

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 536.46

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И ФОРМЫ ФРОНТА РЕАКЦИИ ПРИ УСКОРЕНИИ ПЛАМЕНИ И ПЕРЕХОДЕ ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ

© 2022 г. П. Н. Кривошеев^{1*}, А. О. Новицкий¹, О. Г. Пенязьков¹

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

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

Поступила в редакцию 14.01.2022;
после доработки 17.02.2022;
принята в печать 21.02.2022

Для понимания механизмов и особенностей процесса ускорения пламени и перехода медленного горения в детонацию методом высокоскоростной съемки проведено экспериментальное исследование фронта пламени при горении предварительно перемешанной газовой смеси в длинной гладкой трубе с прозрачными стенками. Использовалась стехиометрическая смесь ацетилена с кислородом, разбавленная на 25% аргоном. Определена эволюция структуры и формы фронта пламени с момента инициирования горения слабым источником зажигания и до формирования детонационной волны. Выделены четыре характерные фазы процесса распространения: на первой стадии пламя ускоряется, затем следует стадия его замедления, период распространения пламени с почти постоянной скоростью и стадия повторного ускорения, в ходе которого и формируется детонация. Показано как меняется динамика процесса при изменении начального давления смеси. Детально описана наиболее интересная и малоизученная стадия процесса перехода горения в детонацию — стадия интенсивного повторного ускорения, в ходе которой пламя резко меняет свою форму.

Ключевые слова: медленное горение, ускорение пламени, структура и форма фронта пламени, переход горения в детонацию, самовоспламенение, взрыв, высокоскоростная съемка.

DOI: 10.31857/S0207401X22080076

ВВЕДЕНИЕ

При воспламенении смеси газообразного топлива с окислителем процесс медленного дозвукового горения (дефлаграция) наиболее вероятен, а механизм распространения дозвуковой волны горения заключается в переносе тепла и активных радикалов из зоны реакции к свежей смеси. Однако в ряде случаев при распространении в замкнутом объеме процесс развивается в нестационарном режиме и волна медленного горения может самопроизвольно ускоряться и переходить в детонационную [1–4]. Помимо экстремальной скорости распространения, волна детонации характеризуется гораздо более высокими, по сравнению с волной дозвукового горения, температурой и давлением. Мощность тепловыделения с единицы площади поверхности в детонационном фронте в тысячи раз выше, чем во фронте реакции при дефлаграции, а скорость продуктов детонации в десятки раз выше скорости продуктов медленного горения. На сегодняшний день принято считать, что именно детонация является самым эффективным, но и наиболее опасным режимом горения, а режимы нестационарного ускорения пла-

мени, в рамках которых реализуются условия для перехода к детонации, расцениваются как особенно разрушительные [5].

Быстрое распространение пламени и детонацию газов начали активно изучать в 20–30-е годы XX века. Широко использовались как контактные (измерения давления и скорости головной ударной волны, детонационной волны посредством пьезоэлектрических датчиков давления, измерения скорости фронта реакции с помощью датчиков тока ионизации, регистрация ячеистой структуры детонационной волны с помощью методики получения отпечатков на поверхности, покрытой слоем сажи) так и бесконтактные (регистрация излучения и поглощения, скоростная фотография с использованием теневых и интерференционных методов и т.д.) методы экспериментальной диагностики. Среди многообразия экспериментальных методов исследования скоростная фотография процесса является одним из наиболее информативных, дающих максимально наглядное и полное представление о процессе, его деталях и особенностях.

Первые фотографии фронта пламени и динамики изменения его формы во времени, при горении газа в трубе, вероятнее всего, были представлены в работе [6]. Используя уникальные для того времени методики и оборудование, авторы визуализировали распространение пламени в стеклянной трубке диаметром 25 мм и длиной 2 м в смеси окиси углерода с кислородом. Детальное, последовательное описание и теневые фотографии всех стадий процесса ускорения пламени и возникновения детонации впервые были представлены в работе [4].

Начальная стадия распространения пламени и последующее формирование его так называемой “тюльпанообразной” формы в закрытых и полукрытых трубах в дальнейшем подробно исследованы в работах [7–17] в большинстве случаев с использованием метода теневого фотографирования. Заключительная стадия ускорения пламени и возникновение условий для формирования детонационной волны стали предметом исследования в работах [18–27]. Были описаны различные режимы формирования детонации и представлены соответствующие теневые фотографии. Все работы, как правило, проводили в каналах прямоугольного сечения, что стало прямым следствием возможностей диагностики с использованием теневых и интерференционных методов визуализации течения.

Общим недостатком ранее выполненных экспериментальных работ оказалось то, что из-за несовершенства имеющейся на тот момент регистрирующей аппаратуры удавалось получать искомые изображения быстропротекающих процессов только в течение чрезвычайно короткого промежутка времени. Кроме того, размеры оптических окон для наблюдения были малы по сравнению с характерным масштабом самого процесса – длиной перехода горения в детонацию (ПГД). В совокупности это приводило к получению последовательности изображений только отдельных стадий процесса ускорения пламени либо формирования детонационной волны. Для получения информации о, например, более ранней или более поздней стадиях ускорения пламени при тех же начальных условиях приходилось менять положение измерительной секции, перемещая ее вдоль оси трубы. Все это накладывало существенные ограничения на возможности анализа всего процесса ПГД в целом, поскольку информация в виде последовательности изображений поступала разрозненно из разных серий экспериментов.

Несмотря на большое количество теоретических работ, описывающих процессы ускорения пламени и формирования детонации, в той или иной мере учитывающих влияние различного ро-

да физико-химических факторов (температуры, давления, плотности среды, ее вязкости и теплопроводности, турбулентности, кинетики химических реакций, граничных условий и т.д.) [28–70], единой теории процесса перехода горения в детонацию не существует. Это связано с ограниченностью самих моделей, неточным знанием значений большого количества различных констант, необходимых для описания химических и физических взаимодействий в системе в широком диапазоне термодинамических условий, а также с несовершенством численных методов решения уравнений, описывающих данный процесс. В ряде обзорных работ [71–73] обобщена имеющаяся по состоянию на 2007–2008 гг. информация по теоретическому и экспериментальному исследованию ускорения пламени и переходу горения в детонацию в газовых смесях. Полноценное трехмерное моделирование процесса ПГД с необходимым разрешением по времени и пространству в настоящее время вряд ли возможно, поскольку требует очень серьезных вычислительных мощностей. Однако следует ожидать, что по мере развития компьютерной техники в ближайшем будущем такое моделирование будет выполнено и потребуются сравнение полученных результатов с реальными экспериментальными данными.

