

УДК 536.46

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ УСКОРЕНИЯ ПЛАМЕНИ И ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ (ОБЗОР РАБОТ ИТМО НАН БЕЛАРУСИ)

П. Н. Кривошеев, В. В. Кузьмицкий, О. Г. Пенязьков

Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 220072 Минск, Беларусь,  
krivosheyev.pavlik@gmail.com

Работа посвящена краткому обзору и систематизации результатов исследований процессов ускорения пламени и перехода горения в детонацию в круглых гладких трубах, выполненных за последние несколько лет в Институте тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова (Минск, Беларусь). Показаны и описаны все стадии процесса ускорения пламени, начиная от инициирования горения слабым источником и заканчивая возникновением детонации.

Ключевые слова: ускорение пламени, переход горения в детонацию, высокоскоростная визуализация, структура и форма фронта пламени, самовоспламенение, взрыв, обзор.

DOI 10.15372/FGV2022.9271

### ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на более чем вековую историю изучения процессов ускорения пламени и перехода горения в детонацию (ПГД), многие аспекты и детали этих явлений изучены не в полной мере. И хотя существует большое количество теоретических работ, описывающих процессы ускорения пламени и формирования детонации, в которых в той или иной мере учитывается влияние различного рода физико-химических факторов (температуры, давления, плотности среды, вязкости и теплопроводности, шероховатости стенок канала, кинетики химических реакций и т. д.), единой теории процесса перехода горения в детонацию не существует. Это связано с ограниченностями самих моделей, с неточным знанием 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. Полноценное трехмерное моделирование процесса ПГД с необходимым разрешением по времени и пространству весьма затруднительно и вряд ли возможно, поскольку требует очень серьезных вычислительных мощностей. Общим же недостатком ранее выполненных экспериментальных работ являлось то, что из-за несовершенства имеющейся на тот момент регистрирующей аппара-

туры и высокой скорости самого процесса (от сотен до тысяч метров в секунду) удавалось получать искомые данные о той или иной стадии процесса в течение чрезвычайно короткого промежутка времени. Все это накладывало существенные ограничения на возможности анализа всего процесса ПГД в целом, поскольку информация поступала разрозненно, из разных серий экспериментов.

Цель выполненного цикла работ заключалась в получении детальной, с высоким пространственно-временным разрешением визуальной информации о всех стадиях процесса ускорения пламени и перехода медленного горения в детонацