
ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 536.46

НАЧАЛЬНАЯ СТАДИЯ ГОРЕНИЯ СМЕСЕЙ АЦЕТИЛЕН–КИСЛОРОД В ТРУБЕ

© 2023 г. П. Н. Кривошеев^{1*}, О. Г. Пенязьков¹

¹Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной Академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

*E-mail: krivosheyev.pavlik@gmail.com

Поступила в редакцию 29.06.2022;

после доработки 12.07.2022;

принята в печать 20.07.2022

Методом высокоскоростной съемки выполнено экспериментальное исследование процесса горения предварительно перемешанной смеси ацетилена с кислородом, разбавленной азотом либо аргоном, в длинной трубе круглого сечения. Определена динамика фронта пламени на ранней стадии ускорения. Выполнено сравнение полученных экспериментальных результатов с известными теоретическими моделями. Показано, что на начальной стадии ускоренного распространения вытянутого вдоль стенок канала пламени до момента замедления скорость ведущей точки фронта хорошо описывается экспоненциальной зависимостью. Определены нормальные (ламинарные) скорости горения стехиометрических смесей ацетилен/кислород, разбавленных азотом либо аргоном при пониженном (8–21 кПа) начальном давлении.

Ключевые слова: горение, ускорение пламени, нормальная скорость горения, стехиометрическая смесь ацетилена с кислородом, высокоскоростная съемка.

DOI: 10.31857/S0207401X23030093, EDN: LYNDWQ

ВВЕДЕНИЕ

Динамика поведения пламен в предварительно перемешанных смесях представляет значительный интерес как с точки зрения пожаровзрывобезопасности, так и с точки зрения использования в силовых и энергетических установках. При этом отдельный интерес представляют режимы нестационарного горения, включая ускорение пламени и переход в детонацию. В работе [1] впервые была сформулирована простая “геометрическая” модель распространения фронта пламени на ранней стадии горения газовой смеси в канале. В ней авторы определили изменение в единицу времени объема продуктов сгорания и площади поверхности фронта пламени, занимающего все сечение канала и вытянутого вдоль его оси. На основании этого было сформулировано выражение, описывающее динамику поведения во времени ведущей точки фронта пламени. В свою очередь авторами работы [2] предложено более сложное аналитическое описание процесса ускорения пламени на ранней стадии, учитывающее сжимаемость газа, что по мнению авторов работы должно играть существенную роль. В недавней работе [3] выполнено экспериментальное исследование процесса горения стехиометрической

смеси водорода с кислородом в прямоугольном канале узкого (10 × 10 мм) сечения и показано хорошее совпадение полученных результатов с теоретическими данными из работы [2] на ранней стадии распространения пламени, при этом сравнения с данными работы [1] не проводилось. Задача настоящей работы — изучение динамики горения предварительно перемешанной стехиометрической смеси ацетилена с кислородом, разбавленной азотом либо аргоном, и сравнение экспериментальных данных с результатами известных теоретических моделей с целью определения модели, наиболее адекватно описывающей процесс ускорения пламени на его ранней стадии.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Подробное описание стенда и методики проведения экспериментов можно найти в предыдущей работе авторов [4]. Использовали калиброванную гладкую пластиковую трубу с прозрачными стенками внутренним диаметром 60 мм и длиной 6 м. Один из торцов трубы был глухим, в нем установлена система инициирования горения на основе стандартной автомобильной свечи

с энергией зажигания, равной ≈ 0.8 мДж. Другой конец трубы закрывался тонкой лавсановой диафрагмой, способной выдержать перепад давления 1–1.5 атм. Перед проведением эксперимента трубу вакуумировали до остаточного давления не более 10–20 Па и заполняли рабочей смесью до необходимого начального давления. После инициирования горения и по мере распространения фронта пламени от глухого торца трубы к торцу, закрытому пленкой, за счет роста давления происходил разрыв пленки и выброс продуктов сгорания в окружающее пространство.

Эксперименты проводили в стехиометрической смеси ацетилена и кислорода, разбавленной на 25% азотом либо аргоном; начальное давление смеси варьировали от 8 до 22 кПа при комнатной температуре.

Для высокоскоростной фотографии фронта пламени применили две идентичные камеры Photron Fastcam SA-Z модель 2100 (Япония), установленные последовательно вдоль оси трубы. Скорость съемки составляла 180 тыс. кадр/с при разрешении кадра 1024×88 пикселя. Время экспозиции каждого кадра составляло 1–1.3 мкс. Настройки обеих камер (время начала записи, общее время записи, разрешение кадра, скорость съемки, время экспозиции каждого кадра и т.д.), настройки обоих объективов и используемые светофильтры были абсолютно идентичными. Камеры были синхронизированы между собой и управлялись с помощью одного компьютера с программным обеспечением Photron Fastcam Viewer.

Посредством анализа полученных изображений по смещению области свечения от кадра к кадру определяли скорость распространения фронта пламени вдоль оси трубы. С учетом незначительного (порядка нескольких пикселей) смещения, особенно при малых скоростях распространения, значения скорости усредняли по 5–20 кадрам. При определении скорости учитывались эффекты, связанные с искажением изображения при наблюдении в направлении, отличном от перпендикулярного.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нормальная скорость горения

Прежде чем приступить к анализу полученных результатов, остановимся на такой важной характеристике как нормальная скорость горения. К сожалению, в литературе не удалось найти данных по скорости горения для исследуемых смесей при пониженном давлении. Однако эту характеристику можно определить непосредственно из проведенных экспериментов. С момента поджига

смеси и до того как фронт приблизится к стенкам трубы, пламя изотропно расширяется в свободном пространстве и имеет практически идеальную полусферическую форму. Это дает возможность измерить его видимую (относительно наблюдателя) скорость горения (V) и определить “истинную”, нормальную скорость горения (laminar burning velocity) по формуле Михельсона $U_f = V/\Theta$, где Θ – степень расширения, определяемая как отношение плотности свежей смеси к плотности продуктов горения. Путем обработки изображений (по смещению области фронта реакции от кадра к кадру) измерения проводили как в осевом, так и в радиальном направлениях до тех пор, пока обе величины измеряемой скорости совпадали между собой. По мере приближения фронта пламени к стенкам трубы его радиальная скорость начинает падать по сравнению с осевой, а фронт пламени начинает вытягиваться вдоль оси трубы. В этот момент времени измерения скорости прекращались. В зависимости от начального давления процесс перехода от изотропно расширяющегося пламени к вытянутому вдоль стенок трубы занимал от 40 до 60 кадров видеоряда. Из-за малого смещения фронта пламени от кадра к кадру, вызванного высокой (180 тыс. кадр/с) скоростью съемки и относительно малой (менее 100 м/с) видимой скоростью горения на начальной стадии, измерения проводили в интервалах между 10–15 кадрами. В таком случае смещение изображения составляло 15–20 пикселей на матрице камеры, что в итоге приводило к погрешности измерения скорости не более 5–7%. В табл. 1 представлены результаты измерений нормальной скорости горения для двух исследуемых смесей в диапазоне начальных давлений от 8 до 20.8 кПа. Степень расширения, Θ , оценивали как отношение плотности исходных реагентов к плотности продуктов сгорания, рассчитанной для случая сгорания при постоянном давлении с использованием детального кинетического механизма GRI-Mech 3.0 [5]. За неимением иных сведений в дальнейшем, при анализе полученных результатов, будем пользоваться данными по степени расширения и нормальной скорости горения для исследуемых смесей, представленными в табл. 1.

Начальная стадия ускоренного распространения пламени

Ускорение волны дефлаграции в замкнутом объеме (канале) и последующее возникновение детонации включает в себя несколько типичных стадий (рис. 1) [4]. На первой стадии фронт пламени ускоряется, затем следует стадия замедле-

Таблица 1. Результаты измерения нормальной скорости горения для смесей ацетилен–кислород, разбавленных азотом либо аргонном

Смесь	Начальное давление, кПа	Видимая скорость фронта горения, м/с	Степень расширения	Нормальная скорость горения, м/с
$3\text{C}_2\text{H}_2 + 7.5\text{O}_2 + 3.5\text{Ar}$	8	54	12	4.5
	12	60	12.2	4.9
	16	72	12.3	5.85
	20.8	86	12.4	6.9
$3\text{C}_2\text{H}_2 + 7.5\text{O}_2 + 3.5\text{N}_2$	8	62	11.7	5.3
	12	68	11.8	5.8
	16	74	11.9	6.2
	20	78	12	6.5

ния, стадия распространения с почти постоянной скоростью и, наконец, стадия повторного ускорения на заключительном этапе которой и формируется детонация. Все эти стадии детально рассмотрены и описаны в недавних экспериментальных [4] и

теоретических [6, 7] работах. Заключительная стадия ускорения фронта пламени и различные режимы возникновения детонации подробно исследованы в работе [8]; обзор и классификацию сценариев развития финальной стадии ускорения

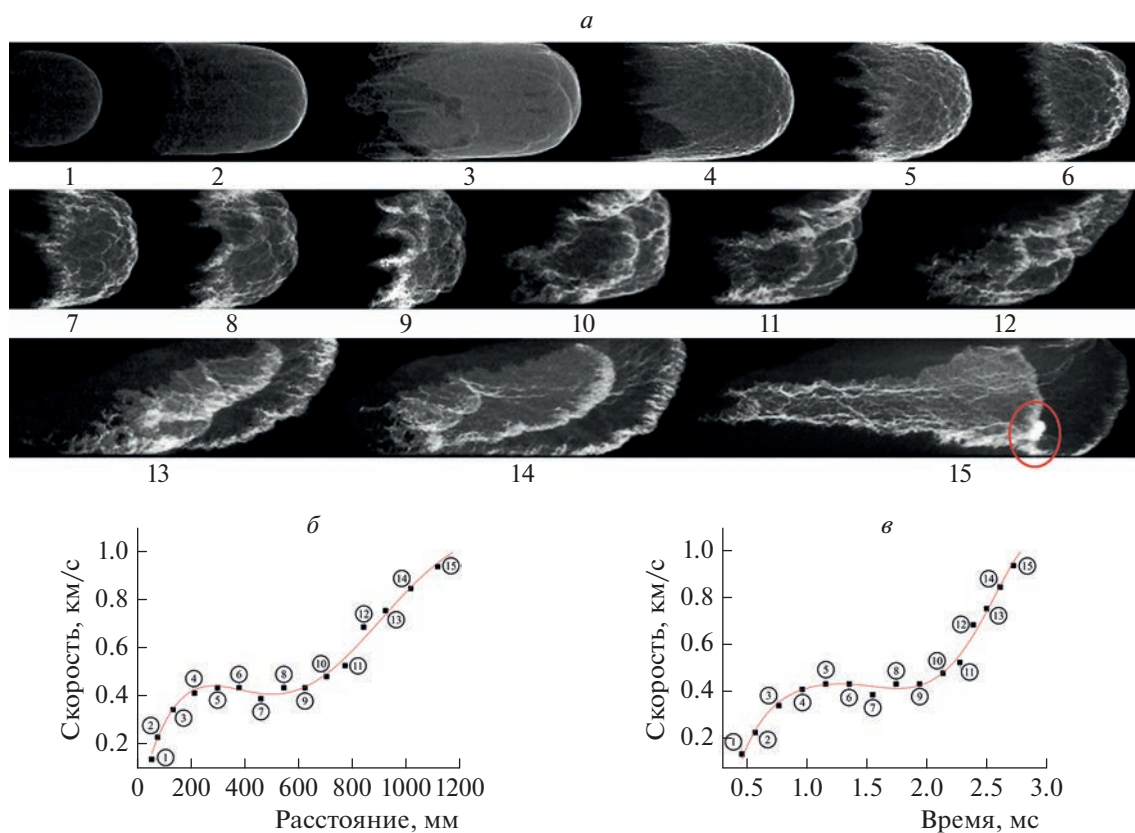


Рис. 1. Мгновенные фотографии [4] свечения фронта пламени в смеси ацетилен/кислород/аргон при начальном давлении 20.8 кПа (а); поперечный размер каждого кадра (внутренний диаметр трубы) — 60 мм. Соответствующие профили скорости (интерполяция по результатам обработки и усреднения массива изображений) в зависимости от расстояния (б) и времени (в). Цифрами на графиках указаны положения во времени соответствующих мгновенных изображений фронта пламени. На кадре 15 окружностью выделена область возникновения локального очага детонации.

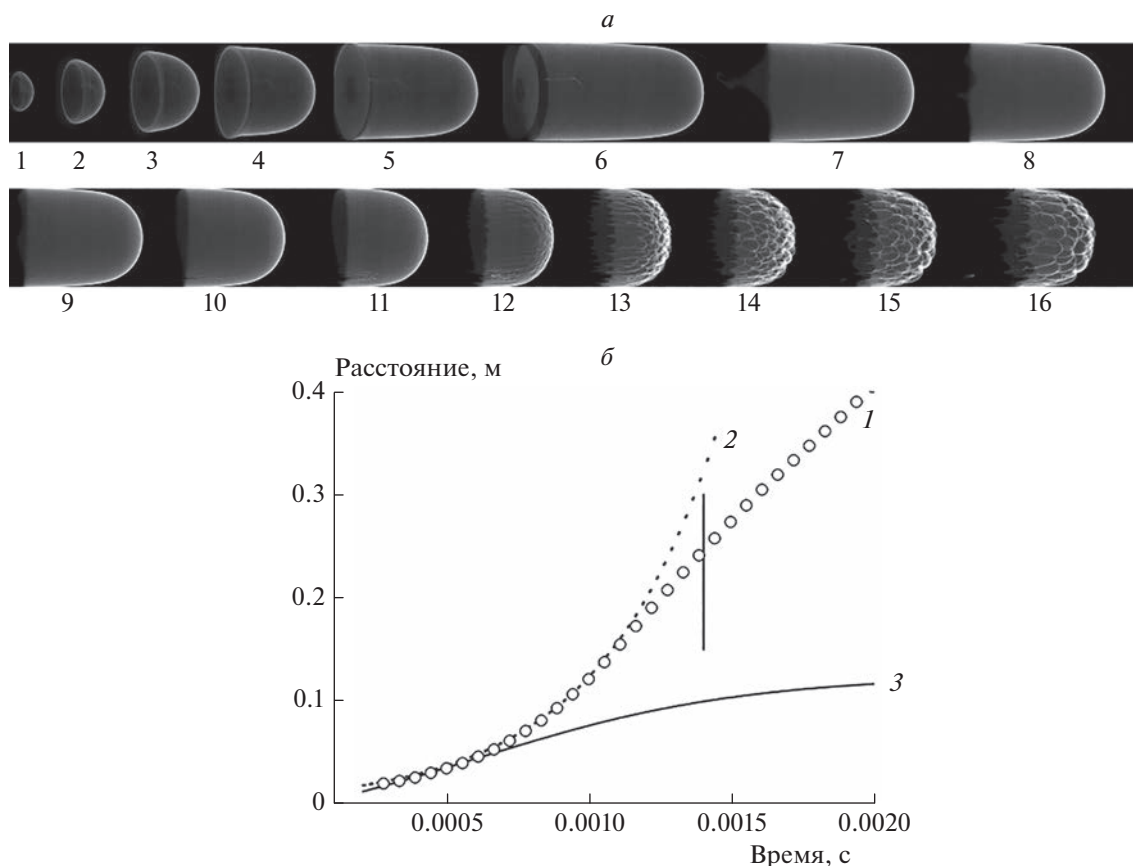


Рис. 2. Начальная стадия распространения пламени в смеси $3\text{C}_2\text{H}_2 + 7.5\text{O}_2 + 3.5\text{Ar}$ в трубе круглого сечения диаметром 60 мм. Мгновенные фотографии свечения фронта пламени (а): интервал между кадрами – 138.9 мкс, кадр 10 в момент времени 1.53 мс; сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов (б); 1 – эксперимент, начальное давление – 12 кПа; 2 – расчет по данным из работ [1, 10], 3 – расчет по данным из работы [2]. Вертикальная линия показывает, в какой момент времени скорость волны была максимальной, что соответствует примерно 10–11 кадру.

пламени в каналах и трубах, включая переход в детонацию на фронте пламени и формирование условий очагового воспламенения перед фронтом, можно найти, например, в работе [9]. В настоящей работе рассмотрим начальную стадию распространения пламени, начиная с момента инициирования горения и заканчивая торможением и перестройкой фронта пламени после его ускоренного распространения.

В работе [1] было показано, что зависимость скорости ведущей точки (leading tip) фронта пламени от времени при горении газа в трубе на начальной стадии выглядит следующим образом:

$$V_{tip} = \Theta U_f \exp\{2(\Theta - 1) U_f (t - t_0)/R\},$$

где V_{tip} – скорость ведущей точки фронта пламени, R – радиус канала, $\Theta = \rho_u/\rho_b$ – степень расширения, равная отношению плотностей несгоревшего (unburned) ρ_u и сгоревшего (burned) ρ_b газов, U_f – нормальная скорость горения, t_0 –

момент времени, когда пламя начинает изменять свою форму от полусферической к вытянутой “пальцеобразной” (“finger flame”). Позднее в работе [10] выражение для скорости ведущей точки было уточнено и дополнено коэффициентом $\alpha \sim 1$; в дальнейшем в нашей работе будем использовать его в окончательном виде:

$$V_{tip} = \Theta U_f \exp\{2\alpha(\Theta - 1) U_f (t - t_0)/R\}. \quad (1)$$

Согласно теоретическим данным из работы [2], зависимость положения лидирующей точки фронта от времени имеет следующий вид:

$$\frac{x_{tip}}{L} = \frac{2\Theta_1 [\exp(\sigma_2 \tau) - 1]}{(\sigma_2 - \sigma_1) \exp(\sigma_2 \tau) + (\sigma_2 + \sigma_1)}, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \Theta_1 &= \Theta - M(\gamma - 1)(\Theta - 1)^2, \quad \tau = \frac{t U_f}{L}, \\ \sigma_1 &= (\Theta - 1)[1 - M(\Theta + 2(\gamma - 1)(\Theta - 1))], \\ \sigma_2 &= [\sigma_1^2 + 4M\gamma\Theta_1(\Theta - 1)^2]^{1/2}. \end{aligned}$$

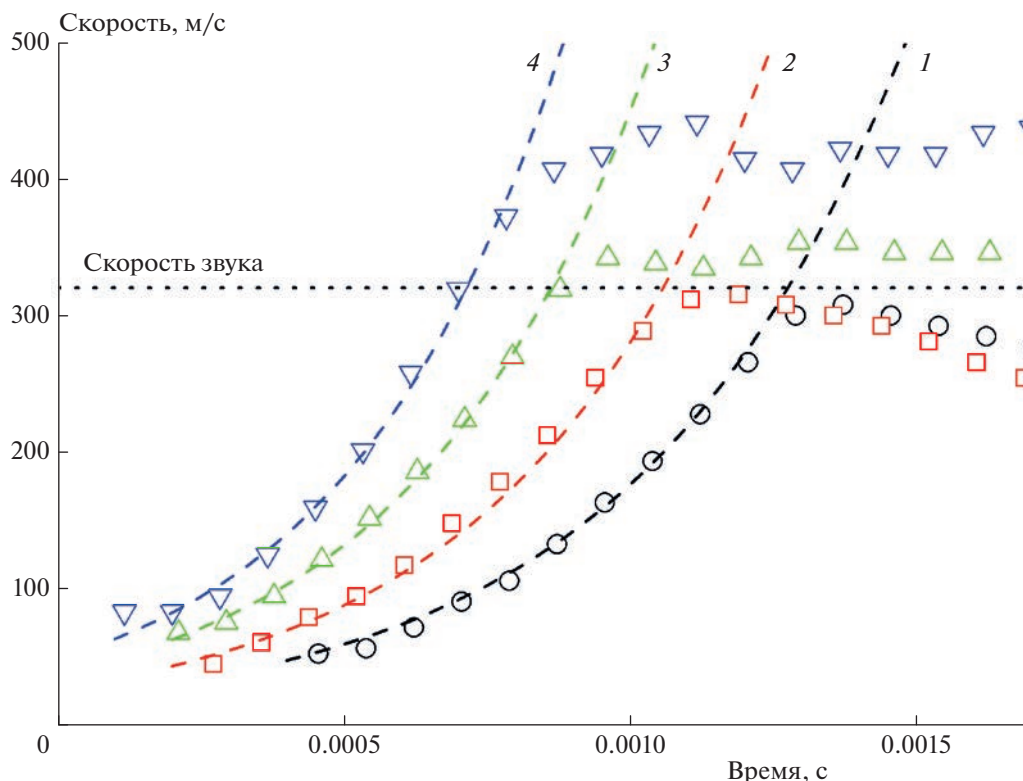


Рис. 3. Начальная стадия распространения пламени в смеси $3\text{C}_2\text{H}_2 + 7.5\text{O}_2 + 3.5\text{Ar}$ при различных начальных давлениях: $\circ$ – 8 кПа, $\square$ – 12 кПа, $\triangle$ – 16 кПа, ∇ – 20.8 кПа. Сравнение экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов из работы [1] с учетом поправочного коэффициента α [10]. Для построения кривых использовали следующие параметры: 1 – $\Theta = 12$, $U_f = 4.5$, $\alpha = 0.6$; 2 – $\Theta = 12.2$, $U_f = 4.9$, $\alpha = 0.58$; 3 – $\Theta = 12.3$, $U_f = 5.85$, $\alpha = 0.51$; 4 – $\Theta = 12.4$, $U_f = 6.9$, $\alpha = 0.46$, входящие в уравнение $U(t) = \Theta U_L \exp\{2\alpha(\Theta - 1)U_L(t - t_0)/R\}$.

Здесь $M = U_f/c_0$ – число Маха пламени, c_0 – скорость звука в исходных реагентах, γ – показатель адиабаты, L – характерный масштаб, равный половине размера канала.

На рис. 2а приведена подробная раскладка видеоряда начальной стадии ускорения пламени (аналогично кадрам 1–5 на рис. 1) и сравнение результатов обработки последовательности представленных изображений (рис. 2б) в одном из экспериментов, выполненных в рамках настоящей работы, с итогами теоретических расчетов по выражениям (1) и (2) согласно данным из работ [1], [10] и [2] соответственно (рис. 2б). Для сравнения использовали смесь $3\text{C}_2\text{H}_2 + 7.5\text{O}_2 + 3.5\text{Ar}$ и следующие значения параметров: начальное давление – 12 кПа, $\Theta = \rho_u/\rho_b = 12.2$, $U_f = 4.9$ м/с, $c_0 = 321$ м/с, $\gamma = 1.379$, $R = L = 0.03$ м, $\alpha = 0.65$. Расчет выполняли с использованием детального кинетического механизма GRI-Mech 3.0.

Анализ представленных на рис. 2б графиков показывает, что рост скорости на начальном эта-

пе ускорения пламени в эксперименте имеет ярко выраженный экспоненциальный характер. Можно констатировать, что модель, предложенная в работе [1], с учетом поправок, сделанных в работе [10], очень хорошо описывает динамику фронта пламени на этапе его ускоренного распространения, чего нельзя утверждать о модели, сформулированной в работе [2].

На рис. 3 и 4 показана динамика фронта пламени на начальной стадии распространения в смесях, разбавленных аргонном (рис. 3) и азотом (рис. 4) при различных начальных давлениях. На графиках приводится сравнение результатов проведенных экспериментов с теоретическими расчетами согласно аналитической теории [1]. Для каждой смеси и начального давления определены соответствующие поправочные коэффициенты показателя степени, сформулированные в работе [10]. Для построения кривых использовались данные о нормальной скорости горения указанных смесей, приведенные в табл. 1.