С развитием современных средств фоторегистрации изображений (высокоскоростные цифровые камеры) появилась возможность получить детальную визуальную информацию о всем процессе ускорения пламени и перехода горения в детонацию полностью по всей длине канала, начиная с момента инициирования пламени локальным источником и заканчивая возникновением детонационной волны. Такая информация чрезвычайно полезна для понимания динамики процесса ускорения и пространственной конфигурации пламени в целом, поскольку дает возможность сравнить и верифицировать имеющиеся и разрабатываемые теоретические модели с реальными экспериментальными данными с высоким разрешением по времени и пространству. Цель настоящей работы – получение детальной, с высоким пространственно-временным разрешением визуальной информации обо всех стадиях процесса ускорения пламени и перехода медленного горения в детонацию, что позволит увидеть детали и понять физические механизмы явления.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения экспериментов использовали калиброванную, с прозрачными стенками пластиковую трубу (торговая марка Plexiglas) цилин-

дрического сечения внутренним диаметром 60 мм и толщиной стенки 5 мм; длина трубы составляла 6 м (3 секции по 2 м каждая). Указанные размеры длины трубы и ее диаметр позволяли избежать эффектов, связанных с отражением волн сжатия от дальнего торца трубы и их взаимодействия с фронтом пламени на протяжении всего процесса горения вплоть до перехода в детонацию. Один из торцов трубы заглушен, в нем была установлена система инициирования горения. Другой конец трубы закрывался тонкой лавсановой диафрагмой, способной выдержать перепад давления в 1–1.5 атм. Перед проведением эксперимента проводили вакуумирование трубы до остаточного давления не более 10–20 Па, после чего заполняли ее 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.

Начальное давление смеси варьировалось от 8 до 22 кПа при комнатной температуре. Для инициирования горения применяли систему на основе стандартной автомобильной свечи с малой энергией зажигания (приблизительно 0.8 мДж).

Эксперименты проводили в стехиометрической смеси ацетилена и кислорода, разбавленной аргоном на 25%. Ацетилен в качестве горючего был выбран по нескольким причинам. С точки зрения технических приложений он является наиболее востребованным среди газообразных углеводородов. Ацетилен можно синтезировать искусственно, он поддерживает устойчивое горение в широком диапазоне составов и термодинамических условий и может быть использован как напрямую в качестве топлива, так и в виде добавки к основному топливу. Добавка ацетилена позволяет снизить эмиссию окислов азота, тем самым обеспечить экологичность рабочего цикла современных двигателей внутреннего сгорания. С другой стороны, использование ацетилена может привести к развитию детонационно-подобных режимов горения из-за его высокой химической активности. Ацетилен обладает самым высоким энергетическим потенциалом и высокой детонационной способностью в ряду других углеводородов. Механизм его воспламенения и горения считается хорошо известным и входит важной составной частью в соответствующие детальные кинетические механизмы (ДКМ) для более сложных углеводородов [74–81]. Несмотря на это, в недавних исследованиях [82] на примере сравнения экспериментальных данных с расчетами по детальному кинетическому механизму [83, 84] показано, что существующие ДКМ не всегда корректно опи-

сывают режимы высокотемпературного окисления смесей ацетилена; кроме того, актуальны вопросы редуцирования и оптимизации существующих кинетических механизмов [85].

Для фотографирования фронта пламени использовали две идентичные высокоскоростные камеры Photron Fastcam SA-Z, модель 2100 K-M-8GB (Япония). Камеры располагались перпендикулярно оси трубы последовательно одна за другой, так чтобы их поля зрения взаимно перекрывались на 10–15% для последующего совмещения ряда изображений. Скорость съемки составляла 180 тыс. кадр/с при пространственном разрешении 1024 × 88 пикселей; расстояние от объектива камеры до трубы – 850 мм, поле зрения камеры вдоль оси трубы – 650 мм. Время экспозиции каждого кадра составляло 1–1.3 мкс. Обе камеры оснащены объективами Tamron SP 24–70 мм F/2.8 Di VC USD, модель A007 и узкополосными оптическими фильтрами компании Edmund Optics (UK): BP 430 ± 10 нм, OD4, диаметром 50 мм. Полоса пропускания фильтров соответствует длине волны излучения промежуточного радикала СН. Таким образом, удавалось получить качественное изображение фронта пламени, исключив паразитную засветку от продуктов сгорания. Настройки обеих камер (время начала записи, общее время записи, разрешение кадра, скорость съемки, время экспозиции каждого кадра и т.д.) как и настройки обоих объективов и используемые светофильтры были абсолютно идентичными. Камеры были синхронизированы между собой и управлялись с использованием одного компьютера с программным обеспечением Photron Fastcam Viewer.

Анализ полученных изображений по смещению области свечения от кадра к кадру позволил определить скорость распространения фронта пламени вдоль оси трубы. С учетом незначительных (порядка нескольких пикселей) смещений (особенно при малых скоростях распространения) значения скорости рассчитывали как среднее по 5–20 кадрам. При определении скорости также учитывались эффекты, связанные с искажением изображения при наблюдении в направлении, отличном от перпендикулярного. В дальнейшем на графиках зависимостей скорости фронта пламени от расстояния или времени приводятся усредненные (интерполированные) кривые.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках одной экспериментальной серии начальное давление смеси уменьшали от опорного значения 22 до 8 кПа. Это приводило к тому, что местоположение перехода горения в детонацию от

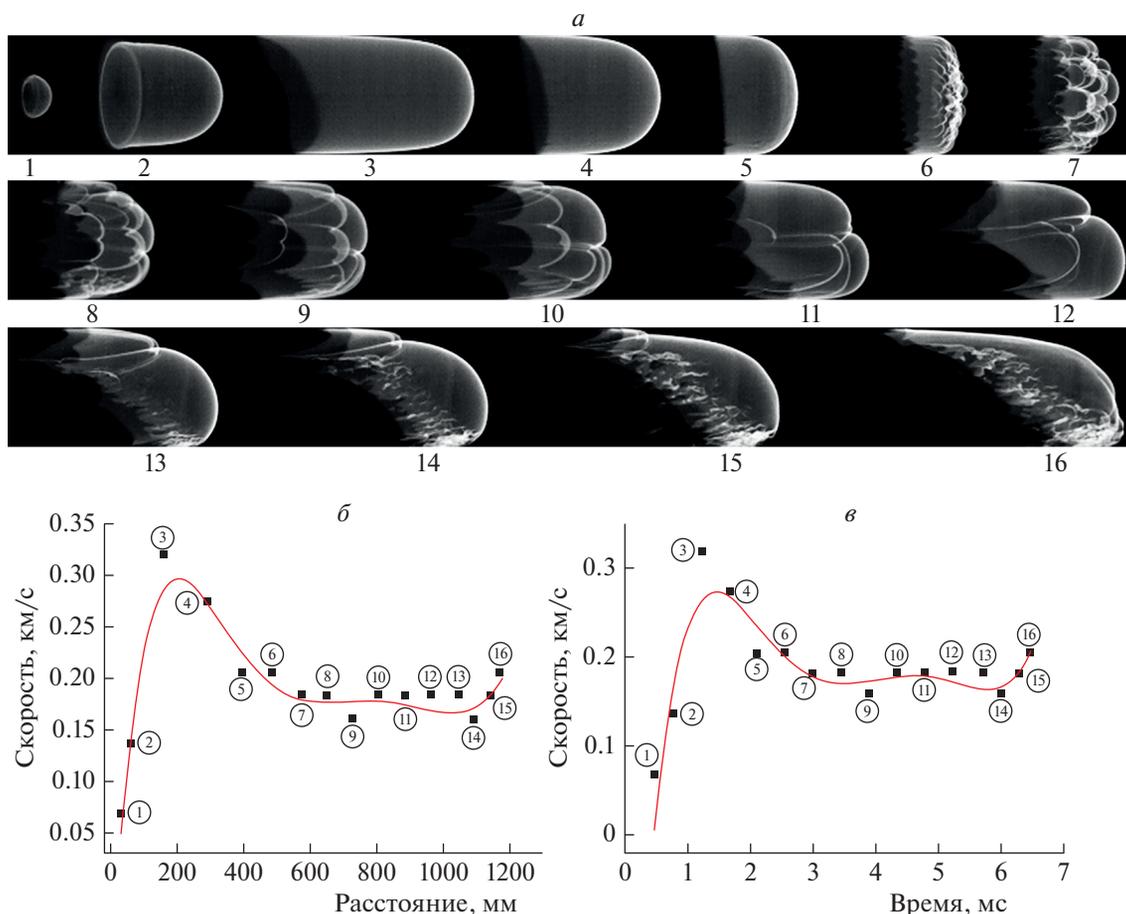


Рис. 1. Мгновенные фотографии высокоскоростной съемки свечения фронта пламени в смеси ацетилен/кислород/аргон для начального давления 8 кПа (а); поперечный размер каждого кадра (внутренний диаметр трубы) – 60 мм. Профили скорости (интерполяция по результатам обработки и усреднения массива изображений) в зависимости от расстояния (б) и времени (в). Числа на графиках указывают положения во времени соответствующих мгновенных изображений фронта пламени.

эксперимента к эксперименту смещалось вдоль трубы, а расстояние и, соответственно, время ПГД увеличивалось при уменьшении начального давления. В ряде экспериментов сам момент возникновения детонации уже не попадал в поле зрения камер, однако это давало нам возможность подробнее изучить более ранние стадии процесса ускорения пламени.

На рис. 1–5 показаны последовательные фотографии распространения волны горения при различных начальных давлениях газовой смеси. Интервал времени между представленными кадрами выбран таким образом, чтобы эволюция структуры пламени от момента зажигания до момента перехода к детонации по возможности состояла из одинакового количества кадров (15 или 16).

Кроме того, на графиках движения волны приведены измеренные по фотографиям кривые зависимостей продольной скорости передней кромки фронта пламени от расстояния либо вре-

мени. Моменты времени и расстояния вдоль оси трубы, отвечающие изображениям фронта пламени, представленным на рисунках, показаны на графиках номерами соответствующих фотографий.

Анализ изображений позволяет сделать следующие выводы. До момента формирования детонационной волны, наблюдаются четыре характерные стадии распространения пламени. На первой – фронт пламени ускоряется, затем следует стадия замедления, стадия распространения с почти постоянной скоростью и, наконец, стадия повторного ускорения, на заключительном этапе которой и формируется детонация.

Рассмотрим более подробно структуру и скорость фронта пламени на каждой стадии в отдельности. За счет выталкивающего действия продуктов сгорания, плотность которых гораздо ниже, а давление немного выше, чем в исходной смеси, газ перед фронтом волны приходит в движение,

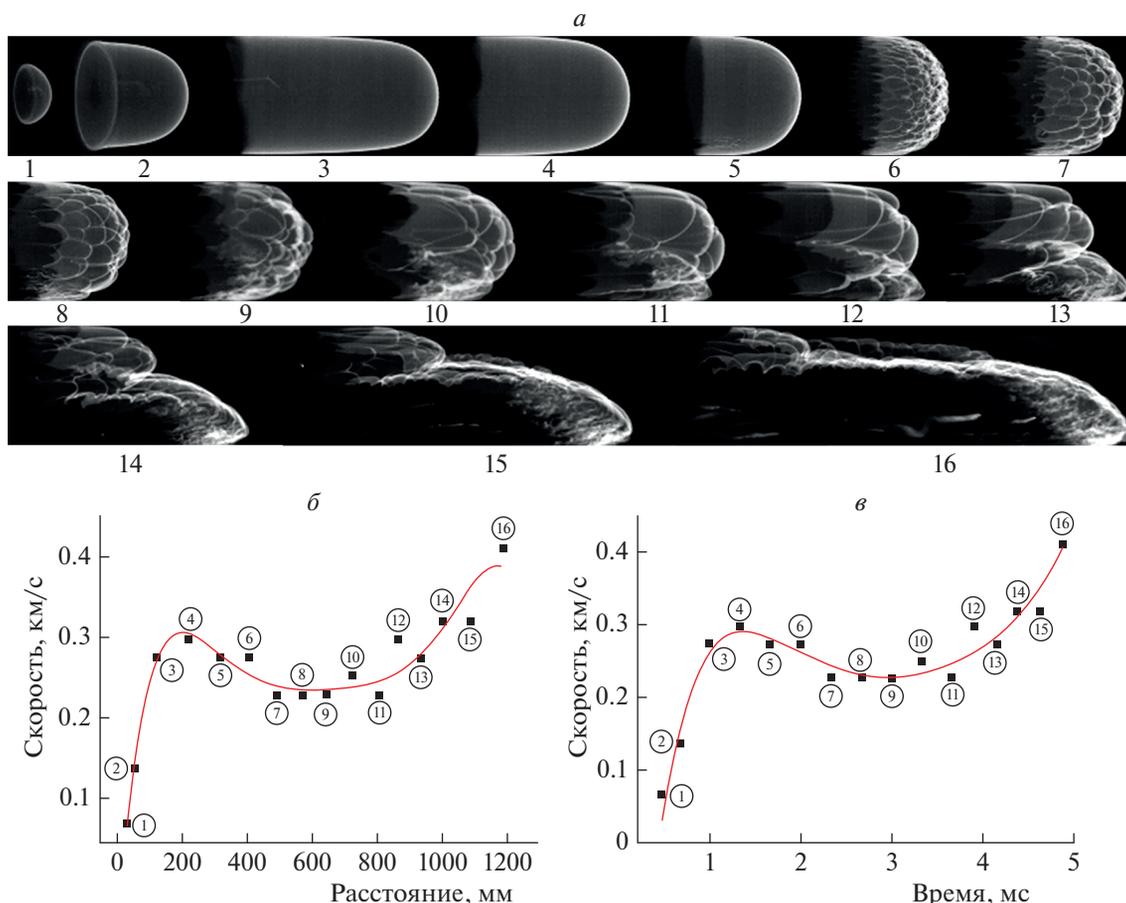


Рис. 2. То же, что и на рис. 1 для начального давления 12 кПа.

вовлекая зону реакции в движение вдоль оси трубы. В начальные моменты времени после зажигания смеси, пока пламя еще не достигло стенок трубы, его форма является практически идеальной полусферой (кадры 1 на рис. 1–5). Затем по мере достижения стенок трубы пламя начинает вытягиваться в направлении движения вдоль оси, занимая все поперечное сечение канала – формируется так называемая пальцеобразная (finger flame) форма пламени [14] (кадры 2–4, рис. 1–5). К этому моменту времени (1.5 мс от момента поджига для начального давления 8 кПа и около 1 мс для давления 20 кПа) скорость волны по отношению к наблюдателю достигает значения 300 м/с для давления 8 кПа и более 400 м/с для давления 22 кПа соответственно. К моменту достижения максимума скорости волны на первой фазе ускорения протяженность области свечения реагирующей смеси, т.е. зоны, где интенсивно протекает химическая реакция, достигает двух диаметров канала. Контуры фронта пламени – ровные и четкие, что свидетельствует о ламинарном характере горения.

На следующем этапе фронт пламени начинает замедляться. Вблизи закрытого торца трубы, т.е. в зоне зажигания, где продукты сгорания находятся максимально длительное время, возникает область разрежения, которая формирует поток газа в направлении, противоположном движению пламени. Скорость фронта пламени вдоль трубы падает с 300 до 200 м/с для давления 8 кПа, т.е. дефицит скорости составляет приблизительно 1/3 от ее максимальной величины на первой стадии ускорения (рис. 1б, в). С ростом начального давления до 22 кПа эффект торможения выражается не так ярко. Дефицит скорости волны по отношению к ее амплитуде в первом максимуме уменьшается и составляет около 10% (рис. 5б, в). Фронт пламени приобретает более плоскую форму (кадры 4–6, рис. 1–5), особенно это заметно при низком начальном давлении смеси, равном 8 кПа. Его протяженность вдоль оси трубы существенно уменьшается: с двух и более диаметров до половины диаметра трубы. Поверхность фронта пламени начинает дробиться и на ней формируется ячеистая или сотовая структура. Перед фронтом

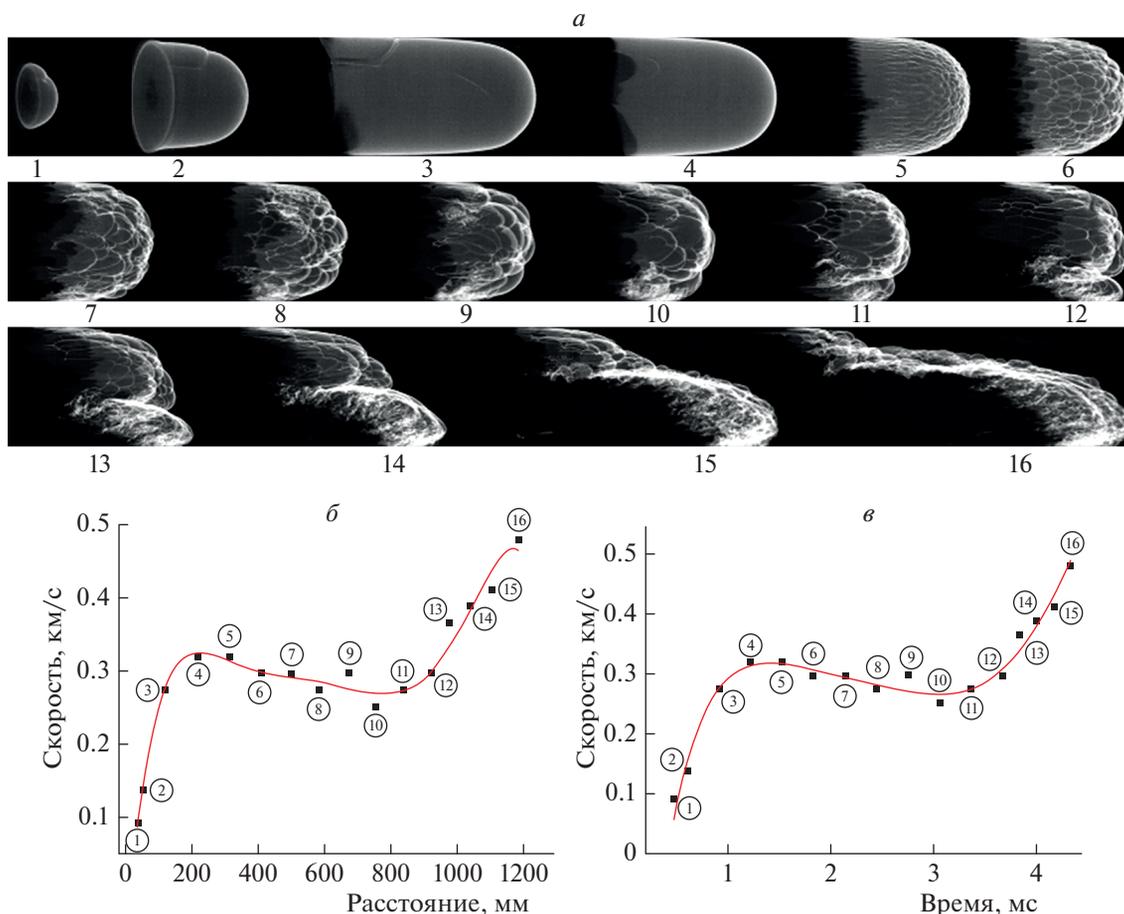


Рис. 3. То же, что и на рис. 1 для начального давления 14 кПа.

пламени наблюдается поток несгоревшего газа в направлении движения фронта, вызванный выталкивающим действием расширяющихся продуктов сгорания и возмущениями, генерируемыми пламенем и распространяющимися вниз по потоку со звуковой скоростью. За фронтом поток, вызванный волнами разрежения в продуктах сгорания, направлен в противоположную сторону. Фронт, как поверхность разрыва, подвержен газодинамической (Дарье–Ландау) и термодиффузионной (Рэля–Тейлора) неустойчивостям, что также значительно влияет на изменение формы его поверхности и ведет к появлению ячеистых структур. Размеры формирующейся структуры сильно зависят от начального давления газовой смеси и резко уменьшаются с его увеличением. Фаза замедления фронта пламени длится от момента времени 1.5 мс для давления 8 кПа и до 0.6–0.7 мс для давления 22 кПа. За этот промежуток времени фронт пламени проходит расстояния 0.4 и 0.2 м вдоль оси трубы соответственно.

За фазой замедления следует некоторый период времени, когда фронт пламени распространя-

ется с почти постоянной скоростью. Как видно из фотографий (кадры 7–14, рис. 1; кадры 7–12, рис. 2–4; кадры 7–9, рис. 5), длительность этой стадии составляет от 0.7 мс при начальном давлении 20.8 кПа до 3 мс при давлении 8 кПа. Структура и форма фронта пламени за этот период практически не претерпевают существенных изменений. Форма фронта горения близка к полусферической и вытянута вперед приблизительно на диаметр канала вдоль оси трубы. Поверхность фронта пламени имеет ярко выраженную ячеистую структуру, причем по мере движения пламени размер ячеек начинает укрупняться, а их количество сокращается. Также они начинают вытягиваться в продольном направлении вдоль оси трубы. Этот эффект наиболее ярко выражен при низких начальных давлениях.

Наконец на заключительной четвертой стадии наблюдается повторное ускорение фронта пламени. При этом его форма и структура претерпевают существенные изменения. Один из участков фронта пламени начинает резко выдвигаться вперед в направлении движения. Авторы работы [4]

