

УДК 544.452.2

ГОРЕНИЕ ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В КАНАЛЕ ПРИ КОЛЬЦЕВОМ ВОСПЛАМЕНЕНИИ

© 2022 г. В. В. Володин, В. В. Голуб*, А. Е. Ельянов

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

**E-mail: golub@ihed.ras.ru*

Поступило в редакцию 07.07.2022 г.

После доработки 10.08.2022 г.

Принято к публикации 13.10.2022 г.

Экспериментально исследована динамика горения водородно-воздушных смесей с содержанием водорода 15 и 20 об. % в каналах круглого сечения при центральном и кольцевом воспламенении. При исследовании кольцевого воспламенения варьировалась ширина щели кольца. Динамика и структура фронта пламени определены при помощи теневой визуализации и высокоскоростной видеосъемки. Установлена оптимальная величина размера кольцевой щели, обеспечивающая максимальную скорость фронта пламени на начальной стадии распространения. Также получено замедление пламени перед переходом к квазиплоскому фронту. Полученные результаты могут быть использованы при разработке перспективных энергетических установок с использованием как горения, так и детонации водородно-воздушных смесей.

DOI: 10.31857/S0040364422050155

ВВЕДЕНИЕ

В связи с сокращением запасов ископаемого топлива и повышением экологических требований к промышленным и транспортным объектам в мире становится актуальным переход на альтернативные энергоносители. Водород является одним из самых перспективных чистых видов топлива на данный момент [1]. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 октября 2020 г. № 2634-р [2] утвержден план мероприятий по развитию водородной энергетики, направленный на увеличение производства и расширение сферы применения водорода в качестве экологически чистого энергоносителя.

В работе [3] представлен обзор основных типов и конструкций водородно-кислородных энергетических установок. Применение водородно-кислородных камер непрерывного горения рассматривается в [4–6]. В [7] численно проанализированы режимы горения водорода при его использовании в качестве топлива в камере двигателя внутреннего сгорания (ДВС). В зависимости от размеров и конструкции энергетических установок с использованием водорода необходимо как уменьшение, так и увеличение скорости фронта пламени. В [8, 9] исследованы методы предотвращения нештатных режимов горения в камере ДВС, включая детонационно-подобные.

Результаты аналогичных исследований опубликованы в зарубежных журналах. В [10] показана возможность предотвращения быстрых режимов

горения в камере ДВС с помощью разбавления горючей смеси продуктами сгорания, уменьшив тем самым детонационно-подобный эффект. Работы [11, 12] также посвящены оптимизации режима горения в камере сгорания водородного ДВС.

Задача ускорения пламени в каналах обсуждается на протяжении долгого времени применительно как к взрывобезопасности, так и к энергетическому применению горения и детонации газовых смесей. Например, в работе [13] показан “градиентный” механизм ускорения пламени и формирования взрывных режимов горения. В [14, 15] описан и математически сформулирован механизм распространения “пальцеобразного” пламени. Для сокращения преддетонационного расстояния в каналах часто применяются спирали Шёлкина [16], искривления канала [17] или закрученные ленты [18]. Однако подобные способы ускорения фронта пламени требуют канала длиной, превышающей 10 дм.

Целью настоящей работы являются исследование обратного пальцеобразного пламени, описанного в [19], и определение влияния ширины зазора при кольцевом воспламенении в полуоткрытом канале круглого сечения на ускорение фронта пламени водородно-воздушных смесей.

ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты по горению водородно-воздушных смесей при кольцевом воспламенении проводились в полуоткрытом канале круглого

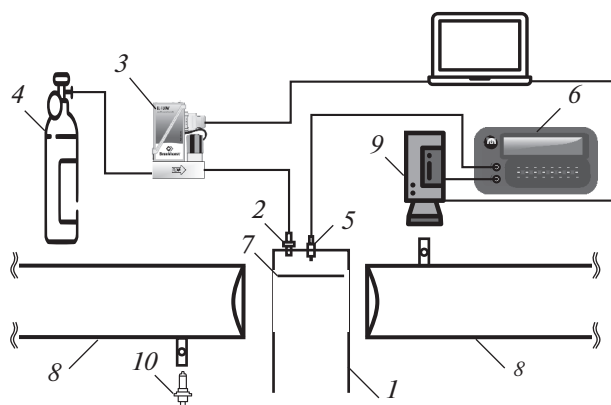


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – полуоткрытый канал; 2 – газовый штуцер; 3 – расходомер; 4 – баллон с горючей смесью; 5 – искровой разрядник; 6 – генератор импульсов; 7 – пластина, обеспечивающая кольцевое зажигание; 8 – теневой прибор; 9 – высокоскоростная камера; 10 – ксеноновая лампа.

сечения 1, изготовленном из органического стекла внутренним диаметром 54 мм, длиной 500 мм и с толщиной стенок 3 мм (рис. 1). Объем канала составил 1 л. Газовая смесь подавалась через штуцер 2, установленный в закрытом конце. Объем газа, необходимый для продувания и заполнения канала, контролировался расходомером Bronkhorst EI-Flow 3 и составлял 5 л. Газовая смесь приготавливалась не менее чем за 24 ч перед экспериментом в газовом баллоне 4 объемом 40 л при избыточном давлении 5 атм.

Искровое воспламенение производилось с использованием свечи зажигания 5, установленной по центру закрытого конца канала. Свеча через коммутатор подключалась к генератору импульсов Г5-63 6. Для формирования различных зазоров кольцевого зажигания в канал помещались пластины 7 диаметром меньше внутреннего диаметра трубы. Пластины оборудованы специальными упорами по краям – для симметричного расположения пластины в трубе, а также с торца – для обеспечения повторяемости расстояния между свечой зажигания и пластиной. В качестве основного параметра, определяющего размер щели, выбрано отношение σ/S в процентах, где σ – площадь пластины, формирующей кольцевую щель; S – площадь поперечного сечения канала.

Положение и форма фронта пламени определялись с помощью теневой визуализации прибором ИАБ-451 8 и высокоскоростной съемкой видеокамерой Phantom VEO 710S 9. Видеосъемка запускалась тем же сигналом генератора 5, что и искра зажигания. Таким образом осуществлялась синхронизация: первые кадры во всех экспери-

ментах соответствуют одинаковому моменту времени. В качестве источника света теневого прибора использовалась ксеноновая лампа 10. В связи с тем, что стенки трубы из оргстекла 1 значительно преломляют плоскопараллельный световой поток, визуализация по всему сечению трубы невозможна. Для устранения этой проблемы в канале вырезаны окна длиной 150 мм, в которые установлена полиэтиленовая пленка толщиной 0.3 мм. Эти окна позволили визуализировать фронт пламени по всему сечению канала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для исследования влияния ширины кольцевого зазора при кольцевом воспламенении на динамику распространения пламени была проведена серия экспериментов в водородно-воздушных смесях с содержанием водорода 15 и 20 об. %. При этом ширина кольцевого зазора, через который происходит воспламенение, равна 0.5, 1, 1.5, 2, 3 и 4.5 мм, т.е. при значениях σ/S , составляющих 96.3, 92.7, 89.2, 85.7, 79.0 и 69.4% соответственно. Также для каждой смеси были проведены эксперименты при воспламенении в центре закрытого конца канала.

На рис. 2 представлены зависимости положения фронта пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 об. % вдоль оси трубы от времени при центральном и кольцевом ($\sigma/S = 89.2\%$) воспламенении. При центральном воспламенении фронт пламени вытягивается в осевом направлении, что принято называть пальцеобразным пламенем. Увеличение скорости в осевом направлении связано с вытеснением горючей смеси продуктами сгорания в сторону открытого конца канала. В радиальном направлении пламя движется со скоростью, близкой к нормальной скорости ламинарного пламени. Общая площадь пламени растет до момента гашения цилиндрической области пламени при достижении стенки. На теневых фотографиях (фото *a*, *b* на рис. 2) видно формирование ячеистой структуры. При кольцевом воспламенении фронт пламени вытягивается вдоль стенок, что принято называть обратным пальцеобразным пламенем. При таком распространении пламя вытягивается вдоль стенок. В радиальном направлении пламя сходится к оси канала (фото *c* на рис. 2). Длина цилиндрической области пламени увеличивается, а радиус сокращается, что приводит к постепенному уменьшению массовой скорости горения. После “схлопывания” фронта на оси в момент времени 0.014 с пламя продолжает распространяться в осевом направлении с меньшей скоростью (фото *d* на

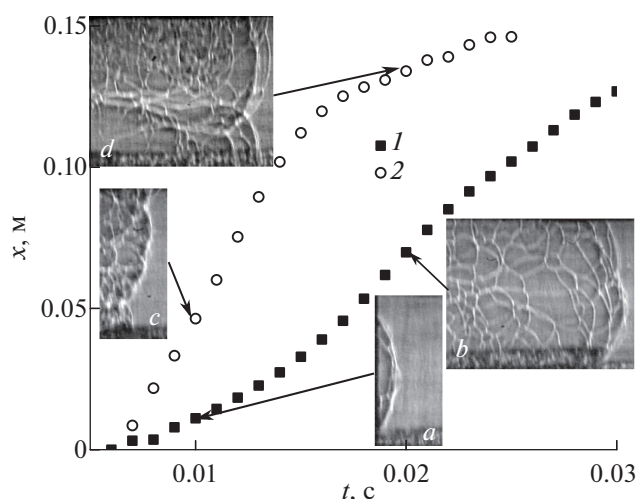


Рис. 2. Зависимости положения фронта пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 об. % вдоль оси трубы от степени перекрытия (1) и кольцевом ($\sigma/S = 89.2\%$) (2) воспламенении.

рис. 2). Детально эти режимы распространения пламени разобраны в [19].

Эксперименты, представленные в работе [19], проводились с шириной кольцевого зазора 5 мм ($\sigma/S = 66.4\%$). Аналитическое решение построено в приближении воспламенения в кольцевой области нулевой ширины. В условиях реального канала зажигание происходит в расположенной перед пластиной форкамере. К моменту зажигания в исследуемом канале форкамера заполнена продуктами сгорания при повышенном давлении, которое зависит от ширины зазора. Давление в форкамере определяет скорость струи продуктов сгорания, которая задает начальную осевую скорость пламени. Таким образом, уменьшение ширины зазора сокращает площадь поперечного сечения, но повышает скорость зажигающей кольцевой струи.

На рис. 3 представлены значения максимальной осевой скорости фронта пламени в канале при центральном и кольцевом воспламенении v , нормированные на скорость плоского пламени $S_L\Theta$ (где S_L – нормальная скорость пламени, Θ – коэффициент расширения продуктов сгорания). Видно, что влияние степени перекрытия на скорость фронта пламени немонотонно и имеет максимум при $\sigma/S = 92.7\%$.

“Схлопывание” фронта обратного пальцеобразного пламени приводит к его замедлению. Отношения скорости фронта пламени в конце видимой области к максимальной скорости фронта пламени при центральном воспламенении и кольцевом воспламенении с различной шириной

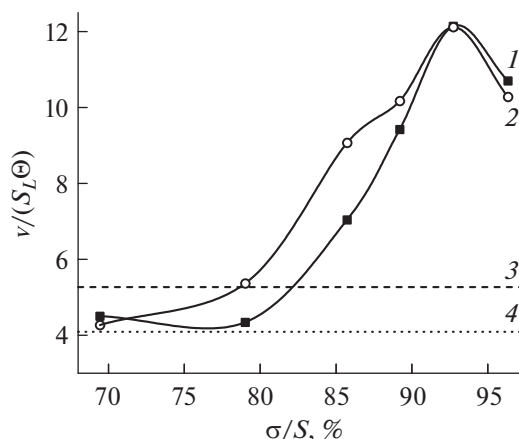


Рис. 3. Зависимость максимальной приведенной скорости распространения фронта пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 (1, 3) и 20 об. % (2, 4) вдоль оси трубы от степени перекрытия (1, 2); линии 3, 4 – максимальные приведенные скорости при центральном зажигании.

щелевого зазора для водородно-воздушных смесей с содержанием водорода 15 и 20 об. % представлены в таблице. Согласно аналитическим моделям, предложенным в [19], фронты пальцеобразного и обратного пальцеобразного пламени существуют на расстоянии от точки воспламенения до $l \leq \Theta R_c$, где R_c – радиус канала. Так, в канале диаметром 54 мм для водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 об. % $l \approx 125$ мм. Данная величина позволяет зарегистрировать момент “схлопывания” с использованием описанной экспериментальной установки, и, следовательно, оценить скорость распространения фронта пламени в этот момент, а также ее максимальное значение. Обнаружено, что в смеси с содержанием водорода 15 об. % замедление фронта пламени при кольцевом воспламенении с $\sigma/S = 85.7\%$ в 5.9 раз больше, чем при центральном воспламенении. В смеси с содержанием водорода 20 об. % эффект выражен

Отношения скорости фронта пламени в конце видимой области к максимальной скорости фронта пламени

Тип воспламенения	$\sigma/S, \%$	15 об. %	20 об. %
Центральное		0.47	0.93
Кольцевое	96.3	0.17	0.67
Кольцевое	92.7	0.31	0.67
Кольцевое	89.2	0.10	0.66
Кольцевое	85.7	0.08	0.66
Кольцевое	79.0	0.28	0.68
Кольцевое	69.4	0.36	0.86

слабее, что связано с более высокой (более чем в три раза по теории взрыва в частично открытом объеме) скоростью выходящей из форкамеры воспламеняющей струи. При этом достигается снижение скорости фронта пламени на треть.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что кольцевое воспламенение водородно-воздушной смеси в канале приводит к повышенному до трех раз ускорению фронта пламени на начальной стадии распространения по сравнению с центральным. Отношение площади пластины, формирующей кольцевую щель, к площади поперечного сечения канала σ/S , равное 92.7%, обеспечивает максимальную скорость фронта пламени на участке канала длиной до трех диаметров для фронта пламени водородно-воздушных смесей с 15 и 20 об. % содержанием водорода. Определены отношения скоростей фронта пламени в 15%-ной водородно-воздушной смеси в момент схлопывания обратного пальцеобразного пламени к максимальным скоростям фронта пламени при центральном и кольцевом воспламенении. Получено снижение скорости пламени при кольцевом воспламенении в 5.9 раз по сравнению с центральным. Результаты исследования показывают, что кольцевое воспламенение может быть использовано как для снижения детонационно-подобного эффекта при работе двигателей внутреннего сгорания, так и для увеличения начальной скорости фронта на ранних этапах ускорения пламени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chien F., Kamran H.W., Albashar G., Iqbal W. Dynamic Planning, Conversion, and Management Strategy of Different Renewable Energy Sources: a Sustainable Solution for Severe Energy Crises in Emerging Economies // Int. J. Hydrogen Energy. 2021. V. 46. P. 7745.
2. План мероприятий “Развитие водородной энергетики в Российской Федерации до 2024 года”, 2020. <http://government.ru/docs/40703/>
3. Счастливец А.И., Дуников Д.О., Борзенко В.И., Шматов Д.П. Водородно-кислородные установки для энергетики // ТВТ. 2020. Т. 58. № 5. С. 809.
4. Забайкин В.А. Горение водорода в условиях высокотемпературного сверхзвукового потока // ТВТ. 2017. Т. 55. № 4. С. 582.
5. Аминов Р.З., Егоров А.Н. Исследование процессов сгорания водорода в кислородной среде // ТВТ. 2018. Т. 56. № 5. С. 775.
6. Аминов Р.З., Счастливец А.И., Байрамов А.Н. Экспериментальная оценка состава генерируемого пара при сжигании водорода в кислороде // ТВТ. 2020. Т. 58. № 3. С. 437.
7. Киверин А.Д., Смыгалина А.Е. Механизмы развития интенсивных динамических процессов при сжигании водорода в камерах сгорания ДВС // ТВТ. 2022. Т. 60. № 1. С. 103.
8. Зайченко В.М., Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Цыплаков А.И. Горение обедненных смесей на основе водорода в двигателе с искровым зажиганием // Изв. РАН. Энергетика. 2018. № 4. С. 87.
9. Кавтарадзе Р.З., Зеленцов А.А., Краснов В.М. Локальный теплообмен в камере сгорания дизеля, конвертированного на природный газ и водород // ТВТ. 2018. Т. 56. № 6. С. 924.
10. Szwaja S. Dilution of Fresh Charge for Reducing Combustion Knock in the Internal Combustion Engine Fueled with Hydrogen Rich Gases // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. V. 44. P. 19017.
11. Benajes J., Novella R., Gomez-Soriano J., Martinez-Hernandez P.J., Libert C., Dabiri M. Evaluation of the Passive Pre-chamber Ignition Concept for Future High Compression Ratio Turbocharged Spark-ignition Engines // Appl. Energy. 2019. V. 248. P. 576.
12. Verhelst S., Wallner T. Hydrogen-fueled Internal Combustion Engines // Prog. Energy Combust. Sci. 2009. V. 35. P. 490.
13. Зельдович Я.Б., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М., Сивашинский Г.И. О возникновении детонации в неравномерно нагретом газе // ПМТФ. 1970. № 2. С. 76.
14. Саламандра Г.Д., Баженова Т.В., Набоко И.М. Формирование детонационной волны при горении газа в трубах // ЖТФ. 1959. Т. 29. № 11. С. 1354.
15. Demir S., Bychkov V., Chalagalla S.H.R., Akkerman V. Towards a Predictive Scenario of a Burning Accident in a Mining Passage // Combust. Theory Modell. 2017. V. 21. P. 997.
16. Дицент В., Щёлкин К.И. Быстрое горение в шероховатых трубах // ЖФХ. 1945. Т. 19. № 4–5. С. 100.
17. Фролов С.М., Аксенов В.С., Шамшин И.О. Распространение ударных волн и детонации в каналах с U-образными поворотами предельной кривизны // ЖХФ. 2008. Т. 27. № 10. С. 5.
18. Головастов С.В., Микушкин А.Ю., Голуб В.В. Переход горения в детонацию в спиралевидных каналах // ЖТФ. 2017. Т. 87. № 10. С. 1489.
19. Elyanov A., Golub V., Volodin V. Premixed Hydrogen-air Flame Front Dynamics in Channels with Central and Peripheral Ignition // Int. J. Hydrogen Energy. 2022. V. 47. P. 22602.