

ВЛИЯНИЕ ОБЪЕМА ВОДОРОДНО-ВОЗДУШНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ, ТИПА И ЭНЕРГИИ ИНИЦИИРОВАНИЯ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОГО ФРОНТА ПЛАМЕНИ

В.В. Володин¹

vlad@ihed.ras.ru

В.В. Голуб¹

golub@ihed.ras.ru

А.Е. Ельянов^{1,2}

elyanov14@physics.msu.ru

А.Е. Коробов¹

andrusha.kor@gmail.com

А.Ю. Микушкин^{1,3}

mikushkin-anton@yandex.ru

В.А. Петухов¹

petukhov@ihed.ras.ru

¹ ОИВТ РАН, Москва, Российская Федерация

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация

³ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Экспериментально исследовано сферическое распространение фронта пламени в свободном пространстве, заполненном водородно-воздушной смесью с содержанием водорода 15 %. Эксперименты проводились в латексных оболочках. Инициирование пламени осуществлялось искрой энергией 1 мДж либо взрывом нихромовой проволоочки с энергией 5 Дж в центре объема. Видеорегистрация фронта пламени в оболочке объемом 7 м³ и более проводилась инфракрасной камерой *InfraTec ImageIR 8320* со спектральным диапазоном 2,0...5,7 мкм и частотой 300 кадр/с. В оболочке объемом 0,003 м³ и менее визуализация выполнялась теневым прибором ИАБ-451. Полученные изображения регистрировались камерой видимого диапазона «Видеоспринт G/2» с частотой 1000 кадр/с. Установлено различие динамики ускорения фронта пламени при неизменном составе горючей смеси и энергии инициирования пламени. Обнаружены особенности функций распределения предэкспонент степенного закона ускорения фронта пламени, свидетельствующие о существенном влиянии единичных случайных возмущений на начальном этапе формирования квазисферического фронта пламени. Установлено влияние энергии инициирования при сравнении распространения фронта пламени при инициировании энергией 1 мДж и 5 Дж

Ключевые слова

Газодинамика горения, устойчивость горения, сферический фронт пламени, ускорение фронта пламени, водородно-воздушная смесь

Поступила 18.06.2018

© Автор(ы), 2019

Введение. Самоподдерживающееся выделение химической энергии при окислении газовых топлив имеет широкое практическое применение для получения энергии либо продуктов полного или частичного окисления. Кроме энергетических аспектов горения, крайне важно получение знаний о закономерностях распространения фронта пламени в неподвижных смесях для обеспечения безопасности на промышленных объектах.

Распространение фронта пламени в однородных смесях горючего с окислителем — основная тестовая задача для многих теоретических и численных моделей горения. Несмотря на простоту постановки начальных и граничных условий, сферическое распространение фронта пламени сопряжено с большим количеством физических явлений, которые превращают одномерное распространение сферического гладкого фронта пламени в сложное трехмерное течение.

Распространение пламени в изначально неподвижном объеме газа сопровождается выделением теплоты и обычно расширением продуктов сгорания, которые приводят в движение горючую смесь перед фронтом пламени. Распространение фронта пламени в получившемся потоке сопровождается диссипативными процессами, которые привели бы к равновесию линейную систему, где противодействие пропорционально амплитуде воздействия. Однако нелинейная система, которой является фронт пламени, в результате элементарных возмущений и диссипативных процессов формирует структуры, приводящие к усилению возмущений и развитию неустойчивостей. Впервые связь между упорядоченными структурами и диссипативными процессами была отмечена И. Пригожиным [1]. Им же был введен термин «диссипативные структуры».

Яркий пример диссипативных структур — гидродинамическая неустойчивость пламени (она же — неустойчивость Дарье — Ландау). Впервые этот вид неустойчивости математически получен Л.Д. Ландау в приближении бесконечно тонкого фронта пламени [2]. В дальнейшем в работах А.Г. Истратова и В.Б. Либровича [3] предложенный подход дополнен моделью фронта пламени конечной толщины. Дополненная модель показала хорошее совпадение с экспериментальными данными [4]. Теоретические описания фронта пламени непрерывно развиваются. Современное состояние исследований по этой теме представлено в работе [5].

Еще один пример — термодиффузионная неустойчивость, демонстрирующая увеличение поверхности и скорости распространения фронта пламени, обусловленные дисбалансом переноса теплоты и вещества через фронт пламени [6].

Развитие неустойчивостей фронта пламени приводит не только к его ускорению, но и к возникновению пульсаций давления и скорости газа в окрестности расширяющегося фронта пламени. Разрушение первичного фронта пламени при горении вблизи концентрационных пределов и образование новых очагов воспламенения в нагретой частично прореагировавшей смеси показано в работах [7, 8]. При этом важную роль играет выделение тепловой энергии при диссипации кинетической энергии внутри области сдвигового течения. В работах [9, 10] изложено мнение об установлении колмогоровского каскада масштабов турбулентных пульсаций, приводящих к ускорению фронта пламени по степенному закону с показателем 1,5 [4, 8, 11].

Экспериментальные исследования распространения фронта пламени при крупномасштабном взрыве газа приведены в работах [12, 13]. Полученные результаты продемонстрировали зависимость ускорения движения фронта пламени как от интенсивности гидродинамической неустойчивости, так и от интенсивности термодиффузионной неустойчивости. Характер распространения фронта пламени также зависит от состава смеси и начального давления [14].

В любом случае ускорение фронта пламени, вызванное его неустойчивостями, описывается статистическими методами. Вместо детерминистического описания следует использовать функции распределения для параметров описательного уравнения.

Настоящая работа посвящена исследованию ускорения свободного распространения сферического фронта пламени в оболочках объемом 0,003, 0,005, 9, 15 и 30 м³. Энергия инициирования составляла 1 мДж и 5 Дж. При одинаковых начальных условиях получены и проанализированы различия значений скоростей распространения фронта пламени. Исследованы масштабы и динамика развития наблюдаемых неоднородностей фронта пламени.

Эксперимент. Эксперименты проводились на двух экспериментальных установках: лабораторном стенде и взрывной камере 13ЯЗ, которая принадлежит Московскому региональному взрывному центру коллективного пользования РАН.

Лабораторный стенд (рис. 1, а) оснащен системой подготовки горючей смеси, устройством фиксации латексной оболочки, системой инициирования пламени энергией 1 мДж и системой шпирен-визуализации, оснащенной видеокамерой «Видеоспринт G/2», позволяющей проводить съемку с частотой до 1000 кадр/с.

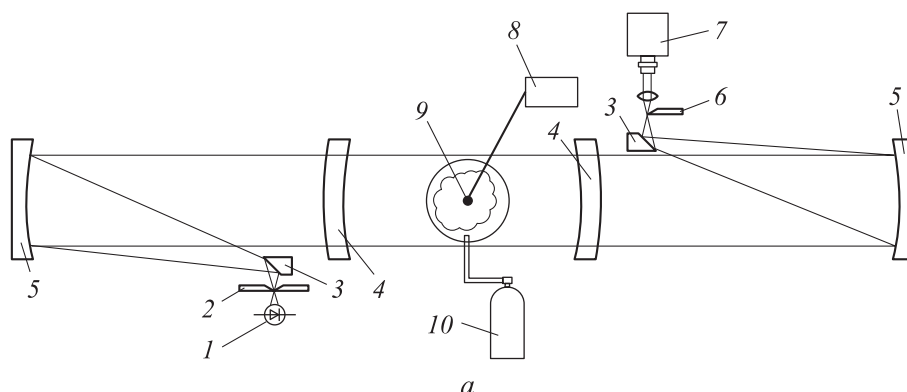
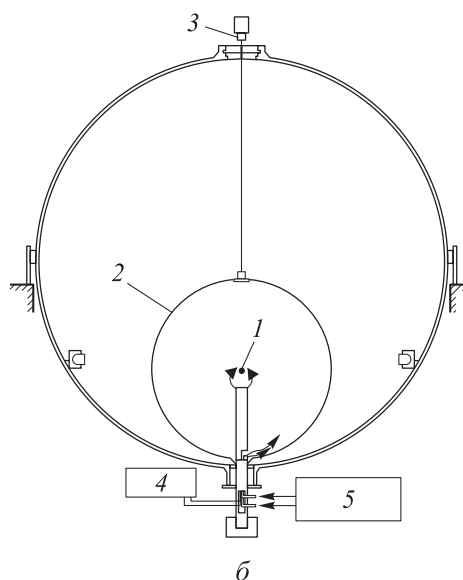


Рис. 1. Схемы экспериментальных стендов:

а — лабораторный стенд (1 — источник света; 2 — оптическая щель; 3 — зеркало; 4 — мениск; 5 — сферическое зеркало; 6 — нож Фуко; 7 — высокоскоростная цифровая камера; 8 — источник питания искрового разряда; 9 — искровой промежуток; 10 — баллон с горючей смесью);
б — взрывная камера 13Я3 (1 — область инициирования; 2 — латексная оболочка; 3 — ИК-камера; 4 — источник питания системы инициирования; 5 — система подачи газов)



Горючая смесь с содержанием водорода 15 % изготовлялась в баллоне объемом 0,04 м³ при избыточном давлении 5 атм. Перед серией экспериментов смесь выдерживалась не менее 1 сут. Перед заполнением оболочки подводящие магистрали и блок крепления латексной оболочки продувались горючей смесью объемом 0,005 м³. Серия экспериментов по распространению пламени в разных оболочках проводилась с одинаковым составом горючей смеси.

Взрывная камера 13Я3 (рис. 1, б) оснащена системой подготовки горючей смеси, вентилятором для перемешивания горючей смеси внутри оболочки, устройством фиксации латексной оболочки, системой иницирования пламени с энергией 1 мДж или 5 Дж, а также системой инфракрасной визуализации, оснащенной камерой *InfraTec ImageIR 8320*, позволяющей вести съемку с частотой до 300 кадр/с.

Горючая смесь с содержанием водорода 15 % изготовлялась непосредственно в оболочке. Водород из баллона и воздух подавались в оболочку. После заполнения газ в оболочке перемешивался в течение 30 мин, затем после выключения вентилятора смесь поджигалась искрой с энергией 1 мДж или взрывающейся проволокой с энергией 5 Дж.

Анализ погрешностей. В лабораторном стенде смесь изготовлялась с использованием манометра 0,15 класса точности. При приготовлении смеси с содержанием водорода 15 % относительное отклонение состава от заданного может составлять до 1 %. Положение фронта пламени определялось с абсолютной погрешностью 2 пикселя, что соответствует относительной погрешности 0,4 %. Время экспозиции 200 мкс, т. е. относительная погрешность определения времени при длительности процесса 20 мс равна 1 %.

В камере 13Я3 смесь изготовлялась с использованием расходомеров *PROMASS 80F* 0,35 класса точности и *PROWIRL 72F* 0,75 класса точности. При приготовлении смеси с содержанием водорода 15 % относительное отклонение состава от заданного может достигать 0,5 %. Положение фронта пламени определялось с абсолютной погрешностью 2 пикселя, что соответствует относительной погрешности 0,6 %. Время экспозиции 10 мкс, т. е. относительная погрешность определения времени при длительности процесса 100 мс равна 0,01 %.

Измерения величин независимы и отклонения случайны, поэтому относительная погрешность $x-t$ -диаграммы определяется сверткой [15]. Общая погрешность измерения на лабораторном стенде 1,5 %, в камере 13Я3 0,8 %.

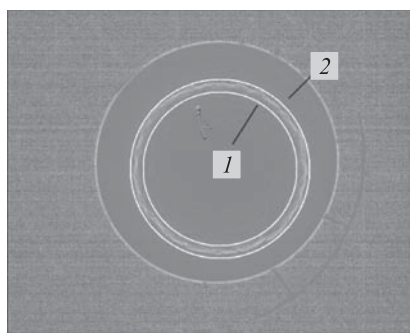


Рис. 2. Схема выделения области фронта пламени:

1 — внутренняя граница; 2 —
внешняя граница

Обработка изображений.

Для обработки полученных последовательностей изображений разработана программа, алгоритм которой описан ниже (рис. 2).

1. Выбор первого кадра. Для поиска искры определяется область с максимальной яркостью. На краях изображения часто находились яркие области (шкала, отблески и т. д.). В связи с этим искру ищут только в центральной области изображения. Линейные размеры этой области равны половине линейных размеров изображения. Для всевозможных областей размером 11×11 пикселей определяется

средняя яркость. Центр области с максимальной яркостью принимается за положение искры (центр пламени).

2. Построение зависимости яркости от расстояния до центра. Для этого из центра пламени выпускается четыре луча (вверх, вниз, влево, вправо), по которым и строится зависимость. Далее проводится прямая, параллельная оси абсцисс $b = \lambda b_{\max} + (1 - \lambda)b_{\text{start}}$, где λ — выбираемый коэффициент ($\lambda = 0,2$); b_{\max} — максимальная яркость; b_{start} — яркость в центре. В качестве результата выбирается точка с минимальным радиусом, чья яркость превосходит b_{\max} . Другими словами, выбирается левое пересечение зависимости и прямой. Поскольку внутри фронта пламени могут быть яркие точки, за радиус принимается максимальное из полученных значений. В качестве области фронта пламени выбирается некоторая окрестность полученного радиуса шириной 20...80 пикселей в зависимости от кривизны пламени.

3. Поиск радиуса фронта пламени для значений угла 0...360°. В качестве шага выбирается угол $\delta\alpha = 1/R_2$ (рад), где R_2 — приблизительный радиус, полученный на предыдущем шаге. Таким образом, шаг по дуге составляет 1 пиксель. Радиус для каждого угла определяется так же, как и радиус на предыдущем шаге, но учитывается только область пламени. Значение $\lambda = 0,9$. Поиск осуществляется справа налево (выбирается точка максимальным радиусом, чья яркость превосходит b_{\max}). Так получается зависимость радиуса от угла для каждого кадра.

4. Определение характерных размеров неустойчивостей к зависимости радиуса от угла с использованием быстрого преобразования Фурье. Таким образом получается зависимость амплитуды неустойчивости от углового размера неустойчивости. В качестве результата выбирается несколько частот с амплитудой большей, чем четверть пикселя.

Результаты эксперимента для латексных оболочек объемом 9...30 м³. Эксперименты по изучению распространения фронта пламени проводились в латексных оболочках объемом 9...30 м³ при иницировании энергией 1 мДж и 5 Дж. Средние значения радиуса, полученные в результате обработки инфракрасных изображений пламени, приведены на рис. 3. Результаты показывают, что повышение энергии инициирования от 1 мДж до 5 Дж приводит к увеличению скорости фронта пламени в среднем по ряду экспериментов. Следует отметить, что этот вывод справедлив в указанном диапазоне значений энергии инициирования. Во всех экспериментах наблюдается ускорение фронта пламени. Показанные на рис. 3 $x-t$ -диаграммы распространения фронта пламени в логарифмических координатах иллюстрируют ускорение по степенному закону вида

$$R = At^n. \quad (1)$$

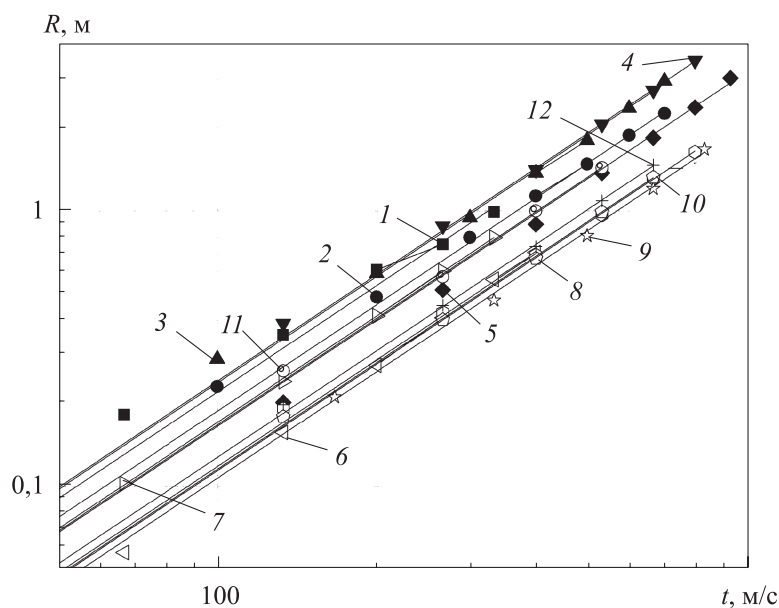


Рис. 3. Зависимость среднего радиуса фронта пламени от времени при различных значениях энергии инициирования и объема горючей смеси:

точки с заливкой цветом соответствуют энергии инициирования 5 Дж (1, 2 — 15 м³; 3–5 — 30 м³), точки без заливки — энергии 1 мДж (6–12 — 9 м³)

Для определения статистических закономерностей ускорения фронта пламени $x-t$ -диаграммы аппроксимированы уравнениями вида (1). Значения показателя степени и параметры экспериментов приведены в таблице. Ввиду того, что значение показателя в эксперименте №1 сильно отличается от остальных, его решено исключить из рассмотрения. В остальных экспериментах показатель n мало изменяется. Среднее значение показателя степени при инициировании горения энергией 5 Дж составляет 1,31, при инициировании горения энергией 1 мДж — 1,30. Поскольку размерность множителя зависит от показателя степени, было взято среднее значение 1,30.

Значения параметров эксперимента и показателя степенного ускорения

Номер эксперимента	Объем, м ³	n	$A, 10^{-4} \text{ м/с}^{1,3} (n = 1,3)$
<i>При энергии инициирования 5 Дж</i>			
1	15	1,05	5,43
2		1,22	4,58
3	30	1,33	5,80
4		1,28	5,88
5		1,42	4,02

Окончание таблицы

Номер эксперимента	Объем, м ³	n	$A, 10^{-4} \text{ м/с}^{1,3} (n = 1,3)$
<i>При энергии инициирования 1 мДж</i>			
6		1,37	2,91
7		1,29	4,22
8		1,23	2,78
9	9	1,37	2,61
10		1,29	2,82
11		1,27	4,10
12		1,29	3,12

Далее $x-t$ -диаграммы снова были аппроксимированы уравнениями вида (1) с показателем $n = 1,30$. В результате получены значения множителя A для разных экспериментов, которые можно сравнивать, поскольку они имеют одинаковую размерность. Среднее значение множителя при иницировании горения энергией 5 Дж составило $5,14 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^{1,3}$, при иницировании горения энергией 1 мДж — $3,22 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^{1,3}$. При этом среднеквадратичные отклонения равны $8,63 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^{1,3}$ в первом случае и $6,59 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^{1,3}$ — во втором. Хотя в среднем при иницировании горения энергией 5 Дж фронт пламени распространяется быстрее, чем при иницировании энергией 1 мДж, строгой однозначной зависимости нет. В эксперименте № 5 при иницировании энергией 5 Дж фронт пламени распространяется медленнее, чем в экспериментах № 7 и 11, где энергия инициирования составляла 1 мДж.

Результаты обработки показывают, что при увеличении энергии инициирования в 5000 раз среднее значение множителя перед степенной зависимостью радиуса фронта пламени от времени увеличивается в 1,6 раза. При этом естественный разброс как значений показателя степени, так и значений множителя допускает распространение фронта пламени при иницировании взрывающейся проволокой со скоростью, меньшей, чем скорость при иницировании слабой искрой (эксперименты № 5, 7 и 11, см. таблицу).

Согласно современным представлениям, ускорение фронта пламени на начальных этапах, когда скорость фронта пламени составляет менее 10 % скорости звука, вызвано искривлениями фронта пламени, появлением и ростом неоднородностей пламени. Угловые развертки радиуса фронта пламени, полученные при обработке в эксперименте № 5 после-

довательных ИК-изображений, снятых в моменты времени 133, 266, 399, 532 и 665 мс, от инициирования горения, приведены на рис. 4. Заметно увеличение среднего радиуса фронта пламени и уменьшение угловых размеров наблюдаемых неоднородностей. На начальном этапе распространения фронта пламени, когда средний радиус мал, размеры неоднородностей сравнимы с радиусом фронта пламени.