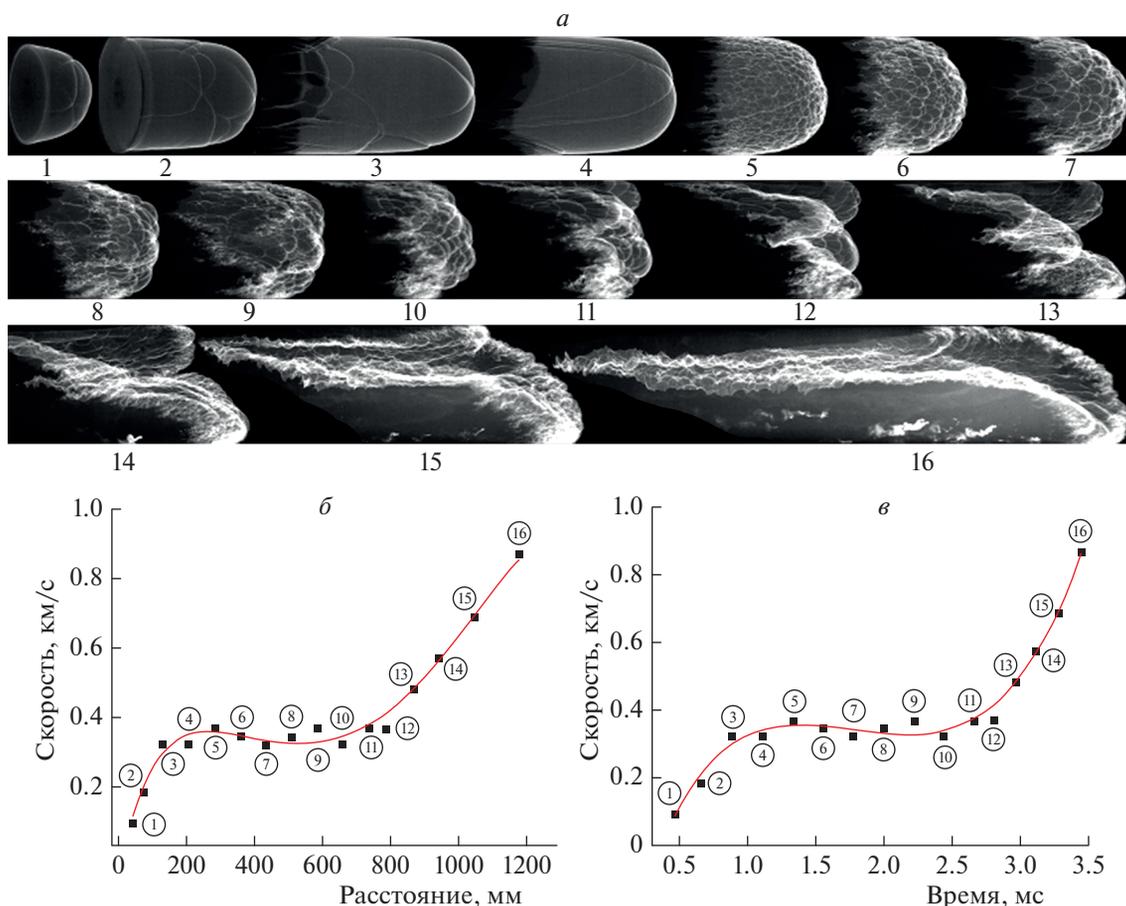


Рис. 4. То же, что и на рис. 1 для начального давления 16 кПа.

установили, что вперед выдвигается верхний участок пламени и объяснили это следующим образом: фронт пламени является границей раздела между тяжелой свежей смесью с большей плотностью и более легкими продуктами сгорания. Под действием силы тяжести тяжелая свежая смесь растекается по нижней части трубы, а более легкие продукты сгорания стремятся расположиться в верхней части, выталкивая фронт пламени вперед. Наши наблюдения показывают, что ориентация головного языка фронта пламени по отношению к периметру трубы имеет скорее случайный характер (рис. 1–5). По мере растяжения фронта пламени вдоль оси трубы происходит существенный прирост площади горения и его скорость начинает резко возрастать. Пламя принимает коническую, сильно вытянутую вдоль оси трубы форму, детально описанную в работе [82]. На кадре 15 рис. 5 при начальном давлении смеси 20.8 кПа окружностью выделено возникновение локального очага детонации в области пограничного слоя в одной из складок кромки пламени, опоясывающей стенки канала. Развитие этого очага

приводит к формированию пересжатой детонационной волны, которая распространяется вверх и вниз по потоку. В экспериментах при меньших начальных давлениях (8–16 кПа, рис. 1–4) процесс возникновения детонации уже не попадал в поле зрения системы наблюдения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом высокоскоростной визуализации исследована эволюция структуры и формы фронта пламени при горении и переходе в детонацию ацетилено-кислородной смеси в трубе цилиндрического сечения диаметром 60 мм. На фотографиях высокоскоростной съемки показаны и описаны четыре характерные стадии процесса горения газовой смеси: на первой стадии пламя ускоряется, затем следует стадия замедления, далее – стадия распространения практически с постоянной скоростью и, наконец, повторное ускорение, в ходе которого и формируется детонация. Приведены кадры характерной для каждой стадии формы пламени, определены зависимости скорости

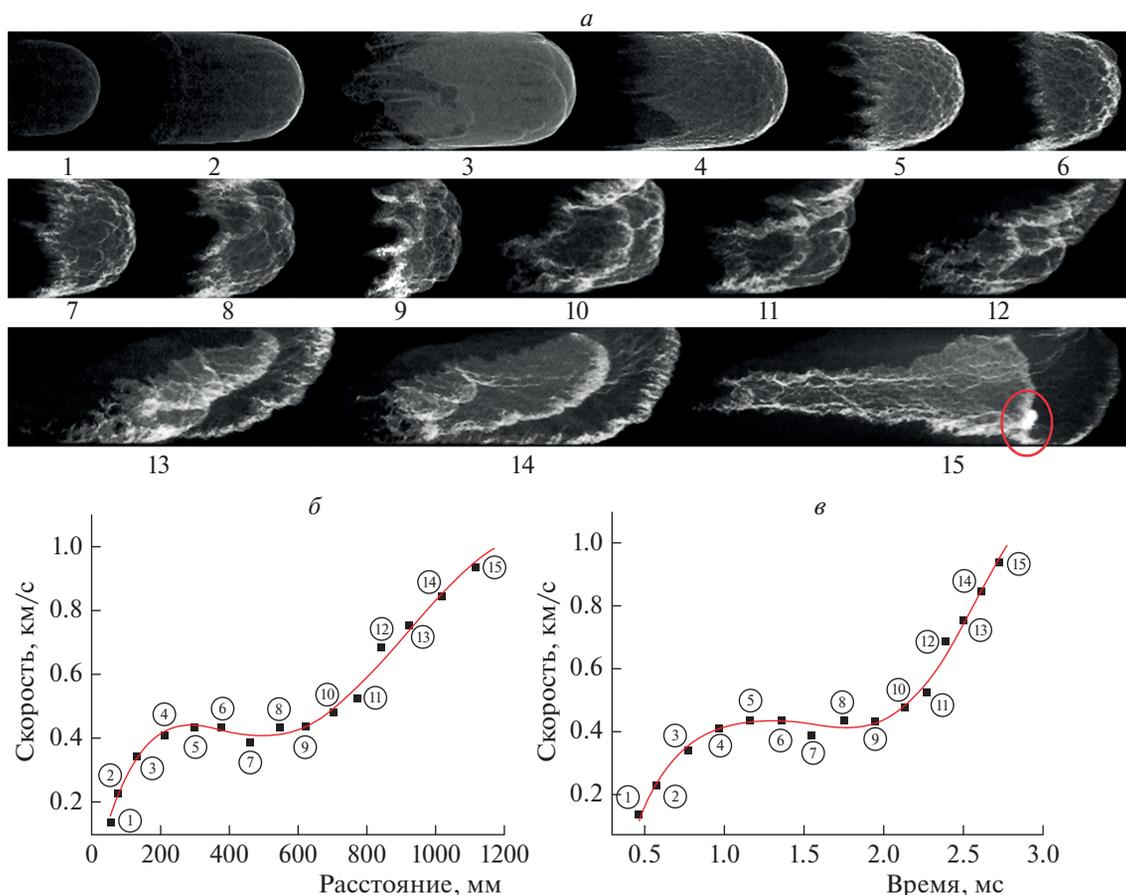


Рис. 5. То же, что и на рис. 1 для начального давления 20.8 кПа. На кадре 15 окружностью выделено возникновение локального очага детонации в области пограничного слоя.

