

УДК 520.33,536.46,53.08

© М. М. Алексеев, О. Ю. Семенов, С. А. Рашковский, С. Е. Якуш, 2025

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ХЕЛЕ-ШОУ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАМИНАРНЫХ ЯЧЕИСТЫХ ПЛАМЕН

Описана экспериментальная установка для изучения процесса распространения пламени метано- и пропано-воздушных смесей с водородом в канале Хеле-Шоу. Установка была собрана в лабораторных условиях и представляет собой канал из двух параллельных стеклянных пластин с перегородками, установленными между ними, которые образуют трапециевидный плоский диффузор. Проведена визуализация фронта пламени между прозрачными пластинами канала, позволившая обнаружить изменения формы и структуры фронта пламени, обусловленные гидродинамическими и теплодиффузионными факторами.

Ключевые слова: гидродинамика, газовая смесь с водородом, визуализация, канал Хеле-Шоу, фронт пламени, плоский диффузор, скоростная видеосъемка, приборы для исследования горения

EDN: YCPOYW

ВВЕДЕНИЕ

Изучение закономерностей распространения фронта пламени в плоских каналах имеет фундаментальное и прикладное значение для понимания и прогнозирования его поведения в различных технических устройствах и системах, таких как двигатели внутреннего сгорания, турбины, реактивные двигатели и газовые горелки. Особенно важным является выявление новых характеристик фронта пламени при его взаимодействии со стенками плоских каналов для различных концентраций газовых смесей, влияющих на эффективность горения углеводородных топлив.

Среди наиболее известных работ в этой области можно выделить исследования, проведенные такими учеными, как Д.А. Франк-Каменецкий, Г.И. Баренблатт, Я.Б. Зельдович, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе, и др. [1–8]. Они разработали математические модели и численные методы, которые позволяют проводить расчеты и прогнозирование распространения пламени с учетом различных факторов, таких как геометрия канала, свойства горючих смесей, условия теплообмена.

В исследовании [9] предложены временные и стехиометрические скейлинговые соотношения, которые описывают топологию и характеристики динамики ультрабедных водородо-воздушных пламен, свободно распространяющихся в горизонтальной цилиндрической ячейке Хеле-Шоу. Авторами работ [10, 11] получены уравнения, описывающие динамику фронта пламени в условиях неустойчивости Дарье–Ландау, и построены точные аналитические решения эволюции поверхности возмущенного пламени.

В работе [12] были изучены следующие аспекты: зависимость видимой скорости ячеистых пламен для смесей пропана с воздухом от высоты канала Хеле-Шоу, эволюция ячеистой структуры фронта пламени во времени и влияние расположения точки зажигания на морфологию пропано-воздушных пламен.

В работах [13, 14] описываются экспериментальные установки для изучения распространения пламени в плоских горизонтальных каналах. Эксперименты выявили два различных режима распространения пламени в зависимости от коэффициента избытка горючего в газовых смесях как следствие связи между скоростью тепловыделения и акустическими волнами. В работах [15–17], посвященных моделированию распространения пламени в каналах Хеле-Шоу, проведен анализ процесса горения в узких каналах в различных условиях. В рамках этих исследований проводятся экспериментальные работы, используются математические модели и численные методы для описания процессов теплообмена, диффузии и химических реакций, которые происходят при горении.

Для получения более точных данных о скорости распространения пламени, тепловых потерях и других параметрах, влияющих на эффективность и безопасность работы газовых устройств, имеющих камеры сгорания малых размеров, требуются дополнительные исследования.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В статье описана установка, собранная в лабораторных условиях для изучения распространения

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ХЕЛЕ-ШОУ

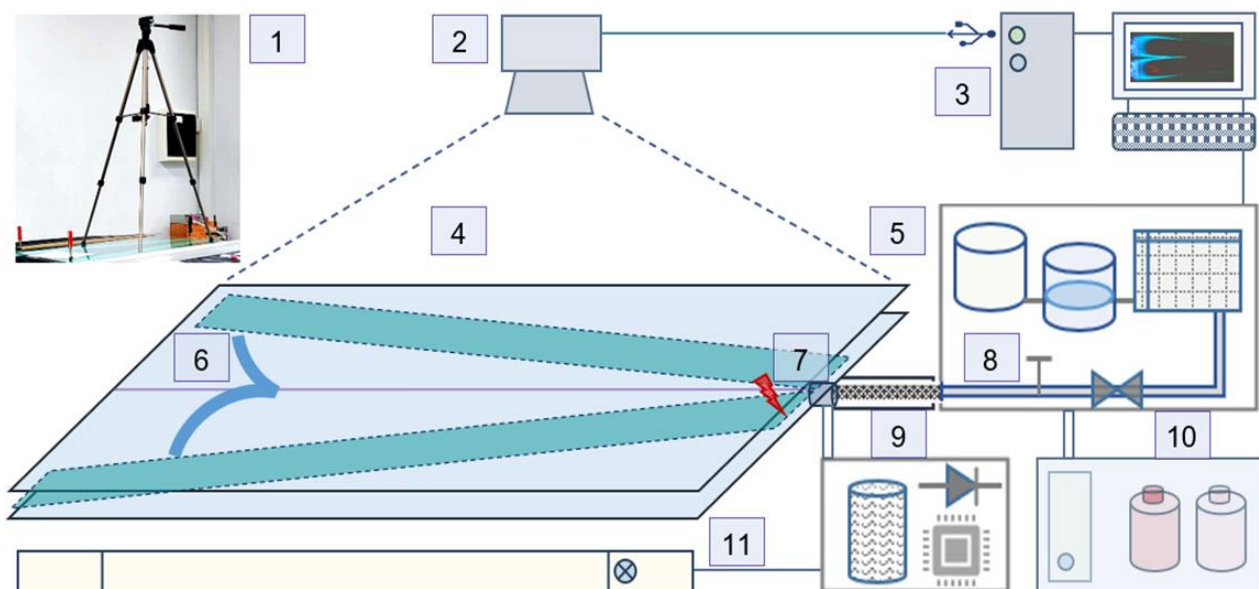


Рис. 1. Экспериментальная установка.

1 — фотографический снимок лабораторной установки; 6 — фронт пламени; состав лабораторной установки: цифровая видеокамера (2), персональный компьютер (3), прозрачные стеклянные пластины с перегородками (4), газометр с расходомером (5), система зажигания газа с пламегасителем (7), трубка с газовым краном (8), катушка зажигания с источником напряжения (9), газовые баллоны пропан/метан и генератор водорода (10), лампа дополнительного освещения канала (11)

пламени в узком канале Хеле-Шоу. На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки с ее фотографией в лаборатории (1).

Центральным элементом установки являлся плоский канал, состоящий из двух прямоугольных прозрачных стеклянных пластин из материала — флоат-стекло ГОСТ 111-90 (4). Пластины размерами $100 \times 120 \times 0,6$ см располагались параллельно друг другу, между ними находились перегородки из технического цветного оргстекла ГОСТ 17622-72 и ГОСТ 10667-90с защитной пленкой, расположенные под углом друг к другу и формирующие канал для распространения пламени. Таким образом, канал имел форму трапеции и представлял собой плоский диффузор (4).

Длина плоского расширяющегося канала составляла 1,2 м, меньшая сторона трапеции (узкое сечение канала) имела ширину 0,02 м, а ширина большей стороны определялась углом раскрытия канала (углом между внутренними боковыми стенками канала), который мог изменяться от 0° до 25° (в экспериментах этот угол составлял 5° , 10° , 15° , 20° и 25°). Высота канала (расстояние между стеклянными пластинами) менялась от 3 мм до 6 мм с шагом 0,5 мм. Стеклянные пластины фиксировались винтовыми металлическими зажи-

мами, они были необходимы для создания и контроля герметичности канала с целью предотвращения утечки газовой смеси и проникновения воздуха.

Для обеспечения одинаковой высоты канала по его ширине и длине, а также минимизации прогиба стеклянных пластин под действием собственного веса использовались несколько технических решений и контролируемых методов. Установка была смонтирована на прочном лабораторном столе, который обеспечивал жесткость конструкции и минимизировал возможные колебания, что способствовало поддержанию устойчивого положения стекол и уменьшению вероятности их прогиба. Проверку горизонтальности установки производили многократно с помощью пузырькового уровня на нескольких участках стеклянных пластин. Правильная регулировка лабораторного стола и положения канала на нем обеспечивала точность экспериментов и предотвращала возможные ошибки в измерениях.

Для контроля геометрических размеров канала использовались штангенциркули ГОСТ 166-89, позволяющие измерить высоту перегородок в различных точках вдоль их длины. Погрешность измерений по основной шкале для штангенциркулей

1 класса точности составляла 0.05 мм. Это обеспечивало точность и равномерность на протяжении всей длины и ширины в канале. Используя набор из различных по толщине плоских перегородок можно было устанавливать требуемую высоту канала в диапазоне от 1 мм до 20 мм. Допуски на высоту канала составляли ± 0.05 мм, что было приемлемо для достижения воспроизводимости результатов и обеспечения точности измерений. Допуски позволяли контролировать и минимизировать влияние параметров канала на распространение фронта пламени.

Для точного определения значения усилия сжатия, создаваемых зажимами стеклянных пластин в экспериментальной установке, учитывали несколько факторов, таких как конструктивные особенности и материал, из которого изготовлены ее элементы. Зажимы винтового типа, связанные усилия которых могут меняться от 50 Н до 200 Н, обеспечивали лучшее уплотнение, и общее усилие сжатия стеклянных пластин от четырех зажимов составляло 480 Н. В результате применения указанных методов установка обеспечивала стабильное функционирование и высокую степень повторяемости экспериментов, что критически важно для анализа процессов горения в узком канале.

В экспериментах применяли пропано-воздушные смеси (4.5% пропана в воздухе) и метано-воздушные смеси с концентрацией 9.5%, которые готовили в газометре вытеснения (5) с водой, состоящем из двух резервуаров — открытого (для воздуха) и закрытого (для газовой смеси), пропан и метан подавали из газовых баллонов.

Водород производили методом разложения дистиллированной воды генератором 6.140 Хроматэк, имеющим четыре ступени очистки: сепаратор, осушители капельной влаги, фильтры с молекулярными ситами и каталитический реактор, исключающий возможность присутствия примеси кислорода и выброса влаги в газовые линии (10). Погрешность приготовления газовых смесей с помощью газометра вытеснения составляла 0.4%.

Вода в лабораторном газометре заполняла нижнюю часть закрытого резервуара, и газ подавался сверху, вытесняя воду, это позволяло контролировать объем газовой смеси, т.к. количество вытесненной воды равно объему смеси. Обеспечение однородности получаемой газовой смеси происходило с помощью диффузионного перемешивания внутри резервуара газометра. Перед началом работы с каналом выходной газовый шланг газометра был закрыт для предотвращения утечки газа. Газометр обеспечивал точность и контроль за различными параметрами смеси газов в процессе их подготовки.

Объем подаваемой газовой смеси между пластинами измерялся с точностью $\pm 1.5\%$ с помощью

расходомера газа РГС-2 (8) и составлял пять внутренних объемов канала для полного заполнения ячейки Хеле-Шоу. Канал заполняли горючей смесью со средней скоростью ее подачи 2.5–3.5 л/мин. Процесс заполнения осуществлялся с помощью газового крана через трубку-шланг ПВХ ГОСТ 19034-82, расположенную в узком сечении канала-диффузора, которое было закрыто, а противоположное — открыто. Для предотвращения обратного хода пламени, применялся пламегаситель — стальная трубка с мелкой металлической проволокой установленная в системе подачи газовой смеси (7).

В зависимости от условий опытов зажигание смеси происходило сразу после открытия выходного сечения канала или после истечения времени задержки воспламенения от 15 до 45 с. После заполнения канала краткое время ожидания дает эффект стабилизации, что позволяло горючей смеси равномерно распределяться и достигать однородного состояния перед зажиганием.

Зажигание смеси выполняли от высоковольтной искры между электродами индукционной катушки зажигания (9), подключенной к источнику питания с помощью электрических медных проводов в изоляционной оболочке ПВХ. Катушка зажигания преобразовывала постоянный ток низкого напряжения 12 В, поступающий от источника, в короткий электрический импульс с напряжением до 34 000 В. Этот импульс затем подавался на два электрода, расстояние между которыми варьировалось от 2 до 15 мм в зависимости от условий эксперимента. Дополнительный источник света (11) освещал канал и фронт пламени (6) рядом с пластинами установки и позволял выполнять более качественную видеосъемку процесса горения газовых смесей в плоском диффузоре.

Для детального изучения формирования и движения фронта пламени в плоском канале применяли видеосъемку с частотой 240 кадров в секунду цифровой видеокамерой GoPro HERO12 (2), установленную над прозрачной верхней пластиной на стационарном штативе. Регулировочный механизм штатива для установки горизонтального уровня видеокамеры позволял настроить ее параллельно плоскости канала.

Улучшенная стабилизация HyperSmooth 6.0 видеокамеры GoPro 12 и цифровая матрица 1×CMOS с высоким разрешением 27 Мр позволяла работать с максимально возможным по ширине углом обзора. Оптический объектив Max HyperView обеспечивал угол обзора до 177°. Управление видеокамерой производилось дистанционно по Bluetooth с помощью приложения GoPro App, установленного на планшет, что позволяло просматривать фотографии и видео после проведенного эксперимента.

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ХЕЛЕ-ШОУ

Видеозапись производили на карту памяти microSD, с которой после передавали файлы видеофильмов экспериментов на компьютер (3). Для обработки полученных экспериментальных видео применяли алгоритмы компьютерного зрения, фильтры уменьшения шума в изображении, коррекции яркости и контрастности, обеспечивая более четкие отображения деталей фронта пламени в канале.

Плоская геометрия канала Хеле-Шоу способствовала образованию квазидвумерного фронта пламени, что позволяло визуализировать его развитие более подробно по сравнению с трехмерными конфигурациями и далее анализировать особенности его распространения.

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследование процесса горения газовых смесей пропана и метана с воздухом проводилось с применением методов визуализации фронта пламени и высокоскоростной цифровой фото- и видеосъемки с последующей компьютерной обработкой. Анализ данных, собранных в разных условиях эксперимента, позволял определить ключевые параметры, влияющие на топологию пламени и скорость его распространения.

На рис. 2, а, и 2, б, показано распространение фронта пламени метано- и пропано-воздушной смеси, движущегося от закрытого узкого края к открытому широкому краю диффузора при расстоянии между пластинками 6 мм и угле раскрытия канала 25° .

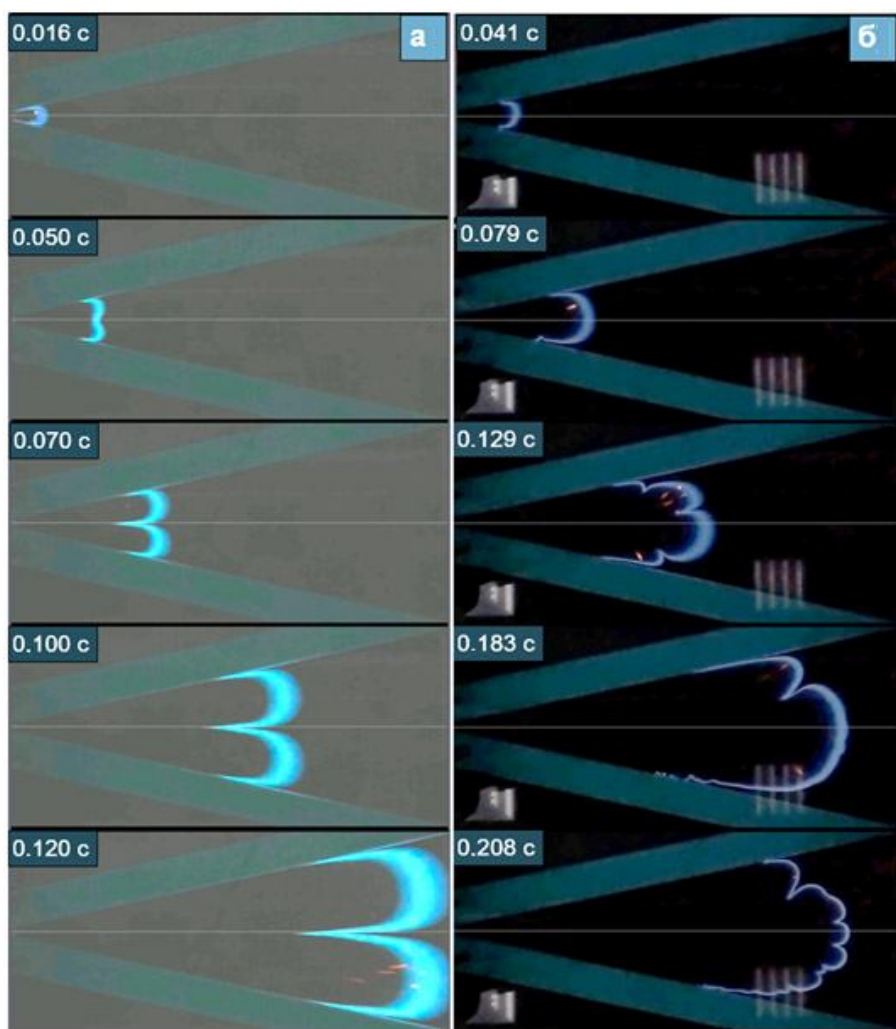


Рис. 2. Характерные кадры видеосъемки фронта пламени при распространении в канале Хеле-Шоу.

а — пропано-воздушная смесь; б — метано-воздушная смесь; высота канала 6 мм, угол раскрытия 25°

Серия фотографий для различных временных промежутков, собранных на одном изображении, позволяет оценить изменение формы и структуры фронта пламени, установить количество ячеек, образующихся на нем, и определить скорости распространения разных газовых пламен. Визуализация горения метано-воздушной смеси с водородом представлена на рис. 3, а, и 3, б. Эксперименты с метано-воздушными смесями с добавкой водорода проводились для стехиометрической смеси (коэффициент избытка топлива $\phi = 1$) с объемной долей водорода 25% и 50% от общего объема топлива (объем метана с водородом) для канала высотой 3.5 мм с углом раскрытия диффузора 25° .

В канале при горении смеси была замечена изменчивость структуры и формы фронта пламени, формирование ячеистых складок на поверхности, приводившее к его деформации. В экспериментах были определены расстояния между стеклянными пластинами, при которых возможно воспламенение смеси и устойчивое распространение пламени в узком плоском расширяющемся канале.

Установлено, что при увеличении расстояния между пластинами скорость распространения пламени увеличивалась и приближалась к значениям при ламинарном горении, угол раскрытия диффузора также влиял на особенности распространения фронта пламени, ускоряя его при увеличении угла.

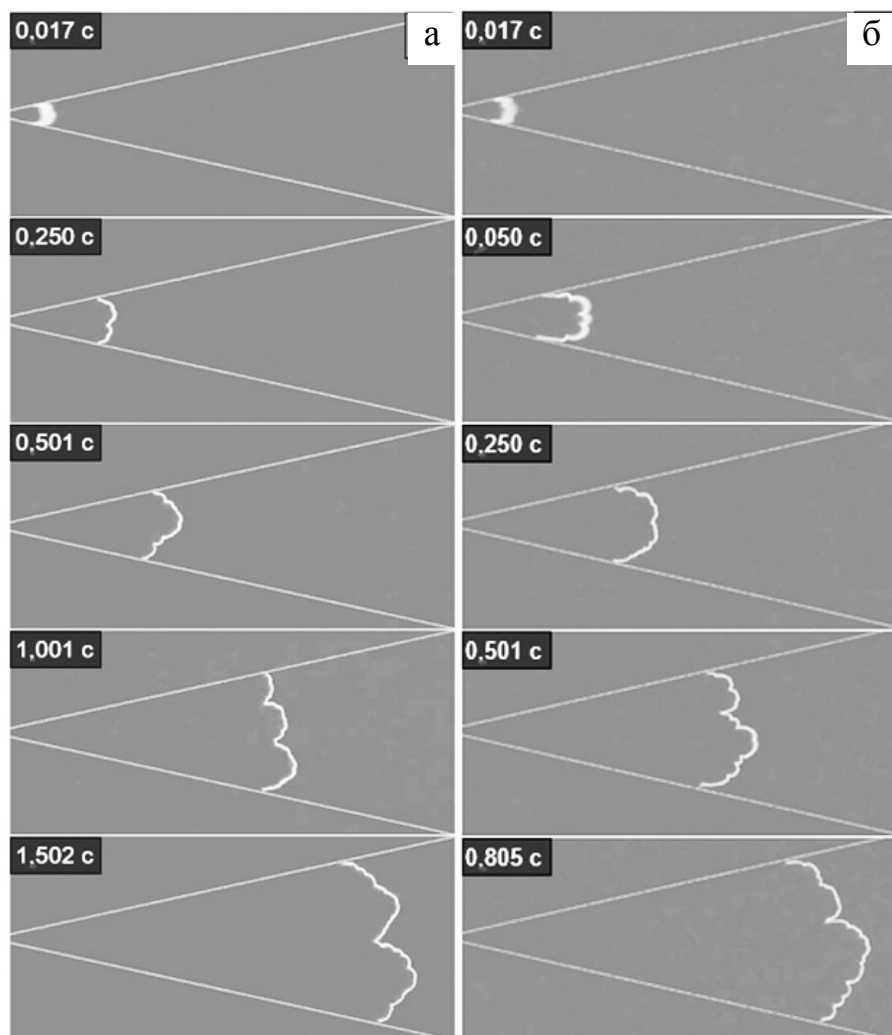


Рис. 3. Фотокадры распространения фронта пламени метано-водородно-воздушной смеси.

Концентрация газов: а — 25% водорода и 75% метана с воздухом, б — 50% водорода и 50% метана с воздухом; в диффузоре для угла 25° высотой 3.5 мм

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ХЕЛЕ-ШОУ

Эксперименты выявили взаимосвязь между скоростью движения фронта пламени и геометрией канала. Локальная скорость пламени зависела от радиуса кривизны и скорости расширения пламени на отдельных участках при его движении от закрытого к открытому краю канала. Во время распространения фронта от узкого закрытого края к открытому были обнаружены колебания пламени вдоль продольной оси с малой амплитудой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новая экспериментальная установка с плоским горизонтальным каналом Хеле-Шоу позволяет детально изучать квазидвумерное распространение пламени в узких каналах, его топологию, неустойчивость, определять скорости распространения фронта пламени, количество ячеек на его поверхности для газовых смесей с различными концентрациями горючего, что требуется для оценки влияния гидродинамических и теплодиффузионных процессов на неустойчивость пламени. Установка позволяет исследовать горение как традиционных углеводородных газов, так и их смесей с водородом.

Изучение закономерностей распространения пламени — важное направление научных исследований, способствующее развитию энергетики и повышению уровня безопасности при эксплуатации различных горелочных устройств.

Грантовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, Соглашение от 24.04.2024 № 075-15-2024-543.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике: учебник-монография. 4-е изд. Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2008. 408 с.
2. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 2000. 478 с.
3. Басевич В.Я., Беляев А.А., Фролов С.М., Фролов Ф.С. Прямое численное моделирование турбулентного горения водородно-воздушных смесей разного состава в двумерном приближении // Химическая физика. 2019. Т. 38, № 1. С. 27–37. DOI: 10.1134/S0207401X19010047
4. Раиковский С.А. Иерархическая модель турбулентного пламени в предварительно перемешанной газовой смеси // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16, № 3. С. 1–13. URL: <https://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-3/articles/578/>
5. Alexeev M.M., Semenov O.Y., Yakush S.E. Experimental study on cellular premixed propane flames in a narrow gap between parallel plates // Combust. Sci. Technol. 2018. Vol. 191, iss. 7. P. 1256–1275. DOI: 10.1080/00102202.2018.1521394
6. Fernandez-Galisteo D., Kurdyumov V.N., Ronney P.D. Analysis of premixed flame propagation between two closely-spaced parallel plates // Combustion and Flame. 2018. Vol. 190. P. 133–145. DOI: 10.1016/j.combustflame.2017.11.022
7. Bychkov V.V., Liberman M.A. Dynamics and stability of premixed flames // Phys. Rep. 2000. Vol. 325, iss. 4-5. P. 115–237. DOI: 10.1016/S0370-1573(99)00081-2
8. Ju Y., Maruta K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research // Prog. Energy Combust. Sci. 2011. Vol. 37, iss. 6. P. 669–715. DOI: 10.1016/j.pecs.2011.03.001
9. Москалева П.В., Денисенко В.П., Кириллов И.А. Классификация и динамика ультрабыстрых водородовоздушных пламен в горизонтальных цилиндрических ячейках Хеле-Шоу // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2023. Т. 164, вып. 1. С. 117–128. DOI: 10.31857/S0044451023070118
10. Sivashinsky G.I., Clavin P. On the nonlinear theory of hydrodynamic instability in flames // J. Phys. France. 1987. Vol. 48, no. 2. P. 193–198. DOI: 10.1051/jphys:01987004802019300
11. Minaev S.S., Pirogov E.A., Sharypov O.V. A nonlinear model for hydrodynamic instability of an expanding flame // Combustion, Explosion and Shock Waves. 1996. Vol. 32. P. 481–488. DOI: 10.1007/BF01998569
12. Sarraf E.A., Almarcha C., Quinard J., Radisson B., Denet B. Quantitative analysis of flame instabilities in a Hele-Shaw burner // Flow, Turbulence and Combustion. 2018. Vol. 101. P. 851–868. DOI: 10.1007/s10494-018-9940-4
13. Алексеев М.М., Семенов О.Ю. Экспериментальная установка для изучения пламени // Приборы и техника эксперимента. 2024. № 1. С. 208–210. DOI: 10.31857/S0032816224010292
14. Veiga-Lopez F., Martinez-Ruiz D., Fernandez-Tarrazo E., Sanchez-Sanz M. Experimental analysis of oscillatory premixed flames in a Hele-Shaw cell propagating towards a closed end // Combustion and Flame. 2019. Vol. 201. P. 1–11. DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.12.005
15. Jang H.J., Jang G.M., Kim N.I. Unsteady propagation of premixed methane/propane flames in a mesoscale disk burner of variable-gaps // Proc. Combust. Inst. 2019. Vol. 37, iss. 2. P. 1861–1868. DOI: 10.1016/j.proci.2018.06.112

16. Yakush S.E., Semenov O.Yu., Alexeev M.M. Premixed propane-air flame propagation in a narrow channel with obstacles // *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 3. Id. 1516. DOI: 10.3390/en16031516
17. Matalon M. Intrinsic flame instabilities in premixed and nonpremixed combustion // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2007. Vol. 39. P. 163–191. DOI: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092153

Сургутский государственный университет: Политехнический институт, г. Сургут (Алексеев М.М., Семенов О.Ю.)

Контакты: Семенов Олег Юрьевич,
phys7sou@mail.ru

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва (Рашиковский С.А., Якуш С.Е.)

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск (Рашиковский С.А.)

Материал поступил в редакцию 30.10.2024

HORIZONTAL HELE-SHOW INSTALLATION FOR RESEARCHING LAMINAR CELLULAR FLAMES

M. M. Alekseev¹, O. Yu. Semenov¹, S. A. Rashkovsky^{2,3}, S. E. Yakush²

¹*Surgut State University, Polytechnic Institute, Surgut, Russia*

²*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of RAS, Moscow, Russia*

³*Kutateladze Institute of Thermophysics of RAS, Novosibirsk, Russia*

An experimental setup for studying the flame propagation of methane and propane-air mixtures with hydrogen in the Hele-Shaw channel is described. The setup was assembled in laboratory conditions and is a channel of two parallel glass plates with partitions installed between them, which form a trapezoidal flat diffuser. Visualization of the flame front between the transparent plates of the channel was carried out, which made it possible to detect changes in the shape and structure of the flame front due to hydrodynamic and heat diffusion factors.

Keywords: hydrodynamics, gas mixture with hydrogen, visualization, Hele-Shaw channel, flame front, flat diffuser, high-speed video filming, combustion research devices

REFERENCES

1. Frank-Kamenetskii D.A. *Osnovy makrokinetiki. Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoi kinetike: uchebno-monografiya. 4-e izd.* [Fundamentals of macrokinetics. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics: textbook-monograph. 4th ed.]. Dolgoprudny, Izdatel'skii Dom "Intellekt" Publ., 2008. 408 p. (In Russ.).
2. Zel'dovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. *Matematicheskaya teoriya goreniya i vzryva.* [Mathematical theory of combustion and explosion]. Moscow, Nauka Publ., 2000. 478 p. (In Russ.).
3. Basevich V.Y., Belyaev A.A., Frolov S.M., Frolov F.S. [Direct numerical simulation of turbulent combustion of hydrogen-air mixtures of various compositions in a two-dimensional approximation]. *Khimicheskaya fizika* [Russian Journal of Physical Chemistry B], 2019, vol. 38, no. 1, pp. 27–37. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0207401X19010047
4. Rashkovskiy S.A. [Hierarchical model of premixed turbulent flame]. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoi dinamike* [Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics], 2015, vol. 16, no. 3, pp. 1–13. (In Russ.). URL: <https://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-3/articles/578/>

ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ХЕЛЕ-ШОУ

5. Alexeev M.M., Semenov O.Y., Yakush S.E. Experimental study on cellular premixed propane flames in a narrow gap between parallel plates. *Combust. Sci. Technol.*, 2018, vol. 191, iss. 7, pp. 1256–1275. DOI: 10.1080/00102202.2018.1521394
6. Fernandez-Galisteo D., Kurdyumov V.N., Ronney P.D. Analysis of premixed flame propagation between two closely-spaced parallel plates. *Combustion and Flame*, 2018, vol. 190, pp. 133–145. DOI: 10.1016/j.combustflame.2017.11.022
7. Bychkov V.V., Liberman M.A. Dynamics and stability of premixed flames. *Phys. Rep.*, 2000, vol. 325, iss. 4-5, pp. 115–237. DOI: 10.1016/S0370-1573(99)00081-2
8. Ju Y., Maruta K. Microscale combustion: Technology development and fundamental research. *Prog. Energy Combust. Sci.*, 2011, vol. 37, iss. 6, pp. 669–715. DOI: 10.1016/j.peecs.2011.03.001
9. Moskalev P.V., Denisenko V.P., Kirillov I.A. [Classification and dynamics of ultralean hydrogen–air flames in horizontal cylindrical Hele–Shaw cells]. *Žurnal eksperimental'noj i teoretičeskoj fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 2023, vol. 164, iss. 1, pp 117–128. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0044451023070118
10. Sivashinsky G.I., Clavin P. On the nonlinear theory of hydrodynamic instability in flames. *J. Phys. France*, 1987, vol. 48, no. 2, pp. 193–198. DOI: 10.1051/jphys:01987004802019300
11. Minaev S.S., Pirogov E.A., Sharypov O.V. A nonlinear model for hydrodynamic instability of an expanding flame. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1996, vol. 32, pp. 481–488. DOI: 10.1007/BF01998569
12. Sarraf E.A.I., Almarcha C., Quinard J., Radisson B., Denet B. Quantitative analysis of flame instabilities in a Hele–Shaw burner. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2018, vol. 101, pp. 851–868. DOI: 10.1007/s10494-018-9940-4
13. Alekseev M.M., Semyonov O.Yu. [Experimental setup for flame study]. *Pribory i tehnika èksperimenta* [Instrumentation and experimental techniques], 2024, no. 1, pp. 208–210. (In Russ.). DOI: 10.31857/S0032816224010292
14. Veiga-Lopez F., Martinez-Ruiz D., Fernandez-Tarrazo E., Sanchez-Sanz M. Experimental analysis of oscillatory premixed flames in a Hele–Shaw cell propagating towards a closed end. *Combustion and Flame*, 2019, vol. 201, pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.combustflame.2018.12.005
15. Jang H.J., Jang G.M., Kim N.I. Unsteady propagation of premixed methane/propane flames in a mesoscale disk burner of variable-gaps. *Proc. Combust. Inst.*, 2019, vol. 37, iss. 2, pp. 1861–1868. DOI: 10.1016/j.proci.2018.06.112
16. Yakush S.E., Semenov O.Yu., Alexeev M.M. Premixed propane-air flame propagation in a narrow channel with obstacles. *Energies*, 2023, vol. 16, iss. 3, Id. 1516. DOI: 10.3390/en16031516
17. Matalon M. Intrinsic flame instabilities in premixed and nonpremixed combustion. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2007, vol. 39, pp. 163–191. DOI: 10.1146/annurev.fluid.38.050304.092153

Contacts: *Semenov Oleg Yur'evich*,
phys7sou@mail.ru

Article received by the editorial office on 30.10.2024

INTRODUCTION

The study of flame front propagation patterns in flat channels is of fundamental and applied importance for understanding and predicting its behavior in various technical devices and systems, such as internal combustion engines, turbines, jet engines, and gas burners. Of particular importance is the identification of new flame front characteristics during its interaction with flat channel walls for different concentrations of gas mixtures that affect the combustion efficiency of hydrocarbon fuels.

Among the most well-known works in this area are the studies conducted by such scientists as D.A. Frank-Kamenetsky, G.I. Barenblatt, Ya.B. Zeldovich, V.B. Librovich, G.M. Makhviladze, and others [1–8]. They developed mathematical models and numerical methods that allow calculations and predictions of flame propagation, taking into account various factors, such as channel geometry, properties of combustible mixtures, and heat exchange conditions.

The study [9] proposed time and stoichiometric scaling relationships that describe the topology and characteristics of the dynamics of ultra-lean hydrogen-air flames freely propagating in a horizontal cylindrical Hele-Shaw cell. The authors of [10, 11] obtained equations describing the dynamics of the flame front under Darrieus – Landau instability conditions and constructed exact analytical solutions for the evolution of the surface of a disturbed flame.

In [12] the following aspects were studied: dependence of the apparent velocity of cellular flames for propane-air mixtures on the height of the Hele-Shaw channel, evolution of the cellular structure of the flame front over time, and the influence of the ignition point location on the morphology of propane-air flames.

In [13, 14] experimental setups for studying flame propagation in flat horizontal channels are described. The experiments revealed two different flame propagation modes depending on the excess fuel coefficient in gas mixtures as a consequence of the relationship between the heat release rate and acoustic waves. In [15–17], devoted to modeling flame propagation in Hele-Shaw channels, an analysis of the combustion process in narrow channels under various conditions was carried out. Within the framework of these studies, experimental work is carried out, and mathematical models and numerical methods are used to describe the processes of heat exchange, diffusion, and chemical reactions that occur during combustion.

To obtain more accurate data on the speed of flame propagation, heat losses, and other parameters that affect the efficiency and safety of gas devices with small combustion chambers, additional research is required.

DESCRIPTION OF THE EXPERIMENTAL SETUP

The article describes a setup assembled in a laboratory to study flame propagation in a narrow Hele-Shaw channel. Fig. 1 shows a diagram of the experimental setup and a photograph of it in the laboratory (1).

Fig. 1. Experimental setup.

1 — photograph of the laboratory setup; 6 — flame front; composition of the laboratory setup: digital video camera (2), personal computer (3), transparent glass plates with partitions (4), gas meter with flow meter (5), gas ignition system with flame arrester (7), tube with gas valve (8), ignition coil with voltage source (9), propane/methane gas cylinders and hydrogen generator (10), additional channel lighting lamp (11)

The central element of the setup was a flat channel consisting of two rectangular transparent glass plates made of float glass ГОСТ 111-90 (4). The plates, measuring $100 \times 120 \times 0.6$ cm, were located parallel to each other. Between them, the partitions made of technical colored plexiglas ГОСТ 17622-72 and ГОСТ 10667-90 with a protective film were located at an angle to each other and formed a channel for flame propagation. Thus, the channel had a trapezoidal shape and was a flat diffuser (4).

The length of the flat expanding channel was 1.2 m, the smaller side of the trapezoid (the narrow cross section of the channel) had a width of 0.02 m, and the width of the larger side was determined by the channel opening angle (the angle between the inner side walls of the channel), which could vary from 0° to 25° (in the experiments this angle was 5° , 10° , 15° , 20° , and 25°). The channel height (the distance between the glass plates) varied from 3 mm to 6 mm with a step of 0.5 mm. The glass plates were fixed with screw metal clamps to create and control the tightness of the channel in order to prevent leaks of the gas mixture and air penetration.

Several technical solutions and control methods were used to ensure equal channel height along its width and length, as well as to minimize the deflection of the glass plates under their own weight. The setup was mounted on a solid laboratory table, which ensured the rigidity of the structure and minimized possible vibrations, which helped maintain a stable position of the glass and reduce the likelihood of its deflection. The horizontality of the setup was checked multiple times using a bubble level on several sections of the glass plates. Correct adjustment of the laboratory table and the position of the channel on it ensured the accuracy of the experiments and prevented possible errors in measurements.

To control the geometric dimensions of the channel, ГОСТ 166-89 calipers were used, allowing one to measure the height of the partitions at different points along their length. The measurement error on the main scale for class 1 accuracy calipers was 0.05 mm. This ensured accuracy and uniformity along the entire length and width of the channel. Using a set of flat partitions of different thicknesses, it was possible to set the required channel height in the range from 1 mm to 20 mm. Tolerances for the channel height were ± 0.05 mm, which was acceptable for achieving reproducibility of results and ensuring measurement accuracy. Tolerances made it possible to control and minimize the influence of channel parameters on flame front propagation.

Several parameters, including the design features and the material from which its elements are constructed, were taken into consideration in order to precisely establish the value of the compression force produced by the clamps of the glass plates in the experimental setup. Screw-type clamps with constricting forces varying from 50 N to 200 N provided better compaction, and the total compression force of the glass plates from four clamps was 480 N. Utilizing these techniques allowed the setup to guarantee steady functioning and a high level of experiment repeatability, both of which are crucial for the examination of combustion processes in a restricted channel.

The experiments used propane-air mixtures (4.5% propane in air) and methane-air mixtures with a concentration of 9.5%, which were prepared in a displacement gasometer (5) filled with water and consisting of two reservoirs — open (for air) and closed (for the gas mixture), propane and methane were supplied from gas cylinders.

Hydrogen was produced by decomposing distilled water using a 6.140 Chromatec generator with four purification stages: a separator, droplet moisture dryers, filters with molecular sieves, and a catalytic reactor that eliminates the possibility of oxygen impurities and moisture emissions into the gas lines (10). The error in preparing gas mixtures using a displacement gas meter was 0.4%.

Water in the laboratory gas meter filled the lower part of a closed reservoir, and gas was supplied from above, displacing water. This made it possible to control the volume of the gas mixture since the amount of displaced water was equal to the volume of the mixture. The homogeneity of the resulting gas mixture was ensured by diffusion mixing inside the gas meter reservoir. Before starting work with the channel, the gas outlet hose of the gas meter was closed to prevent gas leakage. The gas meter ensured accuracy and control of various parameters of the gas mixture during its preparation.

The volume of the supplied gas mixture between the plates was measured with an accuracy of $\pm 1.5\%$

using the PFC-2 gas flow meter (8) and was five internal volumes of the channel for complete filling of the Hele-Shaw cell. The channel was filled with a combustible mixture at an average feed rate of 2.5–3.5 L/min. The filling process was carried out using a gas valve through a PVC hose tube ГОСТ 19034-82, located in a narrow cross-section of the diffuser channel, which was closed, and the opposite one was open. To prevent flame backflow, a flame arrester was used - a steel tube with fine metal wire installed in the gas mixture supply system (7).

Depending on the experimental conditions, the mixture was ignited immediately after opening the outlet cross-section of the channel or after an ignition delay time of 15 to 45 s. After filling the channel, a short waiting time produced a stabilization effect, which allowed the combustible mixture to be evenly distributed and reach a homogeneous state before ignition.

The mixture was ignited by a high-voltage spark between the electrodes of an induction ignition coil (9) connected to a power source using electrical copper wires in a PVC insulating sheath. The ignition coil converted a low-voltage direct current of 12 V coming from the source into a short electrical pulse with a voltage of up to 34 000 V. This pulse was then applied to two electrodes, the distance between which varied from 2 mm to 15 mm, depending on the experimental conditions. An additional light source (11) illuminated the channel and flame front (6) next to the installation plates and allowed for higher-quality video recording of the combustion process of gas mixtures in a flat diffuser.

For a detailed study of the formation and movement of the flame front in a flat channel, we recorded video with a frequency of 240 frames per second using a GoPro HERO12 digital video camera (2), installed above the transparent top plate on a stationary tripod. The tripod's adjustment mechanism for setting the horizontal level of the video camera allowed it to be adjusted parallel to the plane of the channel.

The improved HyperSmooth 6.0 stabilization of the GoPro 12 video camera and the digital matrix 1×CMOS with a high resolution of 27 Mp allowed working with the widest possible viewing angle. The Max HyperView optical lens provided a viewing angle of up to 177°. The video camera was controlled remotely via Bluetooth using the tablet-installed GoPro App, which allowed viewing photos and videos after the experiment. The video records were stored on a micro SD memory card, from which the video files of the experiments were then transferred to a computer (3). To process the obtained experimental videos, we employed computer vision algorithms, image noise reduction filters, made brightness and contrast corrections, providing clearer displays of the flame front details in the channel.

The flat geometry of the Hele-Shaw channel contributed to the formation of a quasi-two-dimensional flame front, which made it possible to visualize its development in more detail compared to three-dimensional configurations and then analyze the features of its propagation.

METHODOLOGY AND RESULTS OF THE EXPERIMENT

The study of the combustion process of propane and methane gas mixtures with air was carried out using flame front visualization methods and high-speed digital photo and video shooting with subsequent computer processing. Analysis of data collected under different experimental conditions allowed us to determine the key parameters influencing the flame topology and its propagation speed.

Figs. 2 (a) and 2 (б) show the propagation of the flame front of a methane- and propane-air mixture moving from the closed narrow edge to the open wide edge of the diffuser when the distance between the plates was 6 mm and the channel opening angle was 25°.

Fig. 2. Typical frames of video filming of the flame front during propagation in the Hele-Shaw channel.
a — propane-air mixture;
б — methane-air mixture;
channel height 6 mm, opening angle 25°

A series of photographs for different time intervals collected in one image allows us to estimate the change in the shape and structure of the flame front, determine the number of cells formed on it, and the propagation rates of different gas flames. Visualization of the combustion of a methane-air mixture with hydrogen is shown in Figs. 3 (a) and 3 (б). Experiments with methane-air mixtures with the addition of hydrogen were carried out for a stoichiometric mixture (fuel excess coefficient $\phi = 1$) with a volume fraction of hydrogen of 25% and 50% of the total fuel volume (the volume of methane with hydrogen) for a channel 3.5 mm high with a diffuser opening angle of 25°.

Fig. 3. Photo frames of the flame front propagation of a methane-hydrogen-air mixture.
Concentration of gases:
a — 25% hydrogen and 75% methane with air;
б — 50% hydrogen and 50% methane with air;
in a diffuser for an angle of 25° with a height of 3.5 mm

During combustion of the mixture, variability in the structure and shape of the flame front was observed in the channel, as well as the formation of cellular folds on the surface, leading to its deformation. In the experiments, the distances between the glass plates were determined at which ignition of the mixture and stable flame propagation in a narrow flat expanding channel were possible.

It was found that with an increase in the distance between the plates, the flame propagation speed increased and approached the laminar combustion values; the diffuser opening angle also affected the features of flame front propagation, accelerating it with an increase in the angle.

The experiments revealed the relationship between the flame front velocity and the channel geometry. The local flame rate depended on the radius of curvature and the flame expansion rate in individual sections as it moved from the closed to the open edge of the channel. Flame oscillations along the longitudinal axis with a small amplitude were detected during the front propagation from the narrow closed edge to the open edge.

CONCLUSION

The new experimental setup with a flat horizontal Hele-Shaw channel allows one to study in detail the quasi-two-dimensional flame propagation in narrow channels, its topology, instability, and to determine the flame front propagation rates and the number of cells on its surface for gas mixtures with various fuel concentrations, which is required to assess the influence of hydrodynamic and heat diffusion processes on flame instability. The setup allows us to study the combustion of both traditional hydrocarbon gases and their mixtures with hydrogen.

Studying flame propagation patterns is an important area of scientific research that contributes to the development of energy and increases the level of safety in the operation of various burner devices.