

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОГО ПЛАМЕНИ
В КАНАЛЕ С ТЕПЛОПОГЛОЩАЮЩИМ ПОКРЫТИЕМ****В.В. Володин¹**

vlad11may@gmail.com

В.В. Голуб¹

victor.v.golub@gmail.com

А.Е. Ельянов¹

elyanov14@physics.msu.ru

А.Ю. Микушкин^{1,2}

mikushkin@bmstu.ru

¹ОИВТ РАН, Москва, Российская Федерация²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация**Аннотация**

Изложены результаты экспериментального исследования горения изначально неподвижной водородно-воздушной смеси в канале, одна из стенок которого покрыта волокнистым поглощающим материалом — стальной ватой. На основании серий теневого фотографирования ячейки пламени получены зависимости расстояния, пройденного фронтом пламени, от времени при отсутствии покрытия и с тремя образцами стальной ваты различной толщины и пористости. Показано, что скорость распространения пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 % (об.) в канале круглого сечения диаметром 54 мм с покрытием до 3 раз превышает скорость пламени в канале без покрытия. Вычислены значения плотности, теплоемкости и теплопроводности стальной ваты. Рассчитаны скорости тепловыделения при горении и поглощения теплоты из области продуктов сгорания слоем стальной ваты. Определена доля тепловой энергии, поглощаемой стальной ватой, проанализировано влияние этого эффекта на скорость распространения пламени. Измерены размеры ячеек неустойчивого пламени при его распространении в канале без покрытия и с покрытием. При распространении фронта пламени над слоем волокнистого поглощающего материала обнаружено сокращение среднего наблюдаемого размера ячейки в 2 раза

Ключевые слова

Горение водорода, кинетическое горение, теплопоглощающее покрытие, ячейчатое пламя, канал

Поступила 14.01.2022

Принята 14.02.2022

© Автор(ы), 2022

Введение. Развитие водородной энергетики как в России, так и за рубежом делает актуальными вопросы водородной безопасности. Так, при конструировании водородных заправок станций, технических систем, потребляющих или производящих водород, необходимо учитывать связанные

с возгоранием риски. Отдельное внимание уделяется распространению пламени в трубах и каналах, так как медленное горение может перейти в детонацию в зависимости от форм и размеров каналов, в которых пламя распространяется.

На скорость распространения фронта пламени влияют как скорость химической реакции, так и тепловое расширение продуктов сгорания. Отсюда следует, что при отведении теплоты от фронта пламени и продуктов сгорания можно ожидать снижения скорости распространения фронта пламени. Использование пористого теплопоглощающего слоя, а именно металлической ваты, способно замедлить распространение фронта пламени [1–3]. Однако этот способ замедления зависит от положения фронта пламени относительно теплопоглощающего слоя и режима распространения фронта пламени. При распространении фронта пламени в каналах с шероховатыми стенками турбулизация фронта пламени приводит к увеличению скорости его распространения [4]. При этом теплопоглощение пористого покрытия не всегда превалирует над турбулизацией и ускорением фронта пламени. Экспериментально в [5] наблюдалось как замедление, так и ускорение фронта пламени при прохождении через пористую преграду. Кроме описанных выше механизмов, следует упомянуть влияние переноса энергии за счет излучения. Например, в [5] численно получено ускорение фронта пламени за счет поглощения излучения химически нейтральными частицами, распределенными в объеме горючей смеси.

Скорость распространения фронта пламени зависит от его площади [7–9], в свою очередь, фронт пламени подвержен неустойчивости [10, 11], что приводит к его искривлению и увеличению площади. При неизменных начальных условиях скорость ячеистого фронта пламени может меняться от эксперимента к эксперименту [12, 13]. С использованием численного моделирования в [14] проанализирована роль неустойчивости Дарье — Ландау в ускорении фронта пламени. Показано, что за счет развития неустойчивости Дарье — Ландау скорость распространения фронта пламени может возрасти в несколько раз по сравнению со скоростью плоского ламинарного пламени в канале. Результаты экспериментальных исследований эволюции неоднородностей на фронте пламени при распространении в канале с пористым покрытием приведены в [15]. Обнаружено, что при ускоренной турбулизации потока в канале в процессе развития горения не наблюдается стадии тюльпанообразного пламени.

Цель работы — определение влияния покрытия стенки канала волокнистым поглощающим материалом на распространение фронта пламени по результатам экспериментов распространения фронта пламени в каналах

круглого сечения и измерениям скорости распространения фронта пламени по серии теневого фотографий.

Экспериментальная установка. Для поперечной визуализации фронта пламени в трубе собрана экспериментальная установка (рис. 1). Экспериментальная установка состоит из стенда подготовки горючей смеси 1, открытой с одной стороны, прозрачной трубы 3 из оргстекла длиной 500 мм и толщиной стенок 3 мм, системы теневого визуализации фронта пламени. К стенду подготовки горючей смеси подключены газовый баллон с водородом марки Б и воздушный компрессор. Встроенный в систему манометр с погрешностью 0,05 атм позволяет создавать газовые смеси с точностью до 98 %. Расстояние, пройденное фронтом пламени в трубе, регистрируется системой теневого визуализации, которая включает в себя теневого прибор ИАБ-451 2 с видимой областью диаметром 230 мм, оснащенный источником света 4 и высокоскоростной видеокамерой *Phantom VEO 710S* 5.

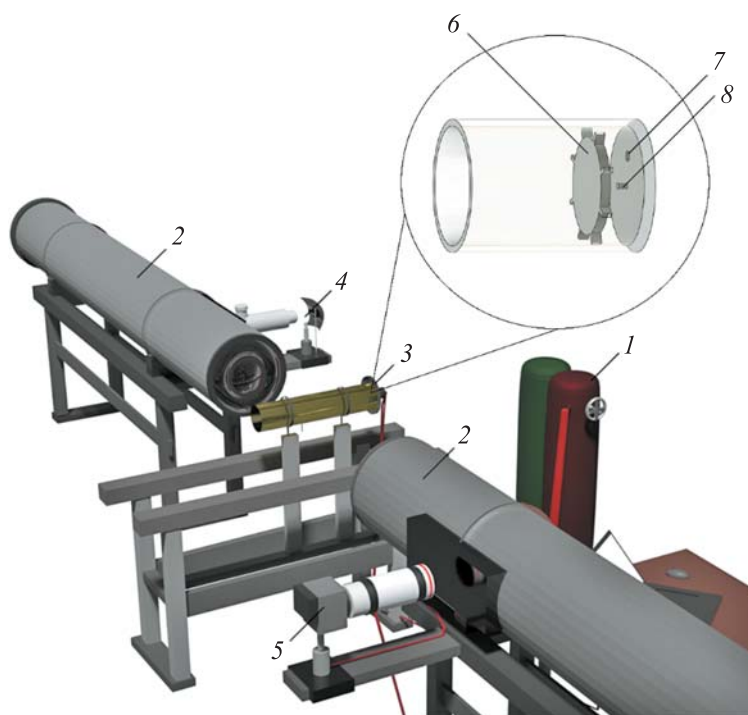


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

При иницировании пламени в трубе в центре закрытого конца фронт пламени распространяется в сторону открытого конца трубы, не касаясь стенок [16]. Для того чтобы обеспечить распространение фронта пламени вдоль стенок на коротком расстоянии от точки иницирования, в трубе

установлена круглая пластина 6 на расстоянии 5 мм от закрытого торца, образуя кольцевой зазор толщиной 5 мм. В центре закрытого торца располагается искровой разрядник 8, сбоку от него инжектор газовой смеси 7.

Постановка и проведение эксперимента. Один конец трубы всегда остается открытым, поэтому для заполнения трубы газом ее продувают смесью объемом 25 л, что превышает объем трубы более чем в 20 раз. Сразу после заполнения трубы проводят инициирование горения искровым разрядом.

Во всех экспериментах газовая смесь одинакова и составляет 15 % (об.) водорода и 85 % (об.) воздуха. Горючую смесь готовят в баллоне объемом 40 л с избыточным давлением 5 атм. Все эксперименты проводят со смесью, полученной единожды и находившейся в баллоне более 24 ч. Это исключает возможность разброса экспериментальных данных вследствие различного состава смеси. Съемку выполняют высокоскоростной камерой со скоростью 1000 кадр/с и временем экспозиции 100 мкс. Генератор, создающий импульс для инициирования искрового разряда, также подает сигнал начала записи камере. Теневое изображение фронта пламени в трубе спустя 20 мс от момента инициирования показано на рис. 2. Приведенная фотография является полным кадром изображения, получаемого с видеокамеры. Совокупность геометрической формы, толщины стенок трубы и настроек теневого прибора ИАБ-451 привела к тому, что часть

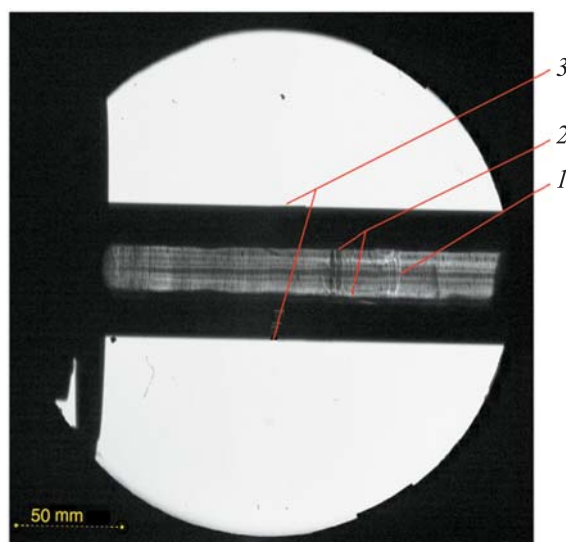


Рис. 2. Полнокадровое изображение с высокоскоростной камеры спустя 20 мс от инициирования:

1 — фронт пламени; 2 — видимая область трубы; 3 — труба диаметром 60 мм

трубы стала непрозрачной, поэтому видимая область ограничена окном прозрачности высотой 20...22 мм. Во всех последующих экспериментальных изображениях будет показана именно видимая область эксперимента.

Всего проведено три эксперимента со свободным распространением фронта пламени в трубе и три эксперимента с распространением фронта пламени над слоем стальной ваты. Стальную вату укладывали на дно трубы, так что ее длина равнялась длине трубы. Ширину и высоту образца стальной ваты измеряют в разложенном состоянии, в трубе образец размещают по нижней стенке, часть стальной ваты попадает в видимую область трубы. Параметры стальной используемой в экспериментах ваты приведены ниже. Значение пористости рассчитано в виде процентного отношения объема металла указанной массы к действительному объему применяемых образцов.

Параметры используемой в экспериментах стальной ваты (длина 540 мм)

Ширина, мм	26,8	21,0	19,2
Высота, мм	30	10	8
Масса, г	13,8	7,9	4,7
Площадь поверхности, мм ²	804	210	153,6
Объем ваты, см ³	729,0	378,0	151,2
Пористость, %	99,76	99,74	99,61

Экспериментальные данные. По полученным сериям изображений построена зависимость расстояния l , пройденного фронтом пламени, от времени t . Положение фронта пламени определено как точка, находящаяся на середине отрезка, которая соединяет верхнюю и нижнюю точки фронта пламени в видимой области 2 (см. рис. 2). Длина перпендикуляра от этой точки до левой границы трубы являлась расстоянием, пройденным фронтом пламени. Зависимость расстояния, пройденного фронтом пламени в трех экспериментах без стальной ваты, а также результаты трех экспериментов со стальной ватой различной массы в трубе показаны на рис. 3. На рисунке заметно увеличение скорости пламени в канале до 3 раз при распространении над слоем стальной ваты. Значения средней видимой скорости фронта пламени для различных экспериментов приведены ниже.

Значения средней видимой скорости фронта пламени, м/с, в зависимости от условий эксперимента

Без стальной ваты:

№ 1	3,71
№ 2	3,89
№ 3	3,72

Со стальной ватой площадью поверхности, мм²:

804	10,11
210	8,56
153,6	6,53

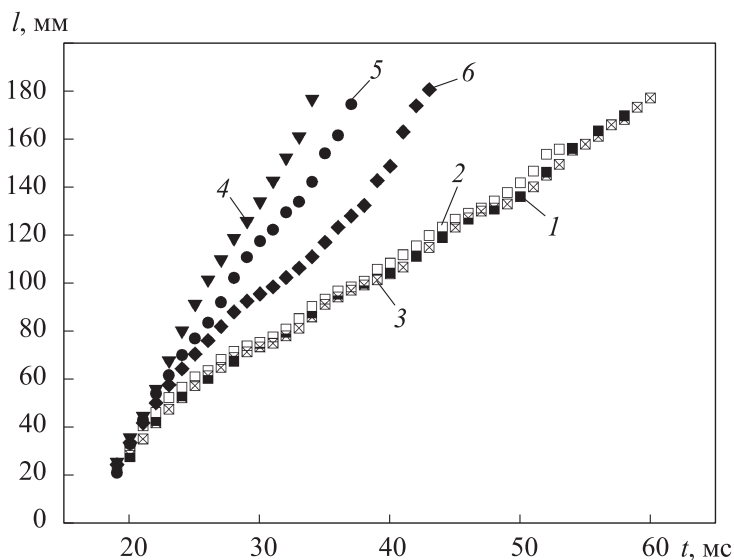


Рис. 3. Зависимость расстояния, пройденного фронтом пламени, от времени при различных условиях эксперимента:
 1 — без ваты № 1; 2 — без ваты № 2; 3 — без ваты № 3;
 4, 5, 6 — вата площадью поверхности 804, 210 и 153,6 мм² соответственно

Результаты и обсуждение. Волокнистая структура ваты в канале с расширяющимся фронтом пламени воздействует как на гидродинамические, так и на тепловые характеристики пламени. Для понимания механизмов влияния покрытия стенки на скорость фронта пламени следует рассмотреть поглощение теплоты стальной ватой из области продуктов сгорания, уменьшение свободного сечения канала и внесение возмущений в поток неровностями покрытия.

Поглощение теплоты пористым слоем можно оценить, используя нестационарное уравнение теплопроводности. Предположим, что в момент прихода фронта пламени температура на границе пористого слоя ($x = 0$) толщиной L скачкообразно возрастает до значения T_b .

Поток энергии, передающейся пористому слою:

$$q = -\kappa_a \frac{\partial T(x=0)}{\partial x}, \tag{1}$$

где κ_a — теплопроводность покрытия (пористого слоя).

Эволюционное уравнение профиля температуры:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\kappa_a}{\rho_a c_a} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}.$$

Здесь c_a , ρ_a — удельные теплоемкость и плотность покрытия.

До момента прихода фронта пламени к участку стальной ваты его температура равна начальной. Отсюда начальное условие: $T(x, t < t_a) = T_0$. В момент прихода фронта пламени температура на границе раздела возрастает до температуры продуктов сгорания. Для оценки теплового потока сверху температуру продуктов сгорания можно полагать неизменной. Слой поглощающего материала достаточно толстый, поэтому передачей теплоты в стенку канала можно пренебречь. Тогда граничные условия можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} T(0, t > t_a) &= T_b, \\ \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} &= 0. \end{aligned}$$

Градиент температуры по направлению от поверхности в глубь слоя:

$$\frac{\partial T(x=0)}{\partial x} = - \frac{2(T_b - T_0)}{L} \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(- \frac{\kappa_a}{\rho_a c_a} \frac{\pi^2}{L^2} \left(n + \frac{1}{2}\right)^2 (t - t_a)\right). \quad (2)$$

Подставляем градиент (2) в уравнение теплового потока (1):

$$q = \frac{2\kappa_a(T_b - T_0)}{L} \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(- \frac{\kappa_a}{\rho_a c_a} \frac{\pi^2}{L^2} \left(n + \frac{1}{2}\right)^2 (t - t_a)\right).$$

Фронт пламени распространяется по закону $l(t)$, тогда время прибытия фронта пламени — обратная функция $t_a(l)$.

Мощность, выделяющаяся при сгорании горючей смеси в момент времени t :

$$Q_r = \Delta H S_c \frac{\rho_u}{\theta} \frac{dl}{dt},$$

где ΔH — удельная теплота сгорания смеси; S_c — площадь поперечного сечения канала; ρ_u — плотность горючей смеси; θ — коэффициент теплового расширения продуктов сгорания.

Мощность поглощения энергии в момент времени t :

$$Q_a = a \int_0^l q(\xi) d\xi,$$

$$Q_a = a \frac{2\kappa_a(T_b - T_0)}{L} \int_0^l \sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{\kappa_a}{\rho_a c_a} \frac{\pi^2}{L^2} \left(n + \frac{1}{2}\right)^2 (t_a(\xi) - t)\right) d\xi =$$

$$= a \frac{2\kappa_a(T_b - T_0)}{L} \sum_{n=0}^{\infty} \int_0^l \exp\left(-\frac{\kappa_a}{\rho_a c_a} \frac{\pi^2}{L^2} \left(n + \frac{1}{2}\right)^2 (t_a(\xi) - t)\right) d\xi,$$

где a — толщина покрытия; $\rho_a = (1 - \varphi)\rho_s + \varphi\rho_g$;

$$c_a = \frac{(1 - \varphi)\rho_s c_s + \varphi\rho_g c_g}{(1 - \varphi)\rho_s + \varphi\rho_g}.$$

Ввиду сложности и негарантированной возможности аналитического интегрирования и суммирования со сколько-нибудь точной аппроксимацией экспериментальных зависимостей, дальнейшее интегрирование проведено численными методами.

Сумма медленнее всего сходится при малом времени от начала распространения фронта пламени. Так, в момент времени 5 мс первый член суммы меньше нулевого на 0,4 порядка, второй меньше первого на 0,8 порядка и т. д. Пятый член суммы меньше четвертого на 2 порядка, соответственно, если зададим пределы суммирования от 0 до 5, то результат будет отличаться менее чем на 0,4 %. В момент времени 40 мс каждый последующий член меньше предыдущего на $2n$ порядка, т. е. погрешность составит 10^{-10} %.

Теплопроводность стальной ваты можно рассчитать по формуле

$$\kappa_a = \left(\frac{1 - \varphi}{\kappa_s} + \frac{\varphi}{\kappa_g}\right)^{-1},$$

где φ — пористость; κ_s — теплопроводность металла; κ_g — теплопроводность газовой фазы.

Результаты расчетов значений теплофизических параметров стальной ваты приведены в таблице, где газовая фаза представляет собой продукты сгорания, состоящие из азота (72,6 % (об.)), паров воды (16,2 % (об.)) и кислорода (11,2 % (об.)), оставшегося после сгорания. Расчеты выполнены по методике, приведенной в [16].

Результаты расчетов значений теплофизических параметров стальной ваты

Параметр	Фаза		Масса стальной ваты, г		
	твердая	газовая	13,8	7,9	4,7
φ , %	0	100	99,76	99,74	99,6

Окончание таблицы

Параметр	Фаза		Масса стальной ваты, г		
	твердая	газовая	13,8	7,9	4,7
κ_a , Вт/(м · К)	30	$4,87 \cdot 10^{-2}$	20,5	20,6	20,6
ρ_a , кг/м ³	7600	$9,8 \cdot 10^{-1}$	19,2	20,7	31,4
c_a , Дж/(кг · К)	565	1165	1070	1060	1020

Расчеты показали, что в эксперименте со стальной ватой толщиной 30 мм поглощается 11...16 % теплоты химической реакции, в эксперименте с поглощающим слоем толщиной 10 мм — 9...13 %.

Для определения влияния возмущений скорости потока структурой поглощающего слоя измерены поперечные размеры неоднородностей на фронте пламени во всех экспериментах. Корректно удалось обнаружить и получить 82 величины из всех имеющихся кадров.

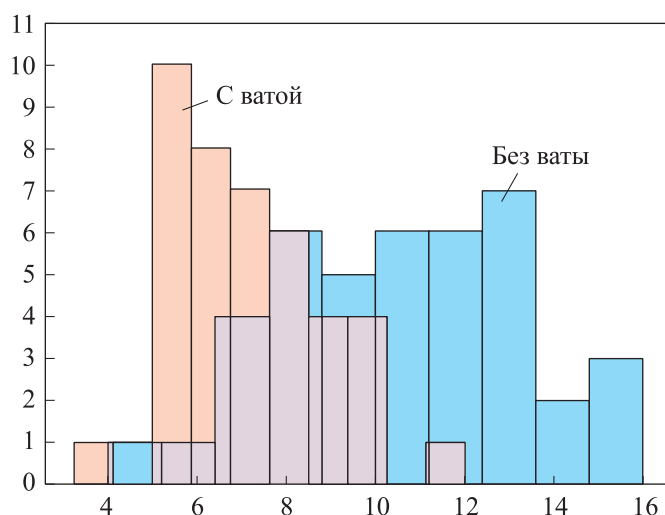


Рис. 4. Гистограмма распределения размеров ячеек неоднородностей

Гистограмма распределения размеров ячеек (рис. 4) показывает преобладание более мелкомасштабных неоднородностей при распространении фронта пламени над слоем стальной ваты. Это приводит к образованию более развитой поверхности ячеистого пламени и повышению массовой скорости химической реакции, а следовательно, к ускорению фронта пламени.

Заключение. Проведена серия экспериментов по распространению фронта пламени в каналах со слоем стальной ваты. Измерены скорости распространения пламени в каналах без поглощающего слоя и с ним.

Обнаружено увеличение скорости до 3 раз при распространении над слоем стальной ваты. Проведен расчет отношения мощности, поглощаемой слоем стальной ваты, к мощности, выделяемой в результате горения. Получено, что в зависимости от толщины стальной ваты теплопоглощение варьируется в пределах 9...16 %. При распространении фронта пламени в канале теплопоглощение стальной ваты оказывает значительно меньший эффект на движущийся фронт пламени, чем эффект турбулизации. Структура фронта пламени становится более ячеистой, что влияет на ускорение фронта пламени.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Golub V., Korobov A., Mikushkin A., et al. Propagation of a hemispherical flame over a heat-absorbing surface. *Proc. Combust. Inst.*, 2019, vol. 37, iss 2, pp. 2583–2589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.08.044>
- [2] Golub V., Elyanov A., Korobov A., et al. Influence of heat absorption on hydrogen-air flame instability. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2019, vol. 109, art. 109845. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109845>
- [3] Golovastov S.V., Bivol G.Yu., Alexandrova D. Evolution of detonation wave and parameters of its attenuation when passing along a porous coating. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2019, vol. 100, pp. 124–134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.08.030>
- [4] Ciccarelli G., Johansen C., Kellenberger M. High-speed flames and DDT in very rough-walled channels. *Combust. Flame*, 2013, vol. 160, iss. 1, pp. 204–211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.08.009>
- [5] Bivol G.Y., Golovastov S.V., Golub V.V. Effect of channel geometry and porous coverage on flame acceleration in hydrogen-air mixture. *Process Saf. Environ. Prot.*, 2021, vol. 151, pp. 128–140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.038>
- [6] Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Пиневиц С.Г. Аномальное распространение пламени в горючих газовзвесьях. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2015, № 5 (62), с. 51–68. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2015-5-51-68>
- [7] Damköhler G. Der Einfluß der Turbulenz auf die Flammgeschwindigkeit in Gasgemischen. *Z. Elektrochem. Angew. Phys. Chem.*, 1940, vol. 46, iss. 11, pp. 601–626. DOI: <https://doi.org/10.1002/bbpc.19400461102>
- [8] Щёлкин К.И. О сгорании в турбулентном потоке. *ЖТФ*, 1943, т. 13, № 9-10, с. 520–530.
- [9] de Goey L.P.H., ten Thije Boonkamp J.H.M. Mass burning rate of premixed stretched flames: integral analysis versus large-activation-energy asymptotics. *J. Eng. Math.*, 2008, vol. 62, no. 1, pp. 67–84. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10665-007-9175-1>

- [10] Markstein G.H. Experimental and theoretical studies of flame-front stability. *J. Aeronaut. Sci.*, 1951, vol. 18, no. 3, pp. 199–220. DOI: <https://doi.org/10.2514/8.1900>
- [11] Ландау Л.Д. К теории медленного горения. *ЖЭТФ*, 1944, т. 14, № 6, с. 240–244.
- [12] Володин В.В., Голуб В.В., Ельянов А.Е. Влияние начальных условий на скорость фронта ламинарного пламени в газовых смесях. *ЖТФ*, 2021, т. 91, № 2, с. 247–254. DOI: <http://dx.doi.org/10.21883/JTF.2021.02.50358.215-20>
- [13] Essmann S., Markus D., Grosshans H., et al. Experimental investigation of the stochastic early flame propagation after ignition by a low-energy electrical discharge. *Combust. Flame*, 2020, vol. 211, pp. 44–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.09.021>
- [14] Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Рыков Ю.В. Особенности распространения пламени в замкнутых объемах. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2010, № 1 (36), с. 21–39.
- [15] Golovastov S.V., Bivol G.Yu., Golub V.V. Influence of porous walls on flame front perturbations in hydrogen-air mixtures. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, iss. 2, pp. 2783–2795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.028>
- [16] Свойский З.В. Коэффициенты вязкости и теплопроводности газовых смесей при больших плотностях. *Ученые записки ЦАГИ*, 1982, т. 13, № 4, с. 141–149.

Володин Владислав Владимирович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Голуб Виктор Владимирович — д-р физ.-мат. наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Ельянов Артем Евгеньевич — младший научный сотрудник лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2).

Микушкин Антон Юрьевич — научный сотрудник лаборатории физической газовой динамики ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2); ассистент кафедры «Физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Володин В.В., Голуб В.В., Ельянов А.Е. и др. Распространение водородно-воздушного пламени в канале с теплопоглощающим покрытием. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 5 (104), с. 31–44.

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-5-31-44>

HYDROGEN-AIR FLAME PROPAGATION IN A TUBE WITH HEAT-ABSORBING LINING

V.V. Volodin¹

V.V. Golub¹

A.E. Elyanov¹

A.Yu. Mikushkin^{1,2}

vlad11may@gmail.com

victor.v.golub@gmail.com

elyanov14@physics.msu.ru

mikushkin@bmstu.ru

¹Joint Institute for High Temperature, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents experimental investigation results concerning combustion of initially stationary hydrogen-air mixture in a tube, one of the walls of which is lined with steel wool, a fibrous absorbent material. We used a schlieren photograph series imaging the cellular flame to obtain the distance traversed by the flame front as a function of time for the case when lining is absent and for three cases of steel wool lining of varied thickness and porosity. The paper shows that flame propagation rate in the hydrogen-air mixture containing 15 vol % hydrogen in a tube featuring a circular cross-section with a diameter of 54 mm when lining is present is up to 3 times higher than the flame propagation rate in a tube without lining. We calculated the density, heat capacity and thermal conductivity for the steel wool. We also calculated heat emission rate during combustion and the rate at which the steel wool layer absorbs heat from the region occupied by combustion products. We determined the percentage of heat energy absorbed by the steel wool and analysed how this effect affects flame propagation rate. We measured cell dimensions in an unstable flame propagating in a tube with and without lining. For the case of a flame front propagating across a fibrous absorbent material layer, we found that the average cell size observed decreases twofold

Keywords

Hydrogen combustion, kinetic combustion, heat-absorbing lining, cellular flame, tube

Received 14.01.2022

Accepted 14.02.2022

© Author(s), 2022

REFERENCES

- [1] Golub V., Korobov A., Mikushkin A., et al. Propagation of a hemispherical flame over a heat-absorbing surface. *Proc. Combust. Inst.*, 2019, vol. 37, iss. 2, pp. 2583–2589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.08.044>
- [2] Golub V., Elyanov A., Korobov A., et al. Influence of heat absorption on hydrogen-air flame instability. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2019, vol. 109, art. 109845. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109845>

- [3] Golovastov S.V., Bivol G.Yu., Alexandrova D. Evolution of detonation wave and parameters of its attenuation when passing along a porous coating. *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 2019, vol. 100, pp. 124–134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.08.030>
- [4] Ciccarelli G., Johansen C., Kellenberger M. High-speed flames and DDT in very rough-walled channels. *Combust. Flame*, 2013, vol. 160, iss. 1, pp. 204–211. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.08.009>
- [5] Bivol G.Y., Golovastov S.V., Golub V.V. Effect of channel geometry and porous coverage on flame acceleration in hydrogen-air mixture. *Process Saf. Environ. Prot.*, 2021, vol. 151, pp. 128–140. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.04.038>
- [6] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Pinevich S.G. Abnormal propagation of flame in combustible gas suspensions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2015, no. 5 (62), pp. 51–68 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2015-5-51-68>
- [7] Damköhler G. Der Einfluß der Turbulenz auf die Flammgeschwindigkeit in Gasgemischen. *Z. Elektrochem. Angew. Phys. Chem.*, 1940, vol. 46, iss. 11, pp. 601–626. DOI: <https://doi.org/10.1002/bbpc.19400461102>
- [8] Shchelkin K.I. On burning in a turbulent flow. *ZhTF*, 1943, vol. 13, no. 9-10, pp. 520–530 (in Russ.).
- [9] de Goey L.P.H., ten Thije Boonkamp J.H.M. Mass burning rate of premixed stretched flames: integral analysis versus large-activation-energy asymptotics. *J. Eng. Math.*, 2008, vol. 62, no. 1, pp. 67–84. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10665-007-9175-1>
- [10] Markstein G.H. Experimental and theoretical studies of flame-front stability. *J. Aeronaut. Sci.*, 1951, vol. 18, no. 3, pp. 199–220. DOI: <https://doi.org/10.2514/8.1900>
- [11] Landau L.D. On the theory of slow combustion. *ZhETF*, 1944, vol. 14, no. 6, pp. 240–244 (in Russ.).
- [12] Volodin V.V., Golub V.V., El'yanov A.E. The effect of initial conditions on the laminar flame front velocity in gas mixtures. *Tech. Phys.*, 2021, vol. 66, no. 2, pp. 235–242. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784221020237>
- [13] Essmann S., Markus D., Grosshans H., et al. Experimental investigation of the stochastic early flame propagation after ignition by a low-energy electrical discharge. *Combust. Flame*, 2020, vol. 211, pp. 44–53. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.09.021>
- [14] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Rykov Yu.V. Peculiarities of flame propagation in closed volumes. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2010, no. 1 (32), pp. 21–39 (in Russ.).
- [15] Golovastov S.V., Bivol G.Yu., Golub V.V. Influence of porous walls on flame front perturbations in hydrogen-air mixtures. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, iss. 2, pp. 2783–2795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.028>
- [16] Svoyskiy Z.V. Viscosity and heat conduction coefficients of gas mixtures at high densities. *Uchenye zapiski TsAGI*, 1982, vol. 13, no. 4, pp. 141–149 (in Russ.).

Volodin V.V. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow, Laboratory of Non-Steady-State Gas Dynamic Processes, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Golub V.V. — Dr. Sc. (Phys.-Math.), Professor, Leading Research Fellow, Laboratory of Non-Steady-State Gas Dynamic Processes, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Elyanov A.E. — Junior Research Fellow, Laboratory of Non-Steady-State Gas Dynamic Processes, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Mikushkin A.Yu. — Research Fellow, Laboratory of Non-Steady-State Gas Dynamic Processes, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation); Assist. Lecturer, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Bauman-skaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Volodin V.V., Golub V.V., Elyanov A.E., et al. Hydrogen-air flame propagation in a tube with heat-absorbing lining. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2022, no. 5 (104), pp. 31–44 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-5-31-44>