenergy.2017.01.059.
16. Jang H. J., Jang G. M., Kim N. I. Unsteady Propagation of Premixed Methane/Propane Flames in a Mesoscale Disk Burner of Variable-Gaps // Proceedings of the Combustion Institute. 2018. Vol. 37, Is. 2. P. 1861–1868. DOI 10.1016/j.proci.2018.06.112.
17. Radisson B., Piketty-Moine J., Almarcha C. Coupling of Vibro-Acoustic Waves with Premixed Flame // Phys Rev Fluids. 2019. Vol. 4, Is. 12. P. 121201.
18. Zhao D., Li J. Feedback Control of Combustion Instabilities Using a Helmholtz Resonator with an Oscillating Volume // Combustion Science and Technology. 2012. Vol. 184, Is. 5. P. 694–716.
19. Kiverin A., Yakovenko I. Mechanism of Transition to Detonation in Unconfined Volumes // Acta Astronautica. 2020. Vol. 176. P. 647–652. DOI 10.1016/j.actaastro.2020.02.013.
11. Nandan V. D., Deore N. Developments of Flame Propagation in Micro and Mesoscale Channels // IOSR Journal of Engineering. 2014. Vol. 04, Is. 06. P. 26–29.
12. Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Tulip Flame Physical Modeling during Gaseous Combustion in a Cylindrical Vertical Pipe // Proceedings in Cybernetics. 2021. No. 1 (41). P. 63–70. (In Russian).
13. Jang H. J., Lee S. M., Kim N. I. Effects of Ignition Disturbance on Flame Propagation of Methane and Propane in a Narrow-Gap-Disk-Burner // Combustion and Flame. 2020. Vol. 215. P. 124–133. DOI 10.1016/j.combustflame.2020.01.019.
14. Alekseev M. M., Borisov V. E., Semenov O. Yu., Yakush S. E. Numerical Study on Combustion in a Plane Narrow Channel // Keldysh Institute Preprints. 2016. Vol. 134. 32 p. DOI 10.20948/prepr-2016-134. (In Russian).
15. Badawy T., Chao X. B., Xu H. Impact of Spark Plug Gap on Flame Kernel Propagation and Engine Performance // Applied Energy. 2017. Vol. 191. P. 311–327. DOI 10.1016/j.apenergy.2017.01.059.
16. Jang H. J., Jang G. M., Kim N. I. Unsteady Propagation of Premixed Methane/Propane Flames in a Mesoscale Disk Burner of Variable-Gaps // Proceedings of the Combustion Institute. 2018. Vol. 37, Is. 2. P. 1861–1868. DOI 10.1016/j.proci.2018.06.112.
17. Radisson B., Piketty-Moine J., Almarcha C. Coupling of Vibro-Acoustic Waves with Premixed Flame // Phys Rev Fluids. 2019. Vol. 4, Is. 12. P. 121201.
18. Zhao D., Li J. Feedback Control of Combustion Instabilities Using a Helmholtz Resonator with an Oscillating Volume // Combustion Science and Technology. 2012. Vol. 184, Is. 5. P. 694–716.
19. Kiverin A., Yakovenko I. Mechanism of Transition to Detonation in Unconfined Volumes // Acta Astronautica. 2020. Vol. 176. P. 647–652. DOI 10.1016/j.actaastro.2020.02.013.

Информация об авторах

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

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

Information about the authors

M. M. Alekseev – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor.

O. Yu. Semenov – Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor.