

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОГО ФРОНТА ПЛАМЕНИ В ПОКРЫТЫХ ПОРИСТЫМ ПЕНОПОЛИУРЕТАНОМ КАНАЛАХ

Г.Ю. Бивол, С.В. Головастов*, В.В. Голуб

Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
125412, ул. Ижорская, 13, стр.2, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Экспериментально исследовано ускорение пламени в водородно-воздушной смеси в канале, внутренняя поверхность которого покрыта пористым пенополиуретаном. Молярный избыток водорода варьировался от 0,3 до 1,0, а размер пор изменялся от 0,3 до 2,5 мм. Распространение фронта пламени происходило в полуоткрытом канале при атмосферном давлении и комнатной температуре. С помощью теневого метода регистрации газодинамических процессов и скоростной камеры определены скорости распространения фронта пламени в зависимости от размера пор и состава смеси. Максимально регистрируемая скорость фронта пламени составляла 1600 м/с при максимальном размере пор 2,5 мм. Определены размеры неоднородностей, генерируемые на фронте пламени. Установлена их связь с размером неустойчивости Дарье-Ландау. С помощью пьезоэлектрических датчиков определено давление, оказываемое продуктами горения на боковую поверхность канала. Установлены критические числа Пекле, при которых характерно ускорение фронта пламени и повышение давления за фронтом пламени.

Ключевые слова: горение, водород, пористое покрытие, полиуретан, неустойчивость Дарье-Ландау

1. Введение

В настоящее время водород рассматривается как экологически чистое топливо, способное заменить углеводородное горючее как на транспорте, так и в энергетике. Однако, одной из существенных проблем, затрудняющих применение водорода в качестве топлива, является его способность воспламеняться в широких концентрационных пределах с воздухом и детонировать. Это требует особого контроля отсутствия утечек водорода и наличия средств вентиляции и пожаротушения. Тем не менее, в некоторых случаях интенсивная вентиляция помещения может быть затруднена или невозможна. В частности, это касается атомных электростанций, где повышены требования радиационной безопасности. Из-за высокой скорости и давления газовая детонация в замкнутом помещении может иметь разрушительные последствия.

Одним из способов предотвращения возникновения детонации или ее распростране-

ния является использование различных пассивных методов, например, покрытие стен пористыми или эластичными материалами. Например, влияние пористого покрытия на распространение детонации в канале диаметром 50 мм было рассмотрено в работе [1]. Авторы показали, что использование материала с пористостью 0,40–0,50 позволило вдвое увеличить преддетонационное расстояние с 19,1–25,4 см для стен из гладкой стали до 38–51 см для мелкопористых покрытий (диаметр пор 0,04 мм) и до 51–64 см для крупнопористого покрытия (диаметр пор 0,07 мм).

Фронт детонационной волны представляет собой ячеистую структуру, определяемую взаимодействием поперечных возмущений с границами канала, их дальнейшим отражением от стенок и последующим взаимодействием в центральной части потока. В случае использования пористых материалов происходит дифракция ударно-волновых возмущений внутри пористого слоя, передача импульса от газа к каркасу покрытия и снижение

*Ответственный автор
E-mail: golovastov@yandex.ru (С. Головастов)

общей интенсивности фронта детонационной волны. В работе [2] была проведена оценка расстояния, на котором происходит распад детонации, равная двум диаметрам канала, то есть расстоянию, за которое поперечное возмущение проходит от одной стенки канала до противоположной. Несмотря на то, что пористые покрытия являются элементом, способствующим ускорению фронта пламени за счет турбулизации фронта пламени [3,4], такие же покрытия при распространении детонационных волн способствуют распаду ячеистой структуры детонационной волны и ослаблению ее воздействия на боковую поверхность канала [5-7]. В качестве пористой структуры использовались: спеченная бронза [1], металлическая сетка [8], войлочное покрытие [9], пенополиуретан [10], стальная вата [11]. В работах [12-14] изучалось распространение детонационной волны через канал, заполненный стальными сферами. Возможные сценарии распространения горения в канале с пористым покрытием длиной 500 мм приведены в работе [15] и на рис. 1. Как видно из рис. 1, существует максимальная толщина покрытия 4 мм, при которой сформировавшаяся детонационная волна распространяется без изменений. При толщине покрытия выше 6 мм регистрировался распад детонации. В некоторых случаях при промежуточных значениях толщины покрытия возможно реиницирование детонации.

Механизм управления скоростью фронта пламени над пористыми элементами достаточно сложен и может быть успешно рассмотрен в таких приближениях, как относительно тонкий слой [16], теплопоглощающий слой

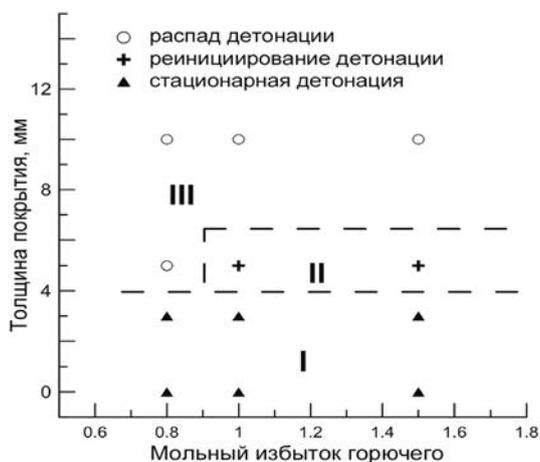


Рис. 1. Различные режимы распространения детонации в зависимости от состава смеси и толщины пористого покрытия [15].

[17] и другие. В [18] изучалось влияние шероховатого слоя. В [19] были исследованы характеристики распространения пламени ацетилено-воздушной смеси как в пустой трубке, так и в присутствии алюмосиликатной ваты, прикрепленной к внутренней стенке трубки. Одновременный учет многих факторов, таких как тепловые потери, поперечный сдвиг массы газа, диссипация возмущений на границах канала, турбулизация потока и др., представляет собой сложную задачу, которая может быть решена численно только в ряде приближений. Например, пористое покрытие можно рассматривать как среду с диссипацией [20]. Влияние однослойной проволочной сетки на поведение метано-воздушного пламени исследовалось в [21]. Стоит отметить ряд работ с инертными газами, которые в значительной степени позволяют оценить свойства пористых сред при взаимодействии с ударными волнами [22-24]. Изучение распространения пламени в канале с пористой средой неразрывно связано с фильтрационным горением [25]. В работе [26] определены пределы стационарного режима горения внутри слоя в зависимости от расхода газа и параметров межфазного теплообмена.

Использование пористого покрытия на стенках ограниченного канала с квазиодномерным потоком газа может оказать более существенное влияние на динамику возмущений, возникающих на фронте пламени. При высокой степени теплового расширения продуктов сгорания гидродинамическая неустойчивость может существенно влиять на развитие фронта пламени. Значительное количество работ, связанных с ускорением фронта пламени, посвящено изучению и анализу развития возмущений, возникающих на фронте пламени [27-30]. Развитие тюльпанообразного пламени изучалось в [31,32]. Картины развития возмущений для сферического пламени представлены в работах [33-36], в двумерном узком зазоре – в работе [37]. Стоит отметить работы, в которых во фронт пламени были внесены искусственные возмущения. Проведено экспериментальное исследование влияния звука на распространение водородно-воздушного пламени в диапазоне объемных концентраций водорода 9-14% [38]. Акустико-параметрическая неустойчивость водородно-воздушных смесей при нормальных условиях исследовалась в [39]. Термоакустическая неустойчивость в узких каналах была экспериментально исследована для пламени очень бедной смеси водорода с воз-

духом в [40]. Ускорение пальцевого пламени для быстро горящего пламени исследовалось в [41], когда сжимаемость газа играет важную роль. В работе [42] показано, что экспериментальные данные по распространению горения в несферических объемах в смеси с составом, отличающимся от стехиометрического, могут быть объяснены с помощью теории Колмогорова-Обухова. Среди работ, посвященных влиянию теплоглошающего слоя на развитие возмущений на фронте сферического (полусферического) пламени, стоит выделить цикл работ [43,44].

Однако, проблема развития возмущений при наличии пористого покрытия остается нерешенной. В данной работе изучено влияние пористого покрытия с открытыми порами на ускорение фронта пламени. Математическая модель такой системы при нестационарном распространении фронта пламени, продуктов сгорания и ударных волн довольно сложная. Однако, экспериментальное определение ряда безразмерных критериев, параметров неустойчивостей, определяющих ускорение пламени и взаимодействие его с границами канала, позволит совершенствовать модели перехода горения в детонацию, а также модели распада детонации и ее реинициирования. В данной работе решались следующие задачи:

1. В зависимости от соотношения компонентов смеси определялся минимальный размер пор полиуретанового покрытия, при котором возможно многократное повышение скорости фронта пламени по сравнению с гладким каналом. В соответствии с этим оценивались числа Пекле, определяющие связь между составом смеси, размерами пор и характером ускорения пламени;

2. Определялись размеры неоднородностей на фронте пламени, вызванных неустойчивостью Дарье-Ландау. Определялись связи между размерами пор, размерами неоднородностей на фронте пламени и составом смеси при иницировании у закрытого конца полуоткрытого канала;

3. В зависимости от размера пор и состава смеси определялись скорости фронта пламени и амплитуды давления, регистрируемые на боковой стенке канала.

2. Схема установки. Методика проведения экспериментов

Исследование распространения фронта пламени в данной работе основано на теневой регистрации газодинамических возмущений с использованием высокоскоростной камеры, а также на определении ударно-волновых воздействий с помощью пьезоэлектрических датчиков давления. Экспериментальная установка состояла из секции иницирования и секции диагностики прямоугольного сечения. Принципиальная схема представлена на рис. 2.

В секции иницирования (1) располагались отверстия для подвода водородно-воздушной смеси и искровой разрядник. Длина этой секции равнялась 200 мм. Сечение секции иницирования составляло 20x20 мм. Водородно-воздушная смесь подавалась через трубку у закрытого конца. Искровой промежуток, используемый для воспламенения водородно-воздушной смеси, также располагался у закрытого конца секции. Энергия, выделяемая в искровом промежутке, составляла около 0,1 Дж. Использование полуоткрытого канала позволяло избегать формирования отраженных

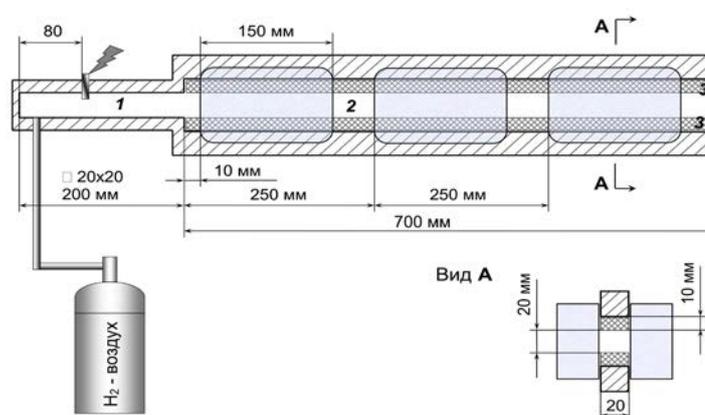


Рис. 2. Схема экспериментального стенда: 1 – секция иницирования; 2 – секция диагностики с прозрачными стенками; 3 – пористое покрытие.

от противоположного конца канала ударных волн. Начальное давление водородно-воздушной смеси внутри канала равнялось атмосферному.

Сечение секции диагностики имело размеры 20x40 мм. Конструкция секции диагностики предполагала установку прозрачных стеклянных окон для теневой регистрации процессов горения. Три возможных положения окон отмечены на рис. 2. Общая длина секции диагностики составляла 700 мм.

Внутренняя поверхность прямоугольной секции покрывалась пористым материалом снизу и сверху. Толщина верхнего и нижнего слоев отдельно равнялась 10 мм. Толщина слоя выбиралась таким образом, чтобы внутренний поперечный открытый размер составлял 20 мм в любом месте по сечению. Фотографии используемого пористого полиуретана представлены на рис. 3. Параметры пористых материалов представлены в таблице 1.

Пористый пенополиуретан характеризуется 10, 20, 40 и 80 порами на дюйм (ППУ-10, ППУ-20, ППУ-40, ППУ-80) и средней плотностью 0,03 г/см³. В данной работе использовался пористый полиуретан для того, чтобы можно было пренебречь эффектами тепловых потерь, вызванных взаимодействием газового потока со стенками канала. Коэффициент теплопроводности каркаса 0,15-0,2 В/м К на 2 порядка ниже коэффициента теплопроводности металлов. Например, как было показано в работе [45], даже при кратковременном

воздействии фронта детонационной волны (10 мкс) на металлическое волокнистое покрытие из стальной шерсти, тепловые потери могут быть существенными и приводить к дополнительному снижению амплитуды волны в 2–2,5 раза [46].

Для оптической регистрации горения использовалась высокоскоростная цифровая камера Phantom VEO 710 совместно с теневым прибором ИАБ-451. Частота кадров варьировалась в диапазоне 6000–90000 кадров в секунду. В режиме пространственно-временной развертки частота кадров достигала 170000 Гц. Экспозиция составляла 1–10 мкс. В качестве источника света использовалась ксеноновая лампа мощностью 35 Вт.

Для регистрации давления использовались пьезоэлектрические датчики давления РСВ (111А, 113В), устанавливаемые на верхней стенке под слоем пористого покрытия или на боковой поверхности канала, когда стекла заменялись металлическими пластинами. Датчики устанавливались на расстояниях 220 мм, 320 мм, 420 мм и 520 мм от искрового разрядника.

Смесь водорода и воздуха готовилась заранее в сосуде объемом 3 литра при максимальном давлении 0,5 МПа. Мольный избыток водорода (equivalence ratio, ER) варьировался в диапазоне 0,3–2,0. Перед каждым экспериментом канал откачивался, после чего наполнялся водородно-воздушной смесью и открывался со стороны секции диагностики. Таким обра-

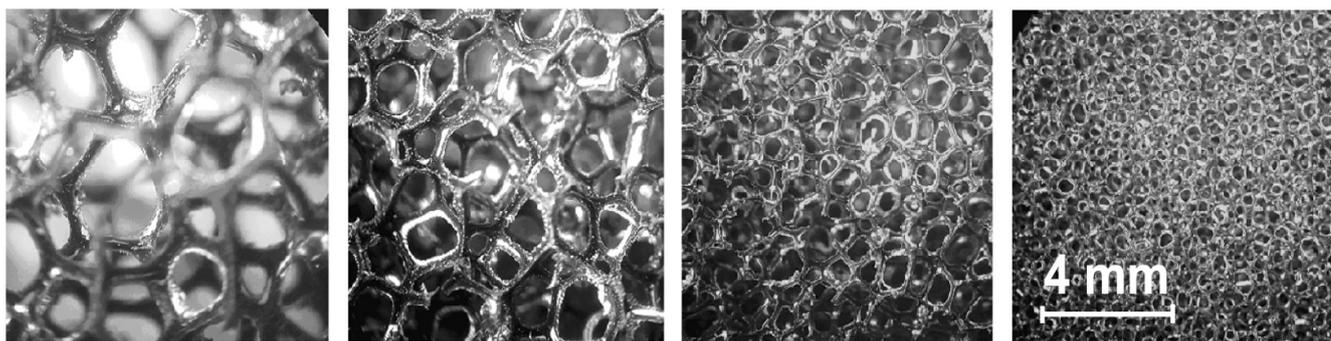


Рис. 3. Пористый полиуретан. Слева направо: ППУ-10, ППУ-20, ППУ-40, ППУ-80.

Таблица 1. Геометрические характеристики пористого пенополиуретана (ППУ)

Материал	Пористость, %	Размер пор, мм	Поперечный размер волокна, мкм
ППУ-10	99	2,5	200
ППУ-20	98	1,3	100
ППУ-40	96	0,6	40
ППУ-80	95	0,3	20

зом, начальное давление в открытом канале равнялось 0,1 МПа, начальная температура – 300 К. Сразу после заполнения детонационной трубки смесь воспламенялась.

3. Результаты экспериментов

3.1. Влияние размера пор на ускорение фронта пламени

Для анализа динамики скорости фронта пламени и его формы в каждом эксперименте регистрировался набор теневых фотографий, пример которых представлен на рис. 4а. По полученным изображениям строились x - t -диаграммы распространения фронта пламени (рис. 4б) и зависимости скорости распространения пламени от положения вдоль оси (рис. 4в). Например, для смеси с $ER = 0,5$ скорость увеличивается вдоль канала до 400 м/с и 270 м/с при использовании ППУ-10 и ППУ-20 соответственно. При этом скорость фронта пламени для ППУ-10 превышает скорость звука 375 м/с. Для других пористых материалов также регистрируется ускорение, и скорость в конце пористого участка составляет 70 м/с и 40 м/с для ППУ-40 и ППУ-80 соответственно. В случае

гладкого канала без пористого покрытия скорость пламени не превышала 20 м/с.

На рис. 5 представлены типовые осциллограммы датчиков давления, установленных на боковой стенке канала, для водородно-воздушной смеси $ER = 0,5$ для нескольких типов пористого покрытия. Датчики регистрируют последовательное повышение давления при прохождении фронта пламени вдоль оси канала, вызванное расширяющимися продуктами горения. При этом наибольшее повышение 0,6 МПа регистрировалось при использовании покрытия ППУ-10, а наименьшее 0,005 МПа для ППУ-40 и гладкого канала.

На рис. 6 показаны максимальные значения скорости фронта пламени и максимальные значения давления для ER в диапазоне 0,3–1,0 и различных пористых материалов.

Во всех случаях максимальная скорость пламени была пропорциональна размеру пор. Максимальное значение 1000 м/с регистрировалось при использовании ППУ-10 и ППУ-20.

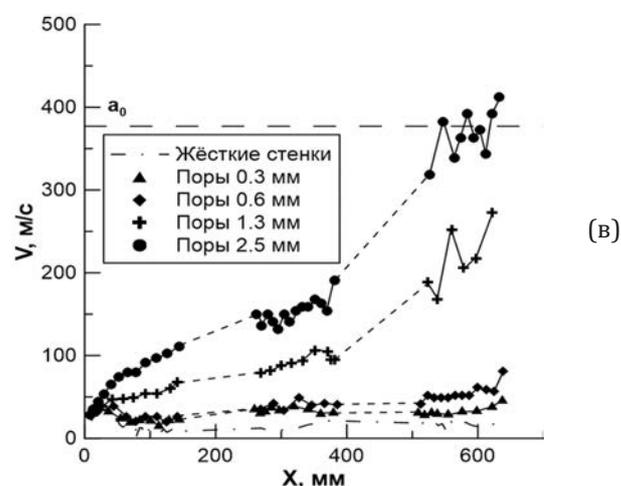
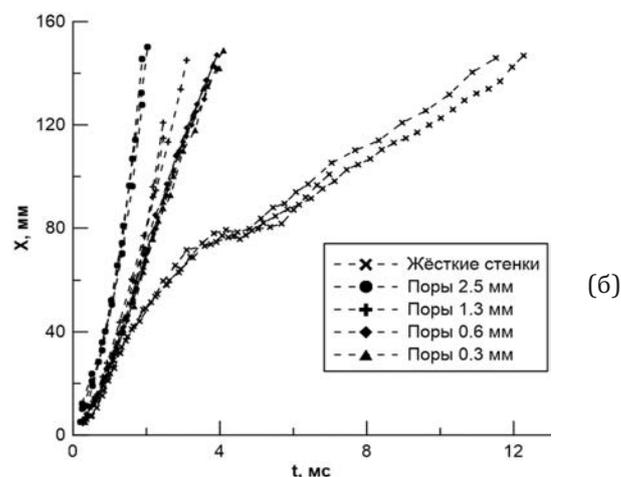
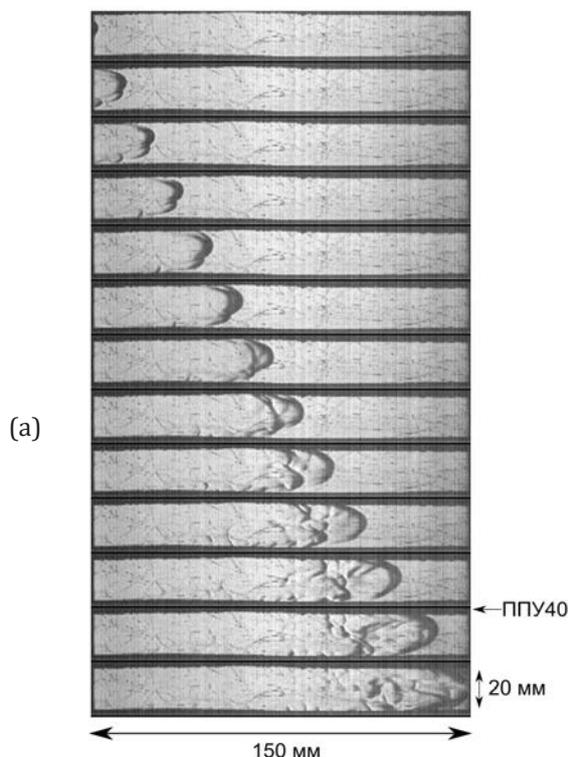


Рис. 4. (а) Последовательные теневые фотографии распространения фронта пламени слева направо в канале с пористым покрытием ППУ-40, временной интервал между кадрами 4 мс; (б) x - t -диаграммы распространения крайней правой точки фронта пламени для различных типов покрытия ППУ; (в) Эволюция скорости фронта пламени вдоль оси канала для $ER = 0.5$.

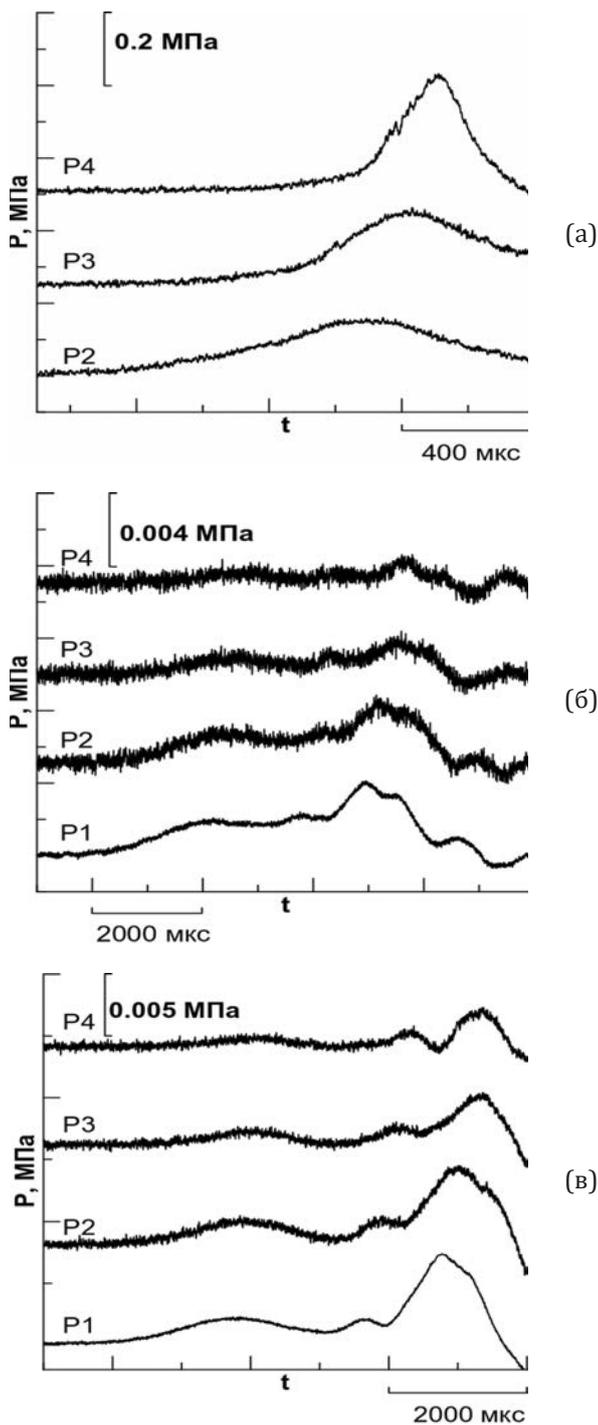


Рис. 5. Осциллограммы давления на боковой поверхности канала для покрытий (а) ППУ-10, (б) ППУ-40 и (в) гладкого канала. $ER = 0,5$. Датчики P1 – P4 на расстояниях 220 мм, 320 мм, 420 мм и 520 мм от искрового разрядника.

При использовании покрытий ППУ-40 и ППУ-80 максимальное значение скорости не превышало 300–400 м/с для стехиометрической смеси водорода с воздухом. Скорость пламени в гладком канале была ниже скорости пламени в пористом канале для всего диапазона концентраций водорода. Из рис. 6. видно, что

пористое покрытие на стенках канала приводит к значительному повышению давления, характерному при ускорении фронта пламени до скоростей, близких к скорости звука. Наибольшее повышение давления регистрировалось при использовании ППУ-10, которое составляло 0,35–1,5 МПа в диапазоне $ER = 0,6–1,0$. При использовании ППУ-20 максимальное давление варьировалось в диапазоне 0,05–0,5 МПа. При этом во всем диапазоне концентраций водорода давление в канале с гладкими стенками без покрытия было сравнимо с давлением в канале с ППУ-40 и ППУ-80 и варьировалось в диапазоне 0,003–0,02 МПа.

Существенными факторами, влияющими на распространение фронта пламени в канале с пористым покрытием, могут быть турбулизация потока и фронта пламени из-за взаимодействия газового потока с неоднородностями на пористом покрытии, и процессы горения водородно-воздушной смеси внутри пористого слоя. С увеличением размера пор

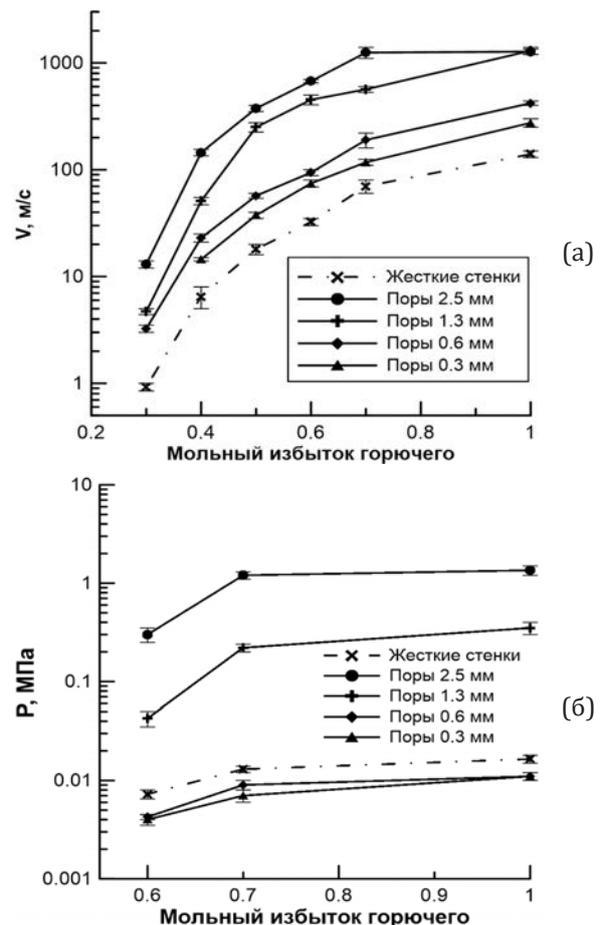


Рис. 6. (а) Максимальная скорость фронта пламени и (б) максимальное давление на боковой стенке канала в зависимости от типа покрытия и мольного избытка водорода (ER).

пламя может распространяться не только в центральной части канала, но и внутри пористого покрытия. Это приводит к дополнительному ускорению фронта пламени. Использование покрытия с большими порами (ППУ-10, ППУ-20) способствует распространению ударно-волновых возмущений внутри пористого покрытия, которые достигают твердой стенки и отражаются от нее с минимальной диссипацией внутри пористого слоя. Такое переотражение возмущений приводит к увеличению амплитуды давления на 2 порядка, как показано на рис. 6б.

С другой стороны, использование пористого покрытия ППУ-40 и ППУ-80 приводит к диссипации ударно-волновых возмущений. Использование покрытия с размерами пор 0,3-0,6 мм препятствует проникновению пламени внутрь пористого покрытия. Как было показано в работе [14], размер пор является одним из основных критериев распространения горения в пористой среде. Важным численным критерием в этом случае может быть число Пекле, определяющее возможность пламени распространяться внутри пористой среды. Согласно работе [14], нижний предел распространения пламени в пористой среде определяется числом Пекле Pe в диапазоне 45–65. В таблице 2 приведены оценки числа Пекле $Pe=ud/\alpha$ в различных пористых материалах в зависимости от состава смеси, где u – нормальная скорость пламени, d – размер пор, α – коэффициент теплопроводности.

Сравнивая числовые данные таблицы 2 и рисунок 6а, можно установить, что пористый материал существенно влияет на распространение пламени при числах Pe больших 40. Эти результаты сопоставлений отмечены звездочкой в таблице 2. В этом случае пористый материал действует как ряд препятствий, которые способствуют турбулизации потока перед фронтом пламени. При числах Пекле меньших

Таблица 2. Числа Пекле для разных типов покрытий ППУ и мольного избытка водорода ER

Материал	Мольный избыток водорода ER					
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,0
Числа Пекле Pe						
ППУ-10	42*	69*	112*	137*	175*	255*
ППУ-20	21	35	56*	68*	88*	128*
ППУ-40	10	17	28	35	44*	64*
ППУ-80	5	8	14	17	22	32

40 размер пор пористого материала практически не влияет на распространение пламени, поскольку пламя не может распространяться внутри пор, и этот пористый материал действует как гибкая поверхность.

3.2. Параметры неоднородностей на фронте пламени

Одним из факторов, влияющих на ускорение фронта пламени, являются неоднородности, генерируемые на нем. Они приводят к искривлению формы фронта пламени, увеличению площади реакции, увеличению энерговыделения и, как следствие, к ускорению пламени. При распространении горения в канале роль границ при генерации и развитии неоднородностей может быть существенной. Стоит отметить, что при иницировании горения у закрытого конца, когда расширяющиеся продукты сгорания толкают несгоревшую смесь перед фронтом пламени, основной вклад в динамику неоднородностей может вносить неустойчивость Дарье-Ландау. Определяющим параметром при этом является степень расширения θ или отношение плотностей несгоревшей смеси к сгоревшей при одинаковом давлении.

Характерный размер волн неустойчивости Дарье-Ландау λ_{DL} может быть оценен из уравнения, представленного в работе [47]:

$$\lambda_{DL} = \frac{4\pi\chi}{S_L} \left(1 + \frac{\theta+1}{(\theta-1)^2} \theta \ln \theta \right), \quad \chi = \frac{\kappa}{\rho C}$$

где χ – коэффициент температуропроводности смеси, S_L – скорость ламинарного пламени, θ – степень расширения, κ – теплопроводность смеси, ρ – плотность, C – удельная теплоемкость, Ze – число Зельдовича, а Le – число Льюиса.

В таблице 3 приведены расчетные длины волн неустойчивости Дарье-Ландау. Кроме того, увеличение ER от 0,3 до 1,0 приводит к увеличению реакционной способности смеси, увеличению конечной температуры продуктов сгорания и, как следствие, к увеличению скорости горения S_L . Изменяя скорость горения, состав смеси может влиять на характеристики длин волн неустойчивости Дарье-Ландау.

На рис. 7 представлены высокоскоростные теневые фотографии распространения фронта пламени в канале со сплошными стенками без пористого покрытия.

Таблица 3. Длины волн неустойчивости Дарье-Ландау λ_{DL} в зависимости от мольного избытка водорода ER

ER	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	1.0
λ_{DL} , mm	4.5	2.4	1.7	1.2	1.0	0.8	0.7

Как видно из рис. 7, форма фронта пламени является возмущенной, что говорит о формировании неоднородностей. Размеры таких неоднородностей для каждого состава смеси можно разделить на две группы, отличающиеся по размеру.

При этом неоднородности большего первого порядка составили $\lambda_1 \sim 15$ мм (ER = 0.3), $\lambda_1 \sim 12$ мм (ER = 0.4), $\lambda_1 \sim 7$ мм (ER = 0.5), $\lambda_1 \sim 5-6$ мм (ER = 0.7), $\lambda_1 \sim 4-6$ мм (ER = 1.0). Неоднородно-

сти меньшего второго порядка составили $\lambda_2 \sim 5$ мм (ER = 0.3), $\lambda_2 \sim 4-5$ мм (ER = 0.4), $\lambda_2 \sim 3-4$ мм (ER = 0.5), $\lambda_2 \sim 1,5-3$ мм (ER = 0.7), $\lambda_2 \sim 1-2$ мм (ER = 1.0).

Для сравнения на рис. 8 приведены высокоскоростные теневые фотографии распространения пламени в водородно-воздушных смесях в канале с пористым покрытием ППУ-10. Ускорение пламени в смесях с ER = 0,5 (рис. 8в), ER = 0,7 (рис. 8г) и ER = 1,0 (рис. 8д) сопровождается образованием ударных волн. Для смесей с ER = 0,5–1,0 увеличение размера пор может объяснить взаимодействие ударных волн с твердой стенкой под пористым покрытием. Это может привести к газодинамическому нагреву горючей смеси перед пламенем. Оценка длины волны неустойчивости Дарье-Ландау с

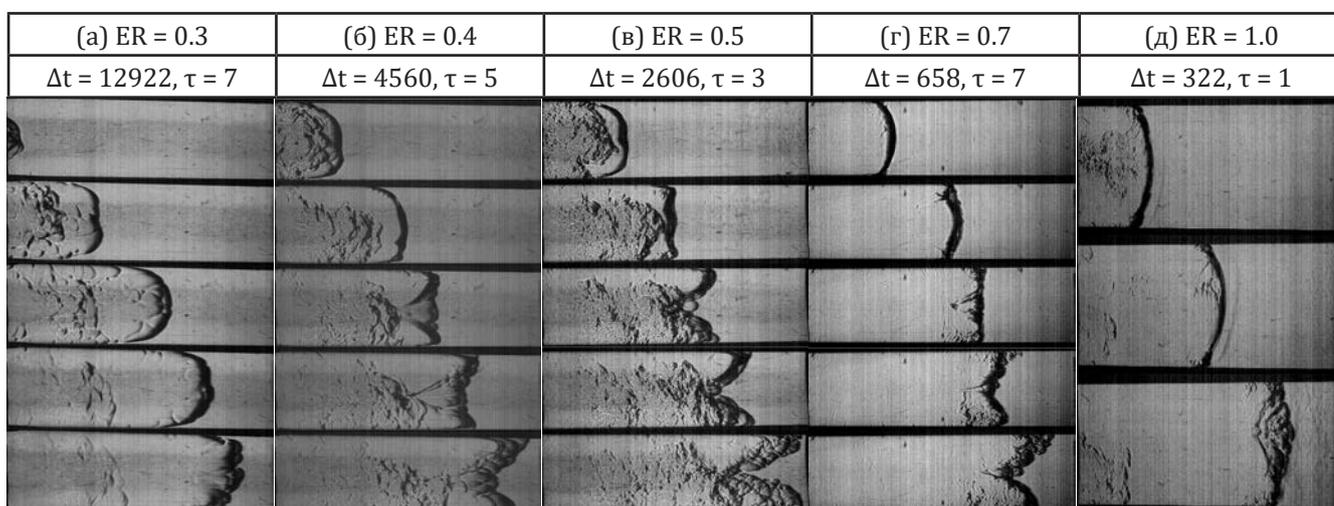


Рис. 7. Последовательные теневые фотографии распространения фронта пламени в водородно-воздушных смесях в канале без пористого покрытия на расстоянии 130–265 мм от искрового разрядника. Δt – временной интервал между кадрами в [мкс]; τ – время экспозиции в [мкс].

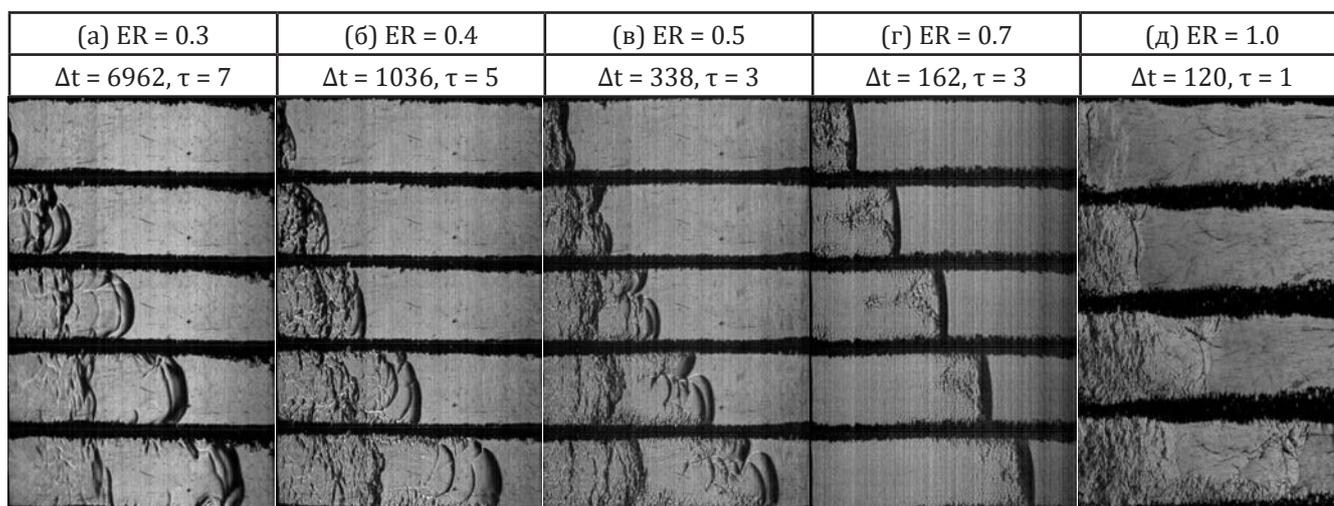


Рис. 8. Последовательные теневые фотографии распространения фронта пламени в водородно-воздушных смесях в канале с покрытием ППУ-10 на расстоянии 130–265 мм от искрового разрядника. Δt – временной интервал между кадрами в [мкс]; τ – время экспозиции в [мкс].

использованием уравнения (1) дает значение λ_{DL} , согласуемые с измеренными значениями λ_2 . Поэтому можно предположить, что в данном случае структура возмущений соответствует неустойчивости Дарье-Ландау. На рис. 9 приведены суммарные зависимости размеров неоднородностей на фронте пламени от среднего размера пор и количества пор на дюйм для ER в диапазоне 0,3–1,0. Средняя относительная погрешность измерения составила около 20%. На рисунке погрешность указана только для одного графика, чтобы не перегружать рисунок. Наибольшие значения неоднородностей λ_1 и λ_2 зафиксированы для гладкого канала с твердыми стенками. Как следует из рисунков, эти

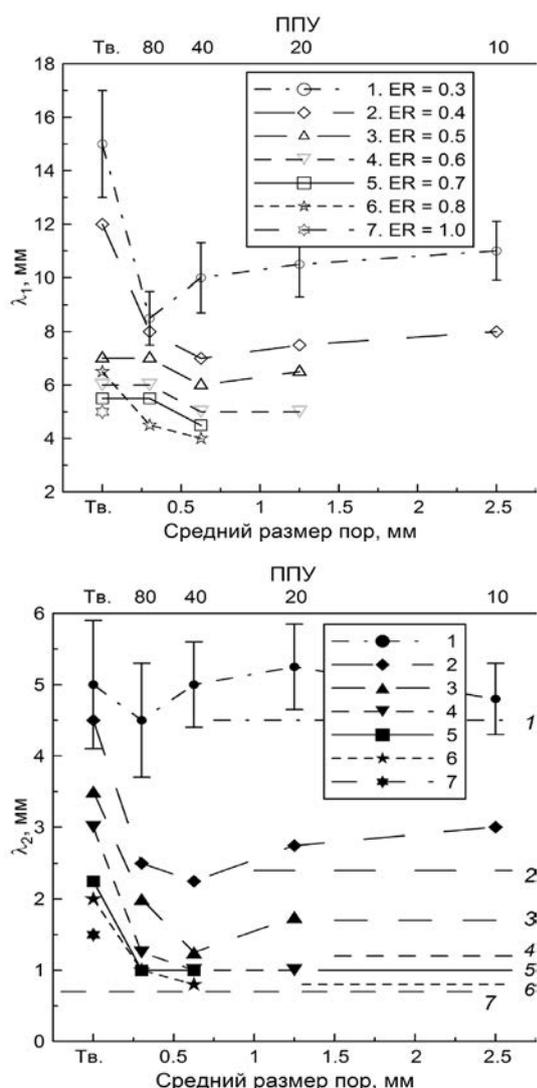


Рис. 9. Размеры неоднородностей на фронте пламени в водородно-воздушных смесях в зависимости от среднего размера пор и ER. Пустые символы соответствуют размеру λ_1 , закрашенные символы соответствуют размеру λ_2 . Горизонтальные линии соответствуют рассчитанной длине волн λ_{DL} , рассчитанному по соотношению (1).

размеры зависят от размера пор. Наименьшие измеренные значения были обнаружены для покрытий с размером пор 0,3–0,63 мм (ППУ-40, ППУ-80). В этих случаях величина возмущений второго порядка λ_2 сравнима с расчетным значением длин волн гидродинамической неустойчивости λ_{DL} . Величины возмущений увеличиваются с увеличением размера пор до 1,25–2,5 мм (ППУ-10, ППУ-20). Это увеличение может достигать 20–40%.

4. Заключение

Использование покрытия пористым пенополиуретаном является эффективным методом ускорения фронта пламени в канале как на стадии ламинарного горения и формирования тюльпанообразного пламени, так и на стадии турбулентного горения. Как показывают результаты, скорость фронта пламени в канале с пористым покрытием превышает скорость фронта пламени в гладком канале в 2–10 раза в зависимости от размера пор. Максимальное ускорение фронта пламени регистрировалось при размере пор 2,5 мм.

Характер влияния пористого покрытия на динамику скорости может быть определен с помощью числа Пекле, которое связывает размер пор, состав горючей смеси и сценарий ускорения фронта пламени. Было показано, что при числах Пекле, превышающих значение 40, регистрировалось многократное повышение скорости распространения пламени.

Однако, несмотря на интенсивное ускорение фронта пламени до 1000 м/с, перехода к детонационному горению не обнаружено. Наибольшие скорости пламени были обнаружены при использовании пористых материалов ППУ-10 (размер пор 2,5 мм) и ППУ-20 (1,3 мм). Использование указанных покрытий также приводило к увеличению давления, оказываемого продуктами горения на боковую поверхность канала. Интенсивность давления может достигать 1,4 МПа.

Определены размеры неоднородностей, генерируемых на фронте пламени. Показано, что эти размеры немонотонно зависят от среднего размера пор. Измеренные значения по размерам можно разделить на две группы: первого порядка $\lambda_1 \sim 4$ –15 мм и второго порядка $\lambda_2 \sim 1$ –5 мм. Обнаружено, что измеренные значения неоднородностей λ_2 сопоставимы с теоретическим значением длин волн гидродинамической неустойчивости λ_{DL} , рассчитанному по соотношению (1).

Благодарность

Работа выполнена в рамках Государственного задания для академических институтов, проект №АААА-А19-119020890034-5.

Литература

- [1]. Evans M., Given F., Richeson Jr.W. Effects of attenuating materials on detonation induction distances in gases // *Journal of Applied Physics*. – 1955. – Vol.26, №9. – P.1111–1113.
- [2]. Radulescu M.I., Lee J. The failure mechanism of gaseous detonations: experiments in porous wall tubes // *Combustion and Flame*. – 2002. – Vol.131, №1-2. – P.29-46.
- [3]. Ciccarelli G., Johansen C., Kellenberger M. High-speed flames and DDT in very rough-walled channels // *Combustion and Flame*. – 2013. – Vol.160, №1. – P.204–211.
- [4]. Houim R.W., Oran E. Effect of Surface Roughness on Deflagration-to-Detonation Transition in Submillimeter Channels // *26th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*. Boston, 2017. – P.6.
- [5]. Zhang B., Liu H., Yan B. Effect of acoustically absorbing wall tubes on the near-limit detonation propagation behaviors in a methane–oxygen mixture // *Fuel*. – 2019. Vol.236. – P.975–983.
- [6]. Xie Q. et al. Effects of silicone rubber and aerogel blanket-walled tubes on H₂/Air gaseous detonation // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2017. – Vol.49. – P.753–761.
- [7]. Rao Z. et al. Mitigation of H₂/air gaseous detonation via utilization of PAN-based carbon fibre felt // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2019. – Vol.44, №10. – P.5054–5062.
- [8]. Dupre G. et al. Propagation of detonation waves in an acoustic absorbing walled tube // *Progress in Astronautics and Aeronautics*. – 1988. – Vol.114. – P.248.
- [9]. Vasil'ev A. Near-limiting detonation in channels with porous walls // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 1994. – Vol.30, №1. – P.101–106.
- [10]. Teodorczyk A., Lee J. Detonation attenuation by foams and wire meshes lining the walls // *Shock Waves*. – 1995. – Vol.4, №4. – P.225–236.
- [11]. Guo C. et al. Experimental study of gaseous detonation propagation over acoustically absorbing walls // *Shock waves*. –2002. – Vol. 11, № 5. – 353–359.
- [12]. Makris A. et al. Influence of mixture sensitivity and pore size on detonation velocities in porous media // *Shock Waves*. –1995. – Vol.5, №1-2. – P.89–95.
- [13]. Slungaard T., Engebretsen T., Sønju O. The influence of detonation cell size and regularity on the propagation of gaseous detonations in granular materials // *Shock Waves*. – 2003. – Vol.12, №4. – P.301–308.
- [14]. Pinaev A., Lyamin G. Fundamental laws governing subsonic and detonating gas combustion in inert porous media // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 1989. – Vol.25, №4. – P.448–458.
- [15]. Bivol G.Y., Golovastov S.V., Golub V.V. Attenuation of the detonation wave in hydrogen–air mixture // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2016. – Vol.774, №1. – P.012086.
- [16]. Chen P. et al. Effects of metal foam meshes on premixed methane-air flame propagation in the closed duct // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2017. – Vol.47. – P.22–28.
- [17]. Golub V. et al. Influence of a heat-absorbing surface on the propagation of a hemispherical flame // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2018. – Vol.51. – P.1–7.
- [18]. Maeda S. et al. Effect of sandpaper-like small wall roughness on deflagration-to-detonation transition in a hydrogen–oxygen mixture // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2019. – Vol.37, №3. – P.3609–3616.
- [19]. Yan X., Yu J. Effect of aluminum silicate wool on the flame speed and explosion overpressure in a pipeline // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. – 2013. – Vol.49, №2. – P.153–158.
- [20]. Gubaidullin A., Britan A., Dudko D. Air shock wave interaction with an obstacle covered by porous material // *Shock Waves*. – 2003. – Vol.13, №1. – P.41–48.
- [21]. Jin K. et al. Effect of single-layer wire mesh on premixed methane/air flame dynamics in a closed pipe // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2020. – Vol.45, №5. – P.32664–32675.
- [22]. Surov V. Reflection of an air shock wave from a foam layer // *High Temperature*. – 2000. – Vol.38, №1. – P.97–105.
- [23]. Bivol G. et al. Efficiency of the application of disperse materials to attenuate reflected shock waves // *High Temperature*. – 2019. – Vol.57, №1. – P.130–132.
- [24]. Ram O., Sadot O. Analysis of the pressure buildup behind rigid porous media impinged by shock waves in time and frequency domains // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2015. – Vol.779. – P.842.
- [25]. Бабкин В.С., Дробышев В.И., Лаевский Ю.М., Потытняков С.И. Фильтрационное горение газов // *Физика горения и взрыва*. – 1983. – №2. – С.17-26.
- [26]. Прокофьев В.Г., Кирдяшкин А.И., Саламатов В.Г., Смоляков В.К. Нестационарное горение газа в инертном пористом слое // *Физика горения и взрыва*. – 2010. – №6. – С.32-38.
- [27]. Tsuruda T., Hirano T. Local flame front

- disturbance development under acceleration // *Combustion and flame*. – 1991. – Vol.84, №1–2. – P.66–72.
- [28]. Kadowaki S., Suzuki H., Kobayashi H. The unstable behavior of cellular premixed flames induced by intrinsic instability // *Proceedings of the combustion institute*. – 2005. – Vol.30, №1. – P.169–176.
- [29]. Altantzis C. et al. Detailed numerical simulations of intrinsically unstable two-dimensional planar lean premixed hydrogen/air flames // *Proceedings of the combustion institute*. – 2011. – Vol.33, №1. – P.1261–1268.
- [30]. Anikin N. et al. Effect of Hydrodynamic Instabilities on the Development of Hydrogen-Air Flames // *International Symposium on Shock Waves*. – 2017. – P.261–268.
- [31]. Clanet C, Searby G. On the “tulip flame” phenomenon // *Combustion and flame*. – 1996. – Vol.105, №1–2. – P.225–238.
- [32]. Bychkov V. et al. Flame acceleration in the early stages of burning in tubes // *Combustion and Flame*. – 2007. – Vol.150, №4. – P.263–276.
- [33]. Akkerman V., Law C., Bychkov V. Self-similar accelerative propagation of expanding wrinkled flames and explosion triggering // *Physical Review E*. – 2011. – Vol.83, №2. – P.026305.
- [34]. Molkov V., Makarov D., Schneider H. Hydrogen-air deflagrations in open atmosphere: large eddy simulation analysis of experimental data // *International journal of hydrogen energy*. – 2007. – Vol.32, №13. – P.2198–2205.
- [35]. Bauwens C., Bergthorson J., Dorofeev S.B. Modeling the formation and growth of instabilities during spherical flame propagation // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2019. – Vol.37, №3. – P.3669–3676.
- [36]. Bychkov V, Liberman M. Stability and the fractal structure of a spherical flame in a self-similar regime // *Physical review letters*. – 1996. – Vol.76, №15. – P.2814.
- [37]. Kuznetsov M. et al. Experimental study of 2d-instabilities of hydrogen flames in flat layers // *Proc. of 25th ICDEERS*. – 2015. – P.6.
- [38]. Yanez J., Kuznetsov M., Grune J. Flame instability of lean hydrogen-air mixtures in a smooth open-ended vertical channel // *Combustion and Flame*. – 2015. – Vol.162, №7. – P.2830–2839.
- [39]. Yáñez J., Kuznetsov M., Redlinger R. The acoustic-parametric instability for hydrogen-air mixtures // *Combustion and flame*. – 2013. Vol.160, №10. – P.2009–2016.
- [40]. Veiga-López F. et al. Thermoacoustic analysis of lean premixed hydrogen flames in narrow vertical channels // *Fuel*. – 2020. – Vol.278. – P.118212.
- [41]. Valiev D. et al. Influence of gas compression on flame acceleration in the early stage of burning in tubes // *Combustion and flame*. – 2013. – Vol.160, №1. – P.97–111.
- [42]. Володин В.В. и др. Распространение турбулентного фронта пламени в водородо-воздушных смесях // *Горение и плазмохимия*. – 2016. – №4. – С.269–278.
- [43]. Golub V. et al. Influence of heat absorption on hydrogen-air flame instability // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2019. – Vol.109. – P.109845.
- [44]. Elyanov A, Golub V, Volodin V. Conditions for the development of Rayleigh-Taylor instability on the spherical flame front // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2018. – Vol.1129, №1. – P.012011.
- [45]. Головастов С.В., Самойлова А.А., Александрова Д.М. Оценка тепловых потерь на фронте детонационной волны при движении вдоль металлической пористой поверхности // *Аэрокосмический научный журнал*. – 2016. – Т.2, №5. – С.1–15.
- [46]. Golovastov S.V., Bivol G.Y., Alexandrova D. Evolution of detonation wave and parameters of its attenuation when passing along a porous coating // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2019. – Т.100. – С.124–134.

References

- [1]. Evans M, Given F, Richeson Jr W (1955) *Journal of Applied Physics* 26:1111–1113. <https://doi.org/10.1063/1.1722162>
- [2]. Radulescu M, Lee J (2002) *Combustion and Flame* 131(1-2):29–46. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(02\)00390-5](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(02)00390-5)
- [3]. Ciccarelli G, Johansen C, Kellenberger M (2013) *Combustion and Flame* 160(1):204–211. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.08.009>
- [4]. Houim R, Oran E (2017) Effect of Surface Roughness on Deflagration-to-Detonation Transition in Submillimeter Channels. 26th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, Boston, P.6.
- [5]. Zhang B, Liu H, Yan B (2019) *Fuel* 236:975–983. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.083>
- [6]. Xie Q et al (2017) *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 49:753–761. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.01.003>
- [7]. Rao Z et al (2019) *International Journal of Hydrogen Energy* 44:5054–5062. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.196>
- [8]. Dupre G et al (1988) *Progress in Astronautics and Aeronautics* 114:248. <https://doi.org/10.2514/4.865886>
- [9]. Vasil'ev A (1994) *Combustion, Explosion and Shock Waves* 30:101–106. <https://doi.org/10.1007/BF00787892>
- [10]. Teodorczyk A, Lee J (1995) *Shock Waves*

- 4(4):225-236. <https://doi.org/10.1007/BF01414988>
- [11]. Guo C et al (2002) Shock waves 11:353-359. <https://doi.org/10.1007/s001930100113>
- [12]. Makris A et al (1995) Shock Waves 5:89-95. <https://doi.org/10.1007/BF02425039>
- [13]. Slungaard T, Engebretsen T, Sønju O (2003) Shock Waves 12:301-308. <https://doi.org/10.1007/s00193-002-0166-x>
- [14]. Pinaev A, Lyamin G (1989) Combustion, Explosion and Shock Waves 25:448-458. <https://doi.org/10.1007/BF00751555>
- [15]. Bivol G, Golovastov S, Golub V (2016) Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing 774(1): 012086. doi:10.1088/1742-6596/774/1/012086
- [16]. Chen P, Huang F, Sun Y, Chen X (2017) Journal of Loss Prevention in the Process Industries 47:22-28. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.02.015>
- [17]. Golub V et al (2018) Journal of Loss Prevention in the Process Industries 51:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.11.003>
- [18]. Maeda S et al (2019) Proceedings of the Combustion Institute 37:3609-3616. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.07.119>
- [19]. Yan X, Yu J (2013) Combustion, Explosion, and Shock Waves 49:153-158. <https://doi.org/10.1134/S0010508213020044>
- [20]. Gubaidullin A, Britan A, Dudko D (2003) Shock Waves 13:41-48. <https://doi.org/10.1007/s00193-003-0193-2>
- [21]. Jin K et al (2020) International Journal of Hydrogen Energy 45:32664-32675. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.159>
- [22]. Surov V (2000) High Temperature 38:97-105. <https://doi.org/10.1007/BF02755574>
- [23]. Bivol G et al (2019) High Temperature 57:130-132. <https://doi.org/10.1134/S0018151X19010024>
- [24]. Ram O, Sadot O (2015) Journal of Fluid Mechanics 779:842. <https://doi.org/10.1017/jfm.2015.463>
- [25]. Babkin V et al (1983) Combustion, Explosion and Shock Waves 19(2): 147-155. <https://doi.org/10.1007/BF00789228>
- [26]. Prokof'ev V et al (2010) Combustion, Explosion, and Shock Waves 46(6):641-646. <https://doi.org/10.1007/s10573-010-0084-7>
- [27]. Tsuruda T, Hirano T (1991) Combustion and flame 84:66-72. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(91\)90038-D](https://doi.org/10.1016/0010-2180(91)90038-D)
- [28]. Kadowaki S, Suzuki H, Kobayashi H (2005) Proceedings of the combustion institute 30:169-176. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2004.07.041>
- [29]. Altantzis C et al (2011) Proceedings of the combustion institute 33:1261-1268. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.06.082>
- [30]. Anikin N et al (2017) International Symposium on Shock Waves 261. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91020-8_29
- [31]. Clanet C, Searby G (1996) Combustion and flame 105:225-238. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(95\)00195-6](https://doi.org/10.1016/0010-2180(95)00195-6)
- [32]. Bychkov V et al (2017) Combustion and Flame 150:263-276. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.01.004>
- [33]. Akkerman V, Law C, Bychkov V (2011) Physical Review E 83:026305. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.83.026305>
- [34]. Molkov V, Makarov D, Schneider H (2007) International journal of hydrogen energy 32:2198-2205. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.04.021>
- [35]. Bauwens C, Bergthorson J, Dorofeev S (2019) Proceedings of the Combustion Institute. 37:3669-3676. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.07.098>
- [36]. Bychkov V, Liberman M (1996) Physical review letters 76:2814. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.76.2814>
- [37]. Kuznetsov M (2015) Proc. of 25th ICDERS 6.
- [38]. Yanez J, Kuznetsov M, Grune J (2015) Combustion and Flame 162:2830-2839. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.04.004>
- [39]. Yáñez J, Kuznetsov M, Redlinger R (2013) Combustion and flame 160:2009-2016. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2013.04.026>
- [40]. Veiga-López F et al (2020) Fuel. 278:118212. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118212>
- [41]. Valiev D et al (2013) Combustion and flame 160:97-111. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.09.002>
- [42]. Volodin V et al (2016) Combustion and plasma chemistry 4:269-278. (In Russian)
- [43]. Golub V et al (2019) Experimental Thermal and Fluid Science 109:109845. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2019.109845>
- [44]. Elyanov A, Golub V, Volodin V (2018) Journal of Physics: Conference Series 1129:012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1129/1/012011>
- [45]. Golovastov S, Samoilova A, Alexandrova D (2016) Aerospace Scientific Journal of the Bauman 5:1-15. DOI: 10.7463/aersp.0516.0849886
- [46]. Golovastov S, Bivol G., Alexandrova D (2019) Experimental Thermal and Fluid Science 100:124-134. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.08.030>

Propagation of a hydrogen-air flame front in channels covered with porous polyurethane foam

G.Yu. Bivol, S.V. Golovastov, V.V. Golub

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Annotation

An acceleration of flame in a hydrogen-air mixture in a channel, the inner surface of which is covered with porous polyurethane foam, is experimentally investigated. The molar excess of the hydrogen varied from 0.3 to 1.0, and the pore size varied from 0.3 mm to 2.5 mm. The flame front propagated in a half-open channel at atmospheric pressure and room temperature. Using the Schlieren method and a high-speed camera, the propagation velocities of the flame front were determined depending on the pore size and composition of the mixture. The maximum recorded velocity of the flame front was 1600 m/s for a maximum pore size of 2.5 mm. The dimensions of the inhomogeneities generated at the flame front were determined. The relationship with the size of the Darrieus-Landau instability has been established. By the piezoelectric transducers, the pressure exerted by the combustion products on the lateral surface of the channel was determined. The critical Peclet numbers were found at which acceleration of the flame front and an increase in pressure behind the flame front are registered.

Keywords: combustion, hydrogen, porous coating, polyurethane, Darrieus-Landau instability

Кеукті полиуретанды көбікпен жабылған арналарда сутегі-ауа жалыны майданының таралуы

Г.Ю. Бивол, С.В. Головастов, В.В. Голуб

РФА Жоғары Температуралар Бірлескен Институты, Мәскеу, Ресей

Аңдатпа

Ішкі беті кеукті полиуретанды көбікпен қапталған арнадағы сутегі-ауа қоспасындағы жалынның үдеуі эксперименталды түрде зерттеледі. Сутектің молярлық асып кетуі 0,3 - тен 1,0 - ге дейін, ал кеуктің мөлшері 0,3 мм - ден 2,5 мм - ге дейін өзгерді. Жалын фронты атмосфералық қысым мен бөлме температурасында жартылай ашық арнада таралды. Газдық-динамикалық процестерді тіркеудің көлеңкелі әдісі мен жоғары жылдамдықтағы камераны қолдана отырып, жалын фронтының таралу жылдамдығы кеуктің мөлшері мен қоспаның құрамына байланысты анықталады. Жалынның алдыңғы максималды жылдамдығы 1600 м/с, максималды тесік өлшемі 2,5 мм. Жалын фронтында пайда болатын біртектіліктің өлшемдері анықталады. Олардың Дарриус-Ландау тұрақсыздығының мөлшерімен байланысы орнатылды. Пьезоэлектрлік датчиктердің көмегімен жану өнімдерінің арнаның бүйір бетіне түсіретін қысымы анықталды. Жалын фронтының үдеуі мен жалынның артындағы қысымның жоғарылауы сипатталатын сыни Пекле сандары белгіленген.

Кілт сөздер: жану, сутегі, кеукті жабын, полиуретан, Дарриус-Ландау тұрақсыздығы