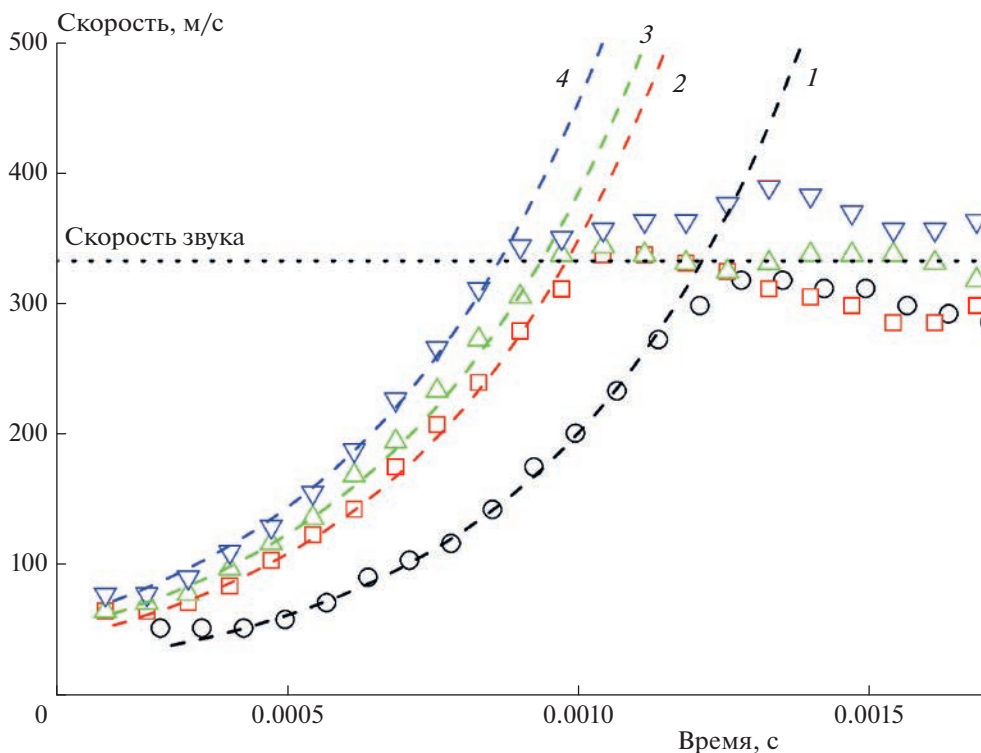


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, но для смеси $3\text{C}_2\text{H}_2 + 7.5\text{O}_2 + 3.5\text{N}_2$. Параметры для построения кривых: 1 – $\Theta = 11.7$, $U_f = 5.3$, $\alpha = 0.57$; 2 – $\Theta = 11.8$, $U_f = 5.8$, $\alpha = 0.51$; 3 – $\Theta = 11.9$, $U_f = 6.2$, $\alpha = 0.47$; 4 – $\Theta = 12$, $U_f = 6.5$, $\alpha = 0.44$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследован процесс ускорения пламени предварительно перемешанных смесей ацетилен/кислород/азот и ацетилен/кислород/аргон при начальном давлении 8–22 кПа в длинной гладкой трубе круглого сечения. Определены нормальные (ламинарные) скорости горения указанных смесей. Выполнено сравнение динамики поведения фронта пламени с известными теоретическими представлениями. Показано, что результаты эксперимента на начальной стадии ускоренного распространения пламени хорошо описываются экспоненциальной зависимостью, сформулированной в работе [1] с точностью до поправочного коэффициента, предложенного в работе [10].

Авторы искренне благодарны и признательны С.Ю. Шимченко, В.В. Кузьмищкому и А.О. Новицкому (Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси) за содействие при подготовке данной публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Clanet C., Searby G. // *Combust. and Flame*. 1996. V. 105. P. 225.
2. Valiev D., Akkerman V., Kuznetsov M. et al. // *Ibid*. 2013. V. 160. № 1. P. 97.
3. Balossier Y., Virot F., Melguizo-Gavilanes J. // *Shock Waves*. 2021. V. 31. № 4. P. 307.
4. Кривошеев П.Н., Новицкий А.О., Пенязьков О.Г. // *Хим. физика*. 2022. Т. 41. № 8. С. 38.
5. Smith G.P., Golden D.M., Frenklach M. et al.; <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/>
6. Киверин А.Д., Тюрнин А.В., Яковенко И.С. // *Хим. физика*. 2021. Т. 40. № 12. С. 18.
7. Ivanov M.F., Kiverin A.D., Yakovenko I.S. et al. // *Intern. J. Hydrogen Energy*. 2013. V. 38. P. 16427.
8. Krivosheyev P., Penyazkov O., Sakalou A. // *Combust. and Flame*. 2020. V. 216. P. 146.
9. Киверин А.Д., Смыгина А.Е., Яковенко И.С. // *Хим. физика*. 2020. Т. 39. № 8. С. 9.
10. Liberman M.A., Chukalovsky A.A., Rakhimova T.V., Ivanov M.F., Kiverin A.D. et al. // *Acta Astronaut.* 2010. V. 67. № 7–8. P. 688.