фронта пламени вдоль оси трубы. Наиболее интересной и недостаточно изученной, на наш взгляд, является стадия повторного ускорения пламени, когда его скорость быстро возрастает от 300–400 до 1000–1200 м/с и перед фронтом пламени (или на его кромке) формируется детонационная волна. При этом в ходе развития этой стадии форма фронта пламени претерпевает резкие изменения – формируется коническая, сильно вытянутая вдоль оси трубы структура, детально описанная в работе [82]. Представленные в нашей работе новые данные выгодно отличаются от опубликованных ранее тем, что визуализация процесса для каждого начального давления смеси на всех стадиях получена в рамках одного экспериментального пуска с высокой пространственно-временной степенью детализации структуры фронта пламени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я.Б. Теория горения и детонации газов / Под ред. Семёнова Н.Н. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1944.

2. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. Пер. с англ. Воеводского В.В. / Под ред. Франк-Каменецкого Д.А. М.: Изд-во иностр. лит., 1948.
 3. Щелкин К.И. // Успехи физ. наук. 1965. Т. 87. № 2. С. 273.
 4. Саламандра Г.Д., Баженова Т.В., Набоко И.М. // ЖТФ. 1959. Т. 29. № 11. С. 1354.
 5. Ng H.D., Lee J.H. // J. Loss Prev. Process Ind. 2008. V. 21. № 2. P. 136.
 6. Ellis O.C., Wheeler R.V. // J. Chem. Soc. 1928. P. 3215; <https://doi.org/10.1039/JR280003215>
 7. Guenoche H., Jouy M. // Proc. 4th Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh: The Combust. Inst., 1953. P. 403.
 8. Dunn-Rankin D., Sawyer R.E. // Proc. 10th ICDERS. Berkley, California. 1985.
 9. Starke R., Roth P. // Combust. and Flame. 1986. V. 66. № 3. P. 249.
 10. Dunn-Rankin D., Barr P.K., Sawyer R.F. // Proc. 21st Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh: The Combust. Inst., 1986. P. 1291.
 11. Rotman D.A., Oppenheim A.K. // Ibid. P. 1303.
 12. Starke R., Roth P. // Combust. and Flame. 1989. V. 75. № 1. P. 111.

13. *Gonzalez M., Borghi R., Saouab A.* // *Ibid.* 1992. V. 88. № 2. P. 201.
14. *Clanet C., Searby G.* // *Ibid.* 1996. V. 105. P. 225.
15. *Dunn-Rankin D., Sawyer R.F.* // *Exp. Fluids.* 1998. V. 24. P. 130.
16. *Xiao H.H., Sun J.H., Makarov D. et al.* // *Combust. and Flame.* 2012. V. 159. № 4. P. 1523.
17. *Xiao H., Shen X., Guo S. et al.* // *Ibid.* 2013. V. 160. № 9. P. 1725.
18. *Бабкин В.С., Козаченко Л.С.* // ПМТФ. (Новосибирск). 1960. № 3. С. 165.
19. *Солоухин Р.И.* // Там же. 1961. № 4. С. 128.
20. *Солоухин Р.И.* Ударные волны и детонация в газах. М.: Физматлит, 1963.
21. *Urtiew P.A., Oppenheim A.K.* // *Proc. R. Soc. London. Ser. A.* 1966. V. 295. P. 13.
22. *Urtiew P.A., Oppenheim A.K.* // *Proc. 11th Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh: The Combust. Inst., 1967.* P. 665.
23. *Urtiew P.A., Oppenheim A.K.* // *Proc. R. Soc. London. Ser. A.* 1968. V. 304. P. 379.
24. *Smirnov N.N., Tyurnikov M.* // *Combust. and Flame.* 1995. V. 100. № 4. P. 661.
25. *Kuznetsov M., Alekseev V., Matsukov I. et al.* // *Shock Waves.* 2005. V. 14. P. 205.
26. *Lieberman M.A., Ivanov M.F., Kiverin A.D. et al.* // *Acta Astronaut.* 2010. V. 67. P. 688.
27. *Balossier Y., Virof F., Melguizo-Gavilanes J.* // *J. Loss Prev. Process Ind.* 2021. V. 72. P. 104535.
28. *Oppenheim A.K., Soloukhin R.I.* // *Ann. Rev. Fluid Mech.* 1973. V. 5. P. 31.
29. *Zeldovich Ya.B., Librovich V.B., Makhviladze G.M. et al.* // *Acta Astronaut.* 1970. V. 15. P. 313.
30. *Zeldovich Ya.B.* // *Combust. and Flame.* 1980. V. 39. № 2. P. 211.
31. *Зельдович Я.Б.* // ЖТФ. 1947. Т. 7. № 1. С. 3.
32. *Troshin Ya.* // *Proc. 7th Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh: The Combust. Inst., 1958.* P. 789.
33. *Adams G.K., Pack D.C.* // *Ibid.* P. 812.
34. *Taki S., Fujiwara T.* // *Proc. 13th Sympos. (Intern.) on Combust. Pittsburgh: The Combust. Inst., 1971.* P. 1119.
35. *Lee J.H.S., Knystautas R., Yoshikawa N.* // *Acta Astronaut.* 1978. V. 5. P. 971.
36. *Yoshikawa N.* PhD thesis. McGill University, Dept. Mechanical Engineering. Montreal, Canada. 1980.
37. *Kurylo J., Dwyer H.A., Oppenheim A.K.* // *AIAA J.* 1980. V. 18. № 3. P. 302.
38. *Zeldovich Ya.B., Gelfand B.E., Tsyganov S.A. et al.* // *Prog. Astronaut. Aeronaut.* 1988. V. 114. P. 99.
39. *Deshaiies B., Joulin G.* // *Combust. and Flame.* 1989. V. 77. № 2. P. 201.
40. *Shepherd J.E., Lee J.H.S.* Major Research Topics in Combustion / Eds. Hussaini M.Y., Kumar A., Voigt R.G. New York: Springer, 1992.
41. *Smirnov N.N., Panfilov I.I.* // *Combust. and Flame.* 1995. V. 101. № 1–2. P. 91.
42. *Brailovsky I., Sivashinsky G.* // *Ibid.* 2000. V. 122. № 4. P. 492.
43. *Gamezo V.N., Khokhlov A.M., Oran E.S.* // *Ibid.* 2001. V. 126. № 4. P. 1810.
44. *Kagan L., Sivashinsky G.* // *Ibid.* 2003. V. 134. № 4. P. 389.
45. *Bychkov V., Akkerman V.* // *Phys Rev E.* 2006. V. 73. P. 066305.
46. *Akkerman V., Bychkov V., Petchenko A. et al.* // *Combust. and Flame.* 2006. V. 145. № 1–2. P. 206.
47. *Kagan L.* // *Math. Modell. Nat. Phenom.* 2007. V. 2. № 2. P. 40.
48. *Silvestrini M., Genova B., Parisi G. et al.* // *J. Loss Prev. Process Ind.* 2008. V. 21. № 5. P. 555.
49. *Valiev D., Bychkov V., Akkerman V. et al.* // *Phys. Lett. A.* 2008. V. 372. P. 4850.
50. *Kagan L., Sivashinsky G.* // *Combust. and Flame.* 2008. V. 154. № 1–2. P. 186.
51. *Valiev D.M., Bychkov V., Akkerman V. et al.* // *Phys. Rev. E.* 2009. V. 80. P. 036317.
52. *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Гальбурт В.А.* // *Хим. физика.* 2009. Т. 28. № 5. С. 35.
53. *Lieberman M.A., Kuznetsov M., Ivanov A. et al.* // *Phys. Lett. A.* 2009. V. 373. P. 501.
54. *Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Либерман М.А. и др.* // *ДАН.* 2010. Т. 434. № 6. С. 756.
55. *Иванов М.Ф., Киверин А.Д.* // *Хим. физика.* 2010. Т. 29. № 2. С. 48.
56. *Ivanov M.F., Kiverin A.D., Lieberman M.A.* // *Phys. Rev. E.* 2011. V. 83. № 5. P. 056313.
57. *Ivanov M., Kiverin A., Lieberman M.* // *Intern. J. Hydrog. Energy.* 2011. V. 36. Issue 13. P. 7714.
58. *Dzieminska E., Hayashi A.* // *Ibid.* 2013. V. 38. Issue 10. P. 4185.
59. *Fukuda M., Dzieminska E., Hayashi A. et al.* // *Shock Waves.* 2013. V. 23. P. 191.
60. *Kiverin A., Yakovenko I., Ivanov M.* // *Intern. J. Hydrog. Energy.* 2016. V. 41. Issue 47. P. 22465.
61. *Kagan L., Sivashinsky G.* // *Proc. Combust. Inst.* 2017. V. 36. № 2. P. 2709.
62. *Han W., Gao Y., Law C.K.* // *Combust. and Flame.* 2017. V. 176. P. 285.
63. *Akkerman V.B.* Modeling and Simulation of Turbulent Combustion. / Eds. De S., Agarwal A., Chaudhuri S. et al. Singapor: Springer Singapor, 2018.
64. *Kiverin A., Yakovenko I.* // *Math. Modell. Nat. Phenom.* 2018. V. 13. № 6. P. 54.
65. *Bang B.H., Ahn C.S., Kim Y.T. et al.* // *Appl. Math. Model.* 2019. V. 66. P. 332.
66. *Dounia O., Vermorel O., Misdariis A. et al.* // *Combust. and Flame.* 2019. V. 200. P. 1.
67. *Киверин А.Д., Смыгалина А.Е., Яковенко И.С.* // *Хим. физика.* 2020. Т. 39. № 8. С. 9.
68. *Киверин А.Д., Тюрнин А.В., Яковенко И.С.* // *Хим. физика.* 2021. Т. 40. № 12. С. 18.
69. *Wieland C., Scharf F., Schildberg H.P. et al.* // *J. Loss Prev. Process Ind.* 2021. V. 71. P. 104504.
70. *Tang X., Dzieminska E., Hayashi A.K. et al.* // *Intern. J. Hydrog. Energy.* 2021. V. 46. Issue 75. P. 37487.
71. *Gelfand B., Frolov S., Nettleton M.* // *Prog. Energy Combust. Sci.* 1991. V. 17. № 4. P. 327.

72. *Oran E. S., Gamezo V. N.* // *Combust. and Flame.* 2007. V. 148. № 1–2. P. 4.
73. *Ciccarelli G., Dorofeev S.* // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2008. V. 34. № 4. P. 499.
74. *Zhou C.W., Li Y., Burke U. et al.* // *Combust. and Flame.* 2018. V. 197. P. 423.
75. *Ranzi E., Frassoldati A., Grana R. et al.* // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2012. V. 38. P. 468.
76. *Fernandez-Galisteo D., Sanchez A.L., Linan A. et al.* // *Combust. Theor. Model.* 2009. V. 3. № 4. P. 74.
77. *Tao Y., Smith G.P., Wang H.* // *Combust. and Flame.* 2018. V. 195. P. 18.
78. *Tereza A.M., Medvedev S.P., Smirnov V.N.* // *Acta Astronaut.* 2019. V. 163. P. 18.
79. *Slavinskaya N., Mirzayeva A., Whitside R. et al.* // *Combust. and Flame.* 2019. V. 210. P. 25.
80. *Tereza A.M., Medvedev S.P., Smirnov V.N.* // *Acta Astronaut.* 2021. V. 181. P. 612.
81. *Тереза А.М., Слуцкий В.Г., Северин Е.С.* // *Хим. физика.* 2009. Т. 28. № 2. С. 45.
82. *Krivoshcheyev P., Penyazkov O., Sakalou A.* // *Combust. and Flame.* 2020. V. 216. P. 146.
83. *Coppens F.H.V., De Ruyck J., Konnov A.A.* // *Ibid.* 2007. V. 149. № 4. P. 409.
84. *Smith G.P., Golden D.M., Frenklach M. et al.*; <http://combustion.berkeley.edu/gri-mech/>
85. *Тереза А.М., Агафонов Г.Л., Бетев А.С. и др.* // *Хим. физика.* 2020. Т. 39. № 12. С. 29.