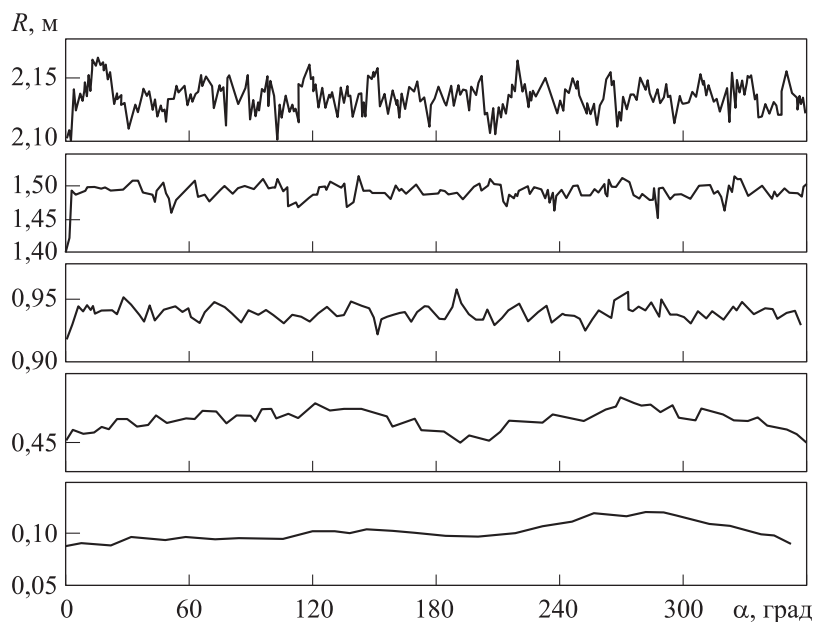


Рис. 4. Зависимости полярного радиуса фронта пламени от полярного угла в системе координат с полюсом в точке инициирования (разность моментов времени между последовательными кривыми 133 мс)

Для нахождения размеров периодических неоднородностей фронта пламени к полученным разверткам применено дискретное преобразование Фурье. Зависимость линейных размеров неоднородностей фронта пламени от его среднего радиуса показана на рис. 5. На начальном этапе распространения заметны неоднородности одного размера. С увеличением радиуса фронта пламени до 0,67 м и масштаба возмущений первого порядка до 0,29 м на возмущениях первого порядка развиваются возмущения второго порядка с масштабом 0,16 м. С увеличением радиуса фронта пламени до 1,2 м и масштаба возмущений второго порядка до 0,29 м образуются возмущения третьего порядка с масштабом 0,15 м. По мере увеличения радиуса фронта пламени от 0,45 до 1,65 м наблюдаются возмущения пяти последовательных порядков (см. рис. 5), а минимальный размер наблюдаемых возмущений уменьшается от 0,2 до 0,1 м.

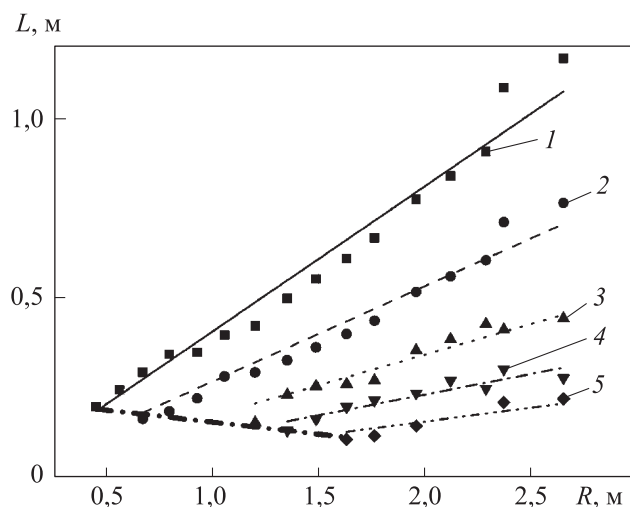


Рис. 5. Зависимость линейных размеров неоднородностей фронта пламени от его среднего радиуса (цифрами обозначен порядок возмущения)

Результаты эксперимента для латексных оболочек объемом 0,003... 0,005 м³. Зависимость радиуса фронта пламени от времени ($x-t$ -диаграммы распространения фронта пламени в одной и той же газовой смеси в латексных оболочках объемом 0,003...0,005 м³) приведена на рис. 6, а. Разброс траекторий обусловлен стохастическим характером развития неустойчивостей фронта пламени и, как следствие, недетерминированностью формы поверхности пламени в каждый последующий момент. Неустойчивость, развивающаяся из случайного возмущения или из возмущения, вызванного взаимодействием уже развивающихся неустойчивостей, не может быть предсказана за период времени, больший, чем время развития отдельной неоднородности. При этом в связи с большим числом развивающихся неоднородностей во фронте пламени и едиными законами их развития картина ускорения пламени в различных экспериментах мало отличается.

Как и в случае экспериментов, в объемах нескольких кубических метров траектории были описаны уравнениями вида (1). Аппроксимация показала ускорение по степенному закону со средним показателем степени $n = 1,09$. Значения предэкспоненциального множителя отличаются от среднего значения в пределах 30 %. По значениям предэкспоненциального множителя получена зависимость плотности вероятности P от параметра A (рис. 6, б).

Полученная зависимость плотности вероятности представляет собой суперпозицию двух нормальных распределений со средними значениями 2,17 и 2,73 м/с^{1,09} и стандартными отклонениями 0,12 и 0,4 м/с^{1,09} со зна-

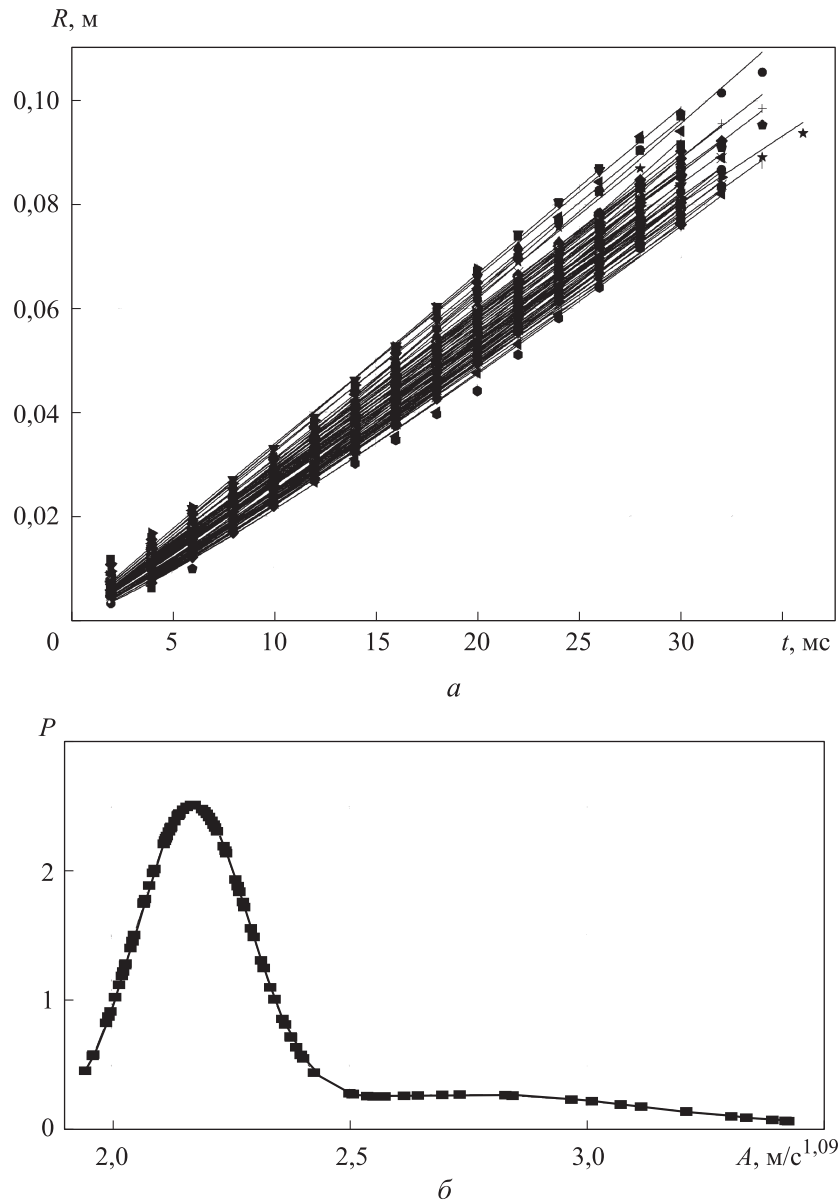


Рис. 6. Зависимость радиуса фронта пламени от времени (а) (результаты 80 экспериментов в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 % при инициировании энергией 1 мДж) и зависимость плотности вероятности P от параметра A (б)

чениями статистического веса 0,73 и 0,27. При малых размерах фронта пламени, сравнимых с размерами неоднородностей, отдельные неоднородности играют большую роль в формировании поверхности пламени. Соответственно развитие и расположение отдельных неоднородностей оказывает наибольший эффект на начальных этапах, когда радиус фронта

пламени мал. Это объясняет наблюдаемый разброс предэкспоненциального множителя: $1,94...3,42 \text{ м/с}^{1,09}$. С увеличением размеров фронта пламени усиливается влияние статистического усреднения, а влияние единичных неоднородностей снижается.

Заключение. Разработана методика автоматизированной обработки экспериментально полученных изображений фронта пламени с определением средних значений радиуса фронта пламени, угловых разверток изображения фронта пламени и размеров возмущений фронта.

Получены $x-t$ -диаграммы распространения сферического фронта пламени в водородно-воздушной смеси с содержанием водорода 15 % в латексных оболочках объемом $0,003...30 \text{ м}^3$. Экспериментально определены масштабы неоднородностей фронта пламени. Построена динамика образования каскада неоднородностей.

Установлено, что при неизменном составе горючей смеси, объеме оболочки и энергии инициирования временные зависимости среднего радиуса фронта пламени отличаются от эксперимента к эксперименту. Такое отсутствие повторяемости экспериментов получено как для оболочек малого объема $0,003...0,005 \text{ м}^3$, так и большего — $9...30 \text{ м}^3$. Наблюдаемое расхождение не может быть объяснено погрешностью состава смеси и измерений, но может быть связано с развитием неустойчивостей во фронте пламени. Наибольшее влияние развитие неустойчивостей оказывает на начальном этапе, когда радиус фронта пламени соизмерим с линейными размерами неоднородностей.

Показано влияние энергии инициирования на динамику распространения фронта пламени при инициировании энергией 1 мДж и 5 Дж. Среднее значение предэкспоненциального множителя ускорения фронта пламени увеличивается в 1,6 раза при повышении энергии инициирования на 3 порядка.

Проведена статистическая интерпретация характеристик ускорения сферического фронта пламени для оболочек объемом $0,003...30 \text{ м}^3$. Установлено, что разброс предэкспоненциальных множителей не подчиняется нормальному распределению, что свидетельствует о существенном влиянии единичных случайных возмущений на начальном этапе формирования квазисферического фронта пламени.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. М., Мир, 1979.

- [2] Ландау Л.Д. К теории медленного горения. *ЖЭТФ*, 1944, № 14, с. 240.
- [3] Истратов А.Г., Либрович В.Б. Об устойчивости распространения сферического пламени. *ПМТФ*, 1966, № 1, с. 67–78.
- [4] Гостинцев Ю.А., Истратов А.Г., Шуленин Ю.В. Автомодельный режим распространения свободного турбулентного пламени в перемешанных газовых смесях. *Физика горения и взрыва*, 1988, т. 24, № 5, с. 63–70.
- [5] Matalon M. The Darrieus — Landau instability of premixed flames. *Fluid Dyn. Res.*, 2018, vol. 50, no. 5, art. 051412. DOI: 10.1088/1873-7005/aab510
- [6] Sivashinsky G.I. Instabilities pattern formation, and turbulence in flames. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1983, vol. 15, no. 1, pp. 179–199. DOI: 10.1146/annurev.fl.15.010183.001143
- [7] 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, с. 21–38.
- [8] Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Яковенко И.С. Влияние газодинамических процессов на развитие горения вблизи концентрационных пределов воспламенения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2015, № 6, с. 85–98. DOI: 10.18698/1812-3368-2015-6-85-98
- [9] Гостинцев Ю.А., Истратов А.Г., Фортов В.Е. О фрактальной структуре турбулентного сферического пламени. *ДАН*, 1997, т. 353, № 1, с. 55–56.
- [10] Sivashinsky G.I. Some developments in premixed combustion modeling. *Proc. Combust. Inst.*, 2002, vol. 29, iss. 2, pp. 1737–1761. DOI: 10.1016/S1540-7489(02)80213-9
- [11] Bradley D., Cresswell T., Puttock J. Flame acceleration due to flame-induced instabilities in large-scale explosions. *Combust. Flame*, 2001, vol. 124, iss. 4, pp. 551–559. DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00208-X
- [12] Kim W.K., Mogi T., Kuwana K., et al. Self-similar propagation of expanding spherical flames in large scale gas explosions. *Proc. Combust. Inst.*, 2015, vol. 35, no. 2, pp. 2051–2058. DOI: 10.1016/j.proci.2014.08.023
- [13] Kim W.K., Mogi T., Kuwana K., et al. Prediction model for self-similar propagation and blast wave generation of premixed flames. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2015, vol. 40, iss. 34, pp. 11087–11092. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.123
- [14] Yang S., Saha A., Wua F., et al. Morphology and self-acceleration of expanding laminar flames with flame-front cellular instabilities. *Combust. Flame*, 2016, vol. 171, pp. 112–118. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.05.017
- [15] Лосев С.А. О свертке информации, получаемой в экспериментах на ударных трубах. *Научные труды Института Механики МГУ*, 1973, № 21, с. 3–21.

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

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

Ельянов Артем Евгеньевич — лаборант лаборатории нестационарных газодинамических процессов ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2), студент МГУ им. М.В. Ломоносова (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Ленинские горы, д. 1).

Коробов Андрей Евгеньевич — ведущий инженер лаборатории нестационарных газодинамических процессов ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2).

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

Петухов Вячеслав Александрович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории ударно-волновых воздействий ОИВТ РАН (Российская Федерация, 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Володин В.В., Голуб В.В., Ельянов А.Е. и др. Влияние объема водородно-воздушной газовой смеси, типа и энергии инициирования на распространение сферического фронта пламени. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2019, № 2, с. 64–80. DOI: 10.18698/1812-3368-2019-2-64-80

**EFFECTS OF HYDROGEN-AIR GAS MIXTURE VOLUME
AND INITIATION TYPE AND ENERGY ON THE PROPAGATION
OF A SPHERICAL FLAME FRONT**

V.V. Volodin¹

vlad@ihed.ras.ru

V.V. Golub¹

golub@ihed.ras.ru

A.E. Elyanov^{1,2}

elyanov14@physics.msu.ru

A.E. Korobov¹

andrusha.kor@gmail.com

A.Yu. Mikushkin^{1,3}

mikushkin-anton@yandex.ru

V.A. Petukhov¹

petukhov@ihed.ras.ru

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

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

³Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The investigation considered a spherical flame front propagating in free space filled with a hydrogen-air mixture containing 15 % hydrogen. The experiments were conducted inside latex shells. We initiated combustion in the centre of the volume, using either a 1 mJ spark or a nichrome wire explosion releasing 5 J of energy. In the case of the 7 m³ and larger shells, we recorded video data on the flame front using an *InfraTec ImageIR 8320* infrared camera featuring a 2.0–5.7 μm spectral ranges and a rate of 300 frames per second. In the case of the 0.003 m³ and smaller shells, we visualised the processes by means of an IAB-451 schlieren system. We recorded these images using a *Videosprint G/2* visible-wavelength camera at a rate of 1000 frames per second. We identified the differences in flame front acceleration dynamics for the same combustible mixture composition and flame initiation energy. We found that the distribution function specifics concerning the pre-exponential factors in the power law of flame front acceleration indicate that individual random perturbations have a considerable effect at the initial stage of quasi-spherical flame front formation. We compared flame front propagation for the cases when the initiation energy was 1 mJ and 5 J respectively and determined that the initiation energy also affects the process

Keywords

Gas dynamics of combustion, combustion stability, spherical flame front, flame front acceleration, hydrogen-air mixture

Received 18.06.2018
© Author(s), 2019

REFERENCES

- [1] Nicolis G., Prigogine I. Self-organization in non-equilibrium systems from dissipative structures to order through fluctuations. Wiley, 1977.
- [2] Landau L.D. On the theory of slow combustion. *ZhETF*, 1944, no. 14, p. 240 (in Russ.).
- [3] Istratov A.G., Librovich V.B. On the stability of propagation of spherical flames. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1966, vol. 7, iss. 1, pp. 43–50. DOI: 10.1007/BF00912830
- [4] Gostintsev Yu.A., Istratov A.G., Shulenin Yu.V. Self-similar propagation of a free turbulent flame in mixed gas mixtures. *Combust. Explos. Shock Waves*, 1988, vol. 24, iss. 5, pp. 563–569. DOI: 10.1007/BF00755496
- [5] Matalon M. The Darrieus — Landau instability of premixed flames. *Fluid Dyn. Res.*, 2018, vol. 50, no. 5, art. 051412. DOI: 10.1088/1873-7005/aab510
- [6] Sivashinsky G.I. Instabilities pattern formation, and turbulence in flames. *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 1983, vol. 15, no. 1, pp. 179–199. DOI: 10.1146/annurev.fl.15.010183.001143

- [7] 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, pp. 21–38 (in Russ.).
- [8] Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S. Gas-dynamic processes influence on combustion evolution close to concentration flammability limits. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2015, no. 6, pp. 85–98 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2015-6-85-98
- [9] Gostintsev Yu.A., Istratov A.G., Fortov V.E. On fractal structure of turbulent spherical flame. *DAN*, 1997, vol. 353, no. 1, pp. 55–56 (in Russ.).
- [10] Sivashinsky G.I. Some developments in premixed combustion modeling. *Proc. Combust. Inst.*, 2002, vol. 29, iss. 2, pp. 1737–1761. DOI: 10.1016/S1540-7489(02)80213-9
- [11] Bradley D., Cresswell T., Puttock J. Flame acceleration due to flame-induced instabilities in large-scale explosions. *Combust. Flame*, 2001, vol. 124, iss. 4, pp. 551–559. DOI: 10.1016/S0010-2180(00)00208-X
- [12] Kim W.K., Mogi T., Kuwana K., et al. Self-similar propagation of expanding spherical flames in large scale gas explosions. *Proc. Combust. Inst.*, 2015, vol. 35, iss. 2, pp. 2051–2058. DOI: 10.1016/j.proci.2014.08.023
- [13] Kim W.K., Mogi T., Kuwana K., et al. Prediction model for self-similar propagation and blast wave generation of premixed flames. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2015, vol. 40, iss. 34, pp. 11087–11092. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.123
- [14] Yang S., Saha A., Wu F., et al. Morphology and self-acceleration of expanding laminar flames with flame-front cellular instabilities. *Combust. Flame*, 2016, vol. 171, pp. 112–118. DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.05.017
- [15] Losev S.A. On the information convolution obtained in experiments on shock tubes. *Nauchnye trudy Instituta Mekhaniki MGU*, 1973, no. 21, pp. 3–21 (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. — Laboratory Assistant, 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); Student, Lomonosov Moscow State University (Leninskie Gory ul. 1, Moscow, 119991 Russian Federation).

Korobov A.E. — Leading Engineer, 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).

Petukhov V.A. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Laboratory of Shockwave Effects, Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (Izhorskaya ul. 13, str. 2, Moscow, 125412 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Volodin V.V., Golub V.V., Elyanov A.E., et al. Effects of hydrogen-air gas mixture volume and initiation type and energy on the propagation of a spherical flame front. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2019, no. 2, pp. 64–80 (in Russ.). DOI: 10.18698/1812-3368-2019-2-64-80