

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ / PHYSICS AND MATHEMATICS

Научная статья

УДК 004.94:536.46

DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-11



ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРОНТА ПЛАМЕНИ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ СМЕСИ

Максим Михайлович Алексеев¹, Олег Юрьевич Семенов²✉

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

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

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

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование и численное моделирование распространения фронта пламени по стратифицированной газовой смеси в плоском канале малого поперечного размера, образованного двумя параллельными пластинами. Получены изображения фронта пламени методом прямого фотографирования. Обнаружено изменение формы пламени при колебательном распространении в длинном канале. Построены поля распределения температур, концентрации газа, давления, скорости и линии тока. Показано, что результаты моделирования качественно совпадают с результатами экспериментов.

Ключевые слова: OpenFOAM, фронт пламени, эксперимент, плоский канал, численное моделирование, пропан, стратифицированная смесь, метан

Для цитирования: Алексеев М. М., Семенов О. Ю. Численное моделирование фронта пламени газовой смеси в стратифицированном канале // Вестник кибернетики. 2024. Т. 23, № 2. С. 81–91. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-11.

Original article

NUMERICAL MODELING OF THE FLAME FRONT OF A GAS-AND-AIR STRATIFIED MIXTURE

Maksim M. Alekseev¹, Oleg Yu. Semenov²✉

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

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

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

Abstract. The study conducts a test and numerical modeling of flame front propagation along a stratified gas mixture in a small transverse flat channel made by two parallel plates. Images of the flame front were obtained through direct photography. A shape change was detected during the flame oscillatory propagation along a long channel. The distribution fields of temperature, gas concentration, pressure, velocity, and streamline were constructed. The simulation findings have been shown to qualitatively coincide with the test findings.

Keywords: OpenFOAM, flame front, experiment, flat channel, numerical simulation, propane, stratified mixture, methane

For citation: Alekseev M. M., Semenov O. Yu. Numerical modeling of the flame front of a gas-and-air stratified mixture. *Proceedings in Cybernetics*. 2024;23(2):81–91. DOI 10.35266/1999-7604-2024-2-11.

ВВЕДЕНИЕ

Научный интерес изучения горения стратифицированных газоздушных смесей связан с влиянием неоднородного распределения концентрации на устойчивость и структуру пламени. Стратифицированная смесь – это смесь, в которой ее разные компоненты распределены слоями, то есть стратами. Это может происходить, например, при смешивании газов или жидкостей.

Стратификация приводит к изменению температуры и плотности газа, что влияет на распределение концентрации и, следовательно, на безопасность и эффективность процессов горения [1–5]. В статье [6] изучается поведение фронта пламени стратифицированной пропановоздушной смеси в плоском канале. Авторы обнаружили, что пламя распространяется преимущественно вдоль узкой области, это связано с особенностями стратификации газовой смеси и процессами теплопередачи. Авторами работ [7, 8] описаны методики определения концентрации газов легких углеводородов. Прогнозирование особенностей распространения фронта пламени важно для предотвращения пожаров и разработки эффективных систем пожаротушения. В рабо-

тах [9–11] рассматриваются приборы для обнаружения утечек нефтепродуктов и методы устранения аварий на магистральных трубопроводах с учетом стратификации газов. Сжигание газоздушного топлива разной концентрации в небольших по размеру горелочных устройствах является многообещающей технологией, которая имеет большой потенциал для создания новых типов энергетических и двигательных установок [12–15]. В настоящее время в научной литературе недостаточно представлено сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных при распространении фронта пламени в стратифицированном слое, приводящего к изменению его формы и неустойчивости.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для экспериментальных исследований пламени в неоднородной среде использовали вертикальный прямоугольный канал размерами $1400 \times 300 \times 3$ мм³ (рис. 1). Канал из прозрачного оргстекла, герметично закрытый со всех сторон, заполняли метановоздушной или пропановоздушной смесью, состав которой значительно превышал концентрационные пределы распространения пламени.

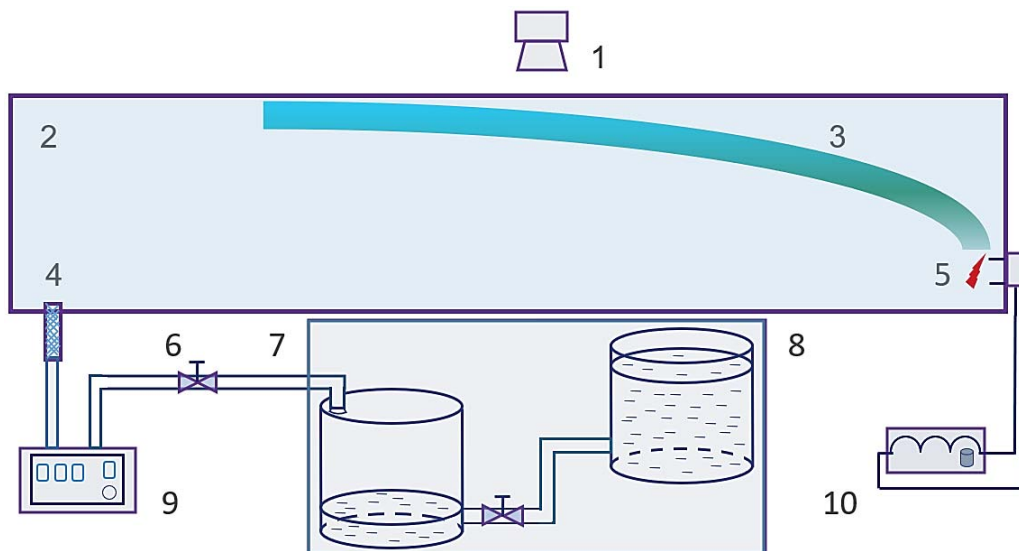


Рис. 1. Схема установки для изучения процесса горения газовой смеси:

- 1 – цифровая фотокамера (вид сбоку); 2 – прозрачный плоский канал;
- 3 – траектория фронта пламени; 4 – пламегаситель; 5 – электроды;
- 6 – кран подачи газовой смеси; 7 – газовая трубка; 8 – газометр вытеснения;
- 9 – расходомер газа; 10 – катушка с электрическими проводами

Примечание: составлено авторами.

После заполнения канала газовой смесью одна из его боковых стенок открывалась, и смесь вытекала из ее верхней или нижней части. Через фиксированное время горючую газовую смесь, образовавшуюся в канале в результате смешивания с заходящим в канал воздухом, воспламеняли высоковольтным разрядом и записывали процесс распространения пламени на цифровую видеокамеру. Для регистрации структуры и формы пламени, изучения колебаний границы траектории, последующего анализа параметров движения пламени применялся метод прямого фотографирования и получения изображения на матрице ПЗС при открытом затворе фотокамеры.

Процесс распространения пламени снимался на цифровую камеру с высоким разрешением и возможностью скоростной видеозаписи от 25 до 1000 кадров в секунду. С помощью видеосъемки была получена серия изображений, которые показали динамику границы пламени в течение определенного периода времени. Для улучшения видимости контура канала и фронта пламени устанавливали подсвечиваемый внешним источником света экран. Это позволило получить более четкие и яркие изображения участков фронта пламени, а также контура канала, что помогло точнее анализировать и интерпретировать полученные экспериментальные данные.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальные результаты

В ходе проведенных опытов наблюдались изменения концентрации и формы траекто-

рии распространения фронта пламени при различных соотношениях смесей для метана и пропана в воздухе, а также в зависимости от разных точек воспламенения смеси в канале (рис. 2).

Угол наклона траектории границы пламени зависит от времени истечения пропана. Фронт двигался по области, где образовалась смесь с нужной концентрацией. От начальной концентрации смеси зависела ширина фронта пламени в плоском канале. При чистом пропане граница стратификации становилась более резкой.

На рис. 3 представлены фотокадры опытов зажигания горючей смеси в нижней части торцевой стенки плоского канала. Большая светимость поверхности пламени связана с распределением концентрации газа в воздухе. Нижняя часть фронта пламени имеет зелено-синий цвет, а верхняя – сине-фиолетовый цвет. Температура в области горения изменяется от минимальной, соответствующей пределам воспламенения, до максимальной при образовании стехиометрической концентрации газовой смеси.

На рис. 4 показаны два изображения пламени – кадр из видеофильма распространения пламени и его фотометрическое изображение, позволяющее определить распределение энергетической светимости на поверхности пламени. Верхняя часть фронта пламени может отставать от нижнего края или опережать его из-за различной нормальной скорости пламени на отдельных участках его поверхности. Эта скорость зависит от локального состава горючей смеси, при этом фронт пламени

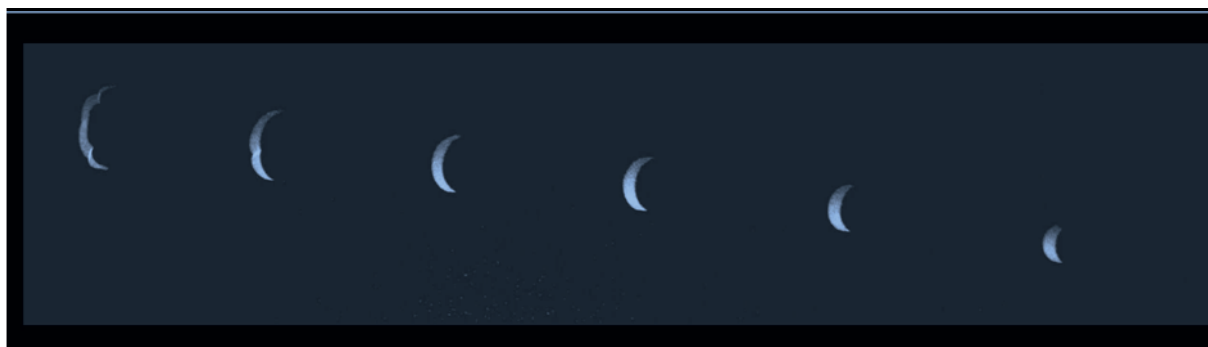


Рис. 2. Кадры движения фронта пламени в стратифицированном слое

Примечание: составлено авторами.

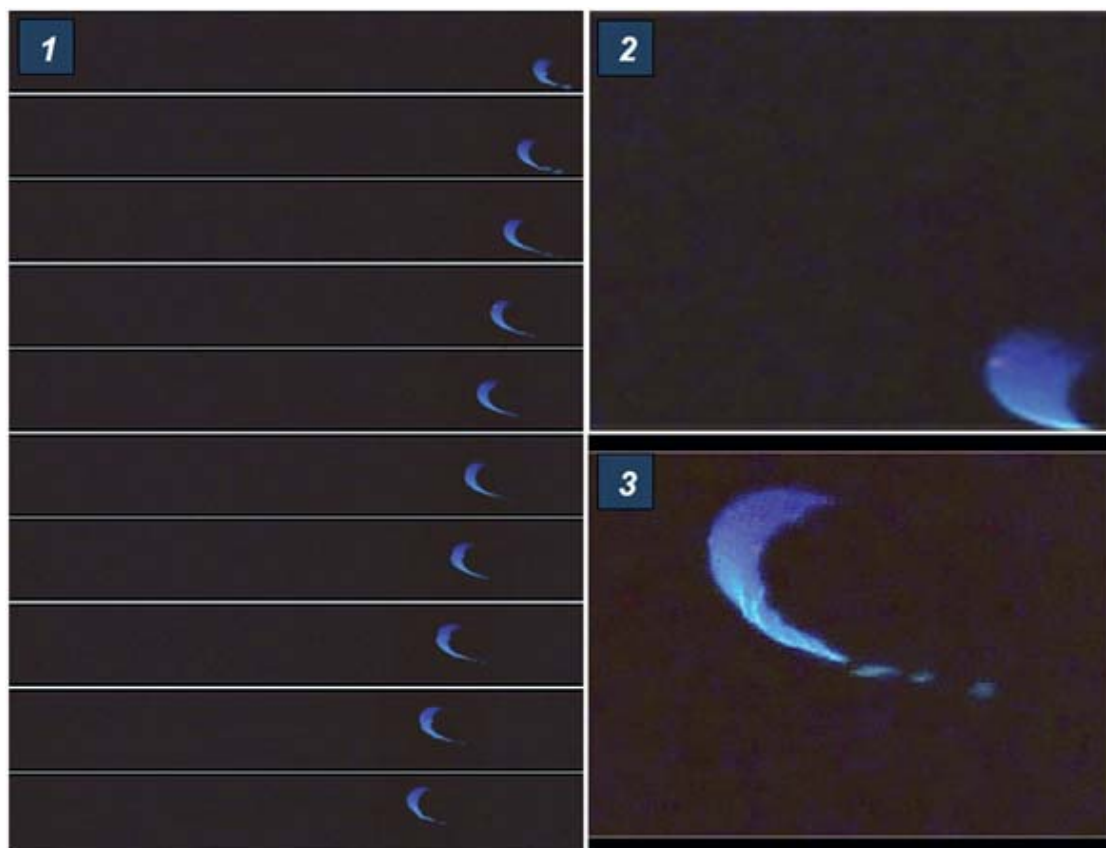


Рис. 3. Фрагменты из видеофильма эксперимента:
 1 – отдельные кадры пламени; 2 – начальный фрагмент пламени;
 3 – образование ячеек на фронте пламени
Примечание: составлено авторами.

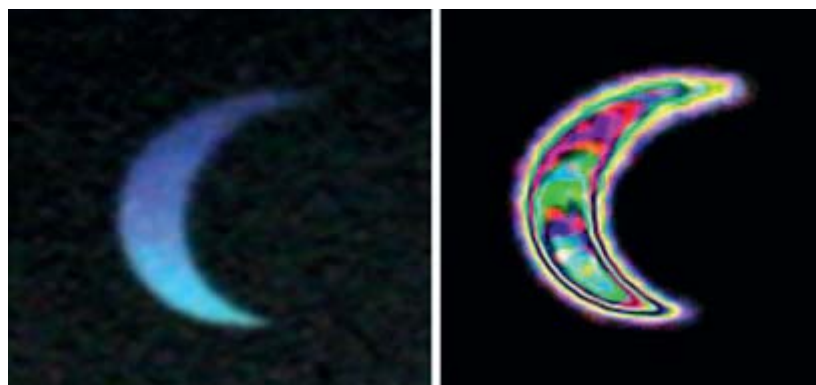


Рис. 4. Отдельный фотокадр пламени и его фотометрическое изображение
Примечание: составлено авторами.

деформируется, разделяясь на отдельные ячейки. Управление формой и скоростью фронта пламени можно осуществлять, изменяя время стратификации горючей смеси.

Получим уравнение поверхности, разделяющей стратифицированный слой газовой смеси при вытекании газа из открытого края вертикально расположенного плоско-

го канала. Покажем на рис. 5 траекторию пламени в канале относительно координат x и z . Так как скорость газа мала, то течение в канале потенциально.

Силы тяжести относительно координат x и z равны силам гидростатического давления в канале:

$$\text{grad}P(x,z) = \text{grad}U(x,z). \quad (1)$$

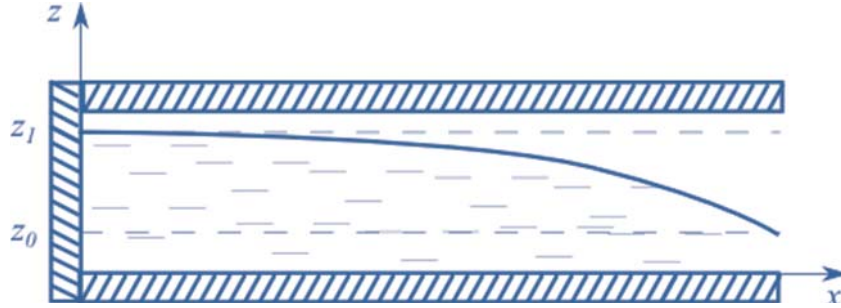


Рис. 5. Схема вытекания газа из открытой части плоского канала

Примечание: составлено авторами.

Давление определим из выражения:

$$P(x, z) = U(x, z) + P_0. \quad (2)$$

Зависимость потенциала $U(x, z)$ от координаты z :

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -(\rho - \rho_0)g, \quad (3)$$

где $(\rho - \rho_0) \cdot g$ – результирующая силы тяжести и силы Архимеда для элементарного объема газа;

ρ_0 – плотность воздуха;

ρ – плотность газозвоздушной смеси в канале;

g – ускорение свободного падения.

Из выражения (3) следует, что потенциал определяется как $U(z) = -(\rho - \rho_0) \cdot gz$. Поверхность раздела между легкой и тяжелой компонентами горючей смеси искривляется при вытекании газа из открытой части канала. Тогда зависимость $U(x, z)$ от координаты x найдем из условий:

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -\rho a \text{ и } U(x) = -\rho ax, \quad (4)$$

где a – ускорение газа в горизонтальном направлении.

Полный дифференциал потенциальной энергии будет равен:

$$dU = \frac{\partial U}{\partial x} dx + \frac{\partial U}{\partial z} dz = -(\rho - \rho_0)dzdz - \rho adx. \quad (5)$$

Из формул (3) и (4) получим выражение:

$$U(x, z) = -(\rho - \rho_0)gz - \rho ax. \quad (6)$$

Давление P определяется из (2) и (6):

$$P = P_0 - (\rho - \rho_0)gz - \rho ax. \quad (7)$$

Перепад давления ΔP с учетом начальных условий вдоль длины канала равен $\Delta P = P - P_0 = (\rho - \rho_0) \cdot gz_0$.

Запишем уравнение поверхности раздела между легкой и тяжелой компонентами газовой смеси:

$$z = z_0 - \frac{\rho}{\rho - \rho_0} \cdot \frac{a}{g} x. \quad (8)$$

Поверхность раздела представляет собой плоскость, имеющую определенный угол наклона относительно вертикали, который можно найти из формул:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\rho}{\rho - \rho_0} \cdot \frac{a}{g} x \text{ и } \operatorname{tg} \alpha = \frac{z_1 - z_0}{L}, \quad (9)$$

где L – расстояние вдоль длины канала;

z_1 и z_0 – вертикальные координаты поверхности внутри канала в поперечных сечениях, разделенных расстоянием x (рис. 5).

Из соотношений (7) и (8) следует выражение для ускорения (10), с которым двигался элементарный объем газа к открытой боковой стенке канала:

$$a = \frac{(z_1 - z_0) \cdot (\rho - \rho_0)g}{\rho L}. \quad (10)$$

Для нахождения уравнения поверхности, разделяющей стратифицированные слои газовой смеси открытого края канала, используем условие постоянства горизонтальной составляющей скорости газа u вдоль вертикального направления:

$$a = -A \frac{dz}{dx}, \quad (11)$$

где A – коэффициент пропорциональности, зависящий от расстояния между стенками канала и вязкости газа в смеси.

Объемный расход газа через поперечное сечение также постоянен на единице ширины канала, и он находится как:

$$q = u \cdot z. \quad (12)$$

Согласно формулам (11) и (12) объемный расход равен:

$$q = -Az \frac{dz}{dx}. \quad (13)$$

Интегрируя выражение (13), получим уравнение для стратифицированного слоя газовой смеси:

$$x = -\frac{A}{q}z^2 + C, \quad (14)$$

где константа C определяется из условия $z = z_0$ при $x = 0$.

Акустические колебания в канале могут быть связаны со стабильностью стратифицированного слоя горючего газа. На рис. 6 представлено изменение формы пламени, сфотографированного при открытом затворе фотокамеры в течение длительного времени. Фотография показывает колебания границы пламени в зависимости от его ширины и формы в плоском узком канале. Частота колебаний пламени, измеренная по кадрам из видеофильма, равна частоте 2,0 Гц.

Моделирование

Численное моделирование фронта пламени газовой смеси является важным инструментом для изучения процессов горения. Это позволяет исследовать сложные процессы, происходящие при горении, и разрабатывать новые методы управления пламенем, такие как подавление или ускорение горения [16–19].

Для моделирования химических реакций, процессов горения и получения данных о полях скоростей газа, температурах, давлениях и концентрациях компонентов продуктов горения в процессе формирования и распространения фронта пламени был использован «решатель» reactingFoam из пакета программ OpenFOAM.

На рис. 7 представлена расчетная область, соответствующая условиям плоского узкого канала, рассматриваемого в данном исследовании. Расчетная область имеет форму параллелепипеда размером 700 мм в длину, 300 мм в ширину и 5 мм в высоту.

Для моделирования применялась однородная ортогональная расчетная сетка. Размеры ячеек расчетной сетки составляли 0,5 мм в на-



Рис. 6. Фотография колебательного распространения пламени

Примечание: составлено авторами.

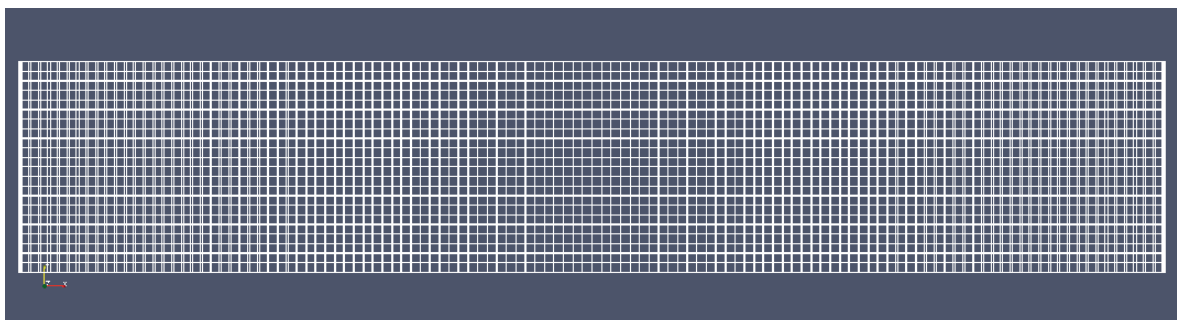


Рис. 7. Расчетная область плоского канала

Примечание: составлено авторами.

правлениях осей x и y и 0,1 мм для оси z . Общее количество ячеек в расчетной сетке было 1 050 000. Граничные условия соответствовали условиям закрытой стенки, за исключением правой границы параллелепипеда. На правой границе задавались условия открытой стенки моделируемого канала, сообщающегося с атмосферой.

Из-за ограничений вычислений по времени в данной работе был рассмотрен только одноступенчатый процесс окисления для пропана, а именно реакция вида: $C_3H_8 + 5O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$, также проводили моделирование для метановоздушных смесей.

Процесс формирования фронта пламени в стратифицированной смеси разделен на два этапа: создание неоднородного распределения компонентов пропановоздушной смеси в канале и зажигание смеси в точке, соответствующей концентрационным пределам воспламенения пропана в воздухе. Для создания стратифицированной смеси

в качестве начальных условий в канале использовалось равномерное распределение массовой доли C_3H_8 , когда канал заполнен чистым пропаном. Далее происходило истечение пропана из открытой боковой стенки и одновременное поступление воздуха с соответствующими массовыми долями O_2 и N_2 . В результате в канале формировалась граница раздела между пропаном и воздухом с концентрациями компонентов, соответствующими пределам распространения пламени. Рис. 8–9 иллюстрируют распространение фронта пламени в области с различными концентрациями метана и пропана в воздухе, где белыми линиями обозначена область концентраций, в которой может распространяться фронт пламени.

На рис. 10 представлено распределение концентрации пропана в канале в различные моменты времени в виде цветовых шкал.

С течением времени в канале происходит выход пропана из открытой стенки, что



Рис. 8. Последовательные положения фронта пламени стратифицированной метановоздушной смеси и моделирование процесса распространения пламени

Примечание: составлено авторами.

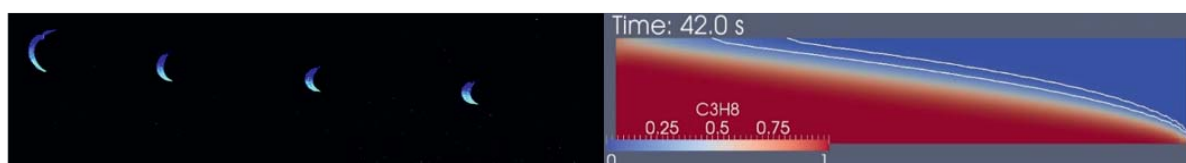


Рис. 9. Положение границы пламени в пропановоздушной смеси с течением времени и по результатам в OpenFOAM

Примечание: составлено авторами.

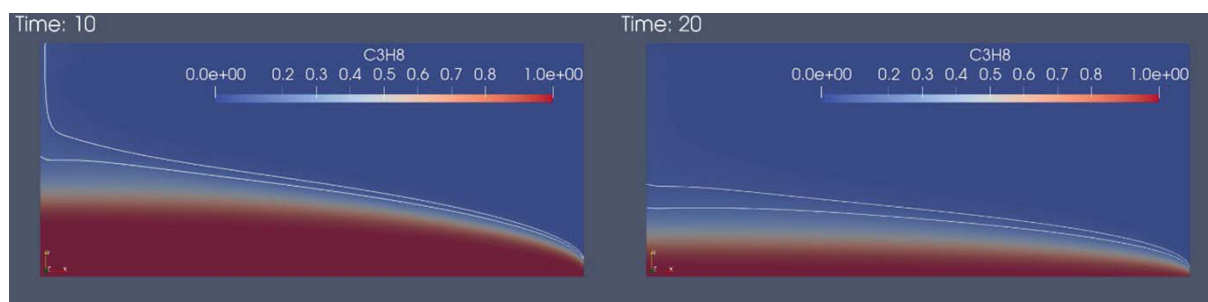


Рис. 10. Изменение распределения концентрации пропана при его истечении из канала

Примечание: составлено авторами.

приводит к образованию градиента концентрации, направленного от верхней границы канала к нижней. После получения необходимого распределения концентраций производится воспламенение смеси путем включения источника тепла (рис. 11).

На рис. 12 представлены распределения различных физических величин (темпе-

ратуры, концентрации компонентов и т.д.) в плоском канале, соответствующие одному и тому же моменту времени после воспламенения смеси.

Источник нагревает смесь до температуры, при которой начинается устойчивый процесс горения. В результате моделирования процесса истечения газа из канала образуется узкая

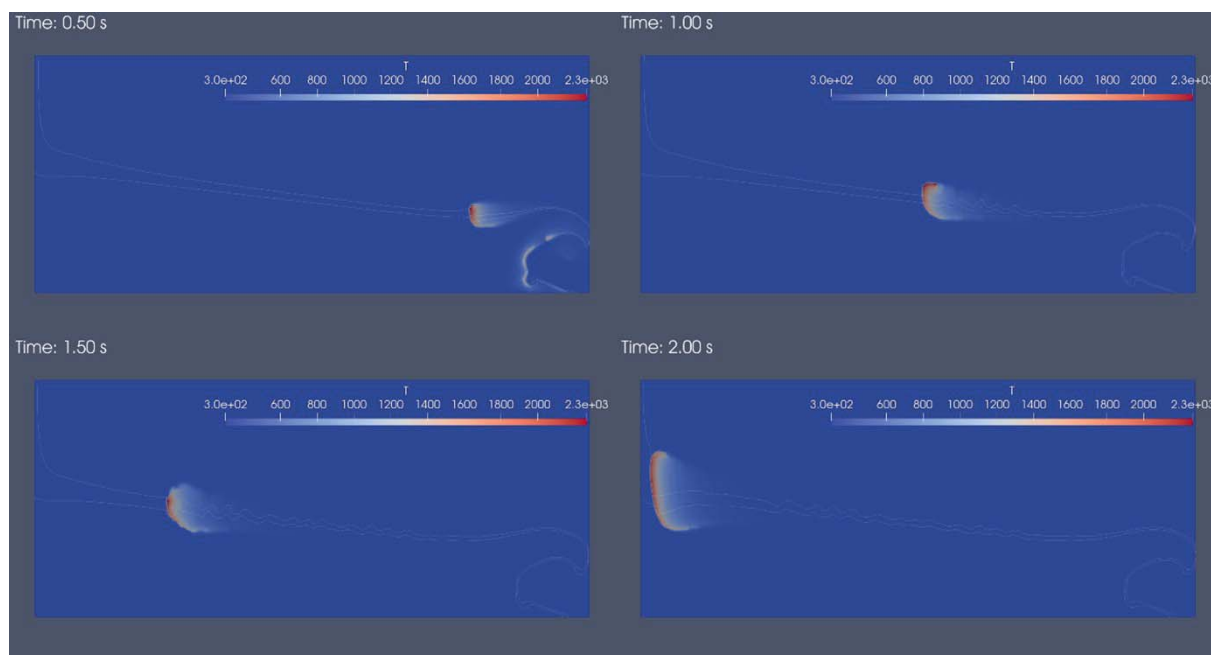


Рис. 11. Распределение температур в канале в различные моменты времени после воспламенения смеси
Примечание: составлено авторами.

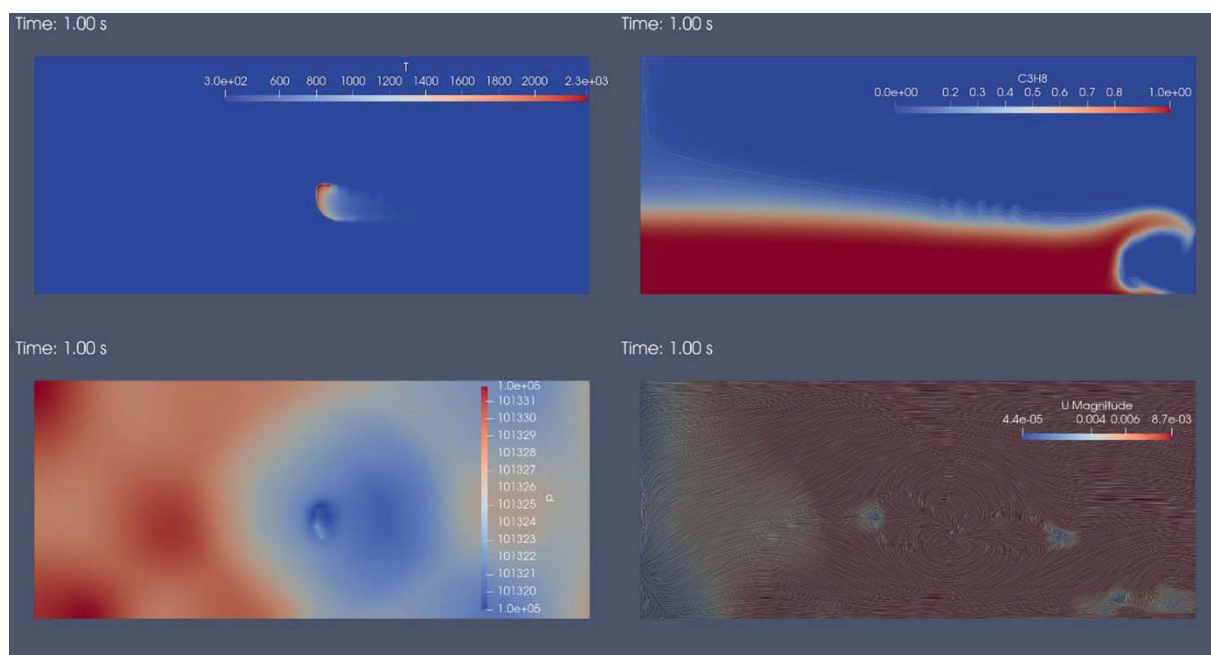


Рис. 12. Распределение температур, концентрации пропана, давления, скорости и линии тока в канале
Примечание: составлено авторами.

зона с концентрациями пропана и воздуха, в пределах которых происходит распространение пламени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе экспериментального исследования и моделирования, представленного в работе, выявлены закономерности изменения концентрации газа на границе с воздухом при его истечении из канала. Особое внимание уделено влиянию стратификации, разделению смеси под действием силы тяжести на газовые слои в канале с разной концентрацией. Установлено, что фронт пламени движется вдоль узкой области с концентрациями пропана и воздуха, а также для смеси с метаном в воздухе, которые соответствуют пределам распространения пламени. Ширину зоны распространения пламени в канале определяет начальный состав смеси и время ее стратификации. Вибрации фронта пламени происходят с частотой Вейсбаха – Брента, зависящей от параметров стратификации

смеси, геометрических характеристик канала и свойств самого пламени.

Из результатов моделирования следует, что траектория фронта пламени образует ту же форму, что и область, в которой возможно его распространение, зафиксированное в экспериментах.

Метод, представленный в этой работе, может использоваться для определения концентрационных полей в пространстве, в котором происходит утечка или подача газа. Показана возможность получения распределений газов в стратифицированном слое для различных параметров эксперимента без использования специальных методик и приборов, что упрощает проведение моделирования. Полученные результаты могут применяться для оптимизации процессов горения и предотвращения нежелательных выбросов тяжелых газов в атмосферу, при сканировании туннелей, шахт и нефтегазовых трубопроводов для обеспечения безопасности и предотвращения возможных пожаров и аварий.

Список источников

1. Жидков Д. А., Девисилов В. А. Вихревая технология стратификации газов для решения экологических вопросов в нефтегазовых и химических производствах (обзор) // Безопасность в техносфере. 2015. Т. 4, № 6. С. 63–78.
2. Lee M. J., Kim N. I. The stabilization of a methane-air edge flame within a mixing layer in a narrow channel // *Combustion and Flame*. 2010. Vol. 157, no. 1. P. 201–203. DOI 10.1016/j.combustflame.2009.09.019.
3. Мошкин Н. П., Фомина А. В., Черных Г. Г. Динамика цилиндрической зоны турбулентного смешения в продольном сдвиговом потоке линейно стратифицированной среды // Теплофизика и аэромеханика. 2019. Т. 26, № 1. С. 41–50.
4. Ju Y., Maruta K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research // *Progress in Energy and Combustion Science*. 2011. Vol. 37, no. 6. P. 669–715. DOI 10.1016/j.pecs.2011.03.001.
5. Burtsev S. A., Eletskiy I., Kochurov D. S. Gas stratification application in closed-cycle gas turbines // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2171, no. 1. P. 070007. DOI 10.1063/1.5133218.
6. Alekseev M. M., Smirnova I. V., Semenov O. Y. et al. Modeling edge flame propagation in a stratified fuel gas-air mixture // *Technical Physics Letters*. 2012. Vol. 38, no. 11. P. 1010–1012. DOI 10.1134/S106378501211017X.

References

1. Zhidkov D. A., Devisilov V. A. Vortex technology of gases stratification for solving ecological issues of oil, gas and chemical industries. *Safety in Technosphere*. 2015;4(6):63–78. (In Russ.).
2. Lee M. J., Kim N. I. The stabilization of a methane-air edge flame within a mixing layer in a narrow channel. *Combustion and Flame*. 2010;157(1):201–203. DOI 10.1016/j.combustflame.2009.09.019.
3. Moshkin N. P., Fomina A. V., Chernykh G. G. The dynamics of a cylindrical zone of turbulent mixing in a longitudinal shear flow of a linearly stratified medium. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2019;26(1):41–50. (In Russ.).
4. Ju Y., Maruta K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2011;37(6):669–715. DOI 10.1016/j.pecs.2011.03.001.
5. Burtsev S. A., Eletskiy I., Kochurov D. S. Gas stratification application in closed-cycle gas turbines. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2171(1):070007. DOI 10.1063/1.5133218.
6. Alekseev M. M., Smirnova I. V., Semenov O. Y. et al. Modeling edge flame propagation in a stratified fuel gas-air mixture. *Technical Physics Letters*. 2012;38(11):1010–1012. DOI 10.1134/S106378501211017X.

7. Качалина О. В., Ахметова Т. И. Определение углеводородных микропримесей в этилене полимеризационной чистоты хроматографическими методами // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 21. С. 39–42.
8. Belov M. L., Belov A. M., Gorodnichev V. A. et al. A laser control method for thin oil films on a water surface based on measurements of first-order and second-order derivatives of the reflection coefficient // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2011. Vol. 24, no. 7. P. 568–571.
9. Первухин П. А. Методы и приборы обнаружения утечек нефтепродуктов // Технологии техносферной безопасности. 2009. № 6. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_14868583_27783791.pdf (дата обращения: 12.04.2024).
10. Semenov O. Yu., Dyomko A. I. Liquid and gas optical flowmeter model development // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2141, no. 1. P. 050010. DOI 10.1063/1.5122153.
11. Бурцев С. А. Методика расчета устройств газодинамической температурной стратификации при течении реального газа // Тепловые процессы в технике. 2013. Т. 5, № 9. С. 386–390.
12. Bychkov V. V., Liberman M. A. Dynamics and stability of premixed flames // *Physics Reports*. 2000. Vol. 325, no. 4. P. 115–237. DOI 10.1016/S0370-1573(99)00081-2.
13. 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. DOI 10.1080/00102202.2018.1521394.
14. Moiseeva K. M., Krainov A. Yu., Krainov D. A. Numerical investigation on burning rate of propane-air mixture // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 696. P. 012011. DOI 10.1088/1757-899X/696/1/012011.
15. Лебедев В. С., Скопинцева О. В., Савельев Д. И. Исследование остаточной газонасыщенности угля при тепловом воздействии // Горный журнал. 2014. № 5. С. 20–22.
16. Жуков В. Т., Феодоритова О. Б., Новикова Н. Д. О методологии численного моделирования процессов горения в высокоскоростной камере сгорания на основе OpenFOAM // Математическое моделирование. 2018. Т. 30, № 8 С. 32–50. DOI 10.31857/S023408790001171-2.
17. Кононов Д. С., Гидаспов В. Ю., Стрижак С. В. Упрощенные кинетические модели горения метана для расширения возможностей пакета OpenFOAM и физико-химических библиотек // Труды Института системного программирования РАН. 2021. Т. 33, № 6. С. 229–240.
18. Yakush S. E., Semenov O. Yu., Alexeev M. M. Premixed propane-air flame propagation in a narrow
7. Kachalina O. V., Akhmetova T. I. Opredelenie uglevodorognykh mikroprimesei v etilene polimerizatsionnoi chistoty khromatograficheskimi metodami. *Herald of Technological University*. 2015;18(21):39–42. (In Russ.).
8. Belov M. L., Belov A. M., Gorodnichev V. A. et al. A laser control method for thin oil films on a water surface based on measurements of first-order and second-order derivatives of the reflection coefficient. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2011;24(7):568–571.
9. Pervukhin P. A. Methods and instruments of the finding drain of products of oils. *Technology of Technosphere Safety*. 2009;(6). URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_14868583_27783791.pdf (accessed: 12.04.2024). (In Russ.).
10. Semenov O. Yu., Dyomko A. I. Liquid and gas optical flowmeter model development. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2141(1):050010. DOI 10.1063/1.5122153.
11. Burtsev S. A. Metodika rascheta ustroystv gazodinamicheskoi temperaturnoi stratifikatsii pri techenii realnogo gaza. *Thermal Processes in Engineering*. 2013;5(9):386–390. (In Russ.).
12. Bychkov V. V., Liberman M. A. Dynamics and stability of premixed flames. *Physics Reports*. 2000;325(4):115–237. DOI 10.1016/S0370-1573(99)00081-2.
13. 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;191(7):1256–1275. DOI 10.1080/00102202.2018.1521394.
14. Moiseeva K. M., Krainov A. Yu., Krainov D. A. Numerical investigation on burning rate of propane-air mixture. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019;696:012011. DOI 10.1088/1757-899X/696/1/012011.
15. Lebedev V. S., Skopintseva O. V., Savelyev D. I. Issledovanie ostatochnoi gazonosnosti uglia pri teplovom vozdeistvii. *Gornyi zhurnal*. 2014;(5):20–22. (In Russ.).
16. Zhukov V. T., Feodoritova O. B., Novikova N. D. On a computational technique for simulation of scramjet combustor by means of OpenFOAM. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2018;30(8):32–50. DOI 10.31857/S023408790001171-2. (In Russ.).
17. Kononov D. S., Gidasпов V. Y., Strijhak S. V. Simplified kinetic models of methane combustion to expand the capabilities of the OpenFOAM package and physicochemical libraries. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2021;33(6):229–240. (In Russ.).
18. Yakush S. E., Semenov O. Yu., Alexeev M. M. Premixed propane-air flame propagation in a narrow channel with obstacles. *Energies*. 2023;16(3):1516. DOI 10.3390/en16031516.

- channel with obstacles // *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 3. P. 1516. DOI 10.3390/en16031516.
19. Пашченко Д. И. CFD-моделирование горения синтетического топлива систем термохимической регенерации тепла // *Физика горения и взрыва*. 2018. Т. 54, № 6. С. 50–58. DOI 10.15372/FGV20180606.
19. Pashchenko D. I. Computational fluid dynamics modeling of combustion of synthetic fuel of thermochemical heat recuperation systems. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2018;54(6):50–58. DOI 10.15372/FGV20180606. (In Russ.).

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), Docent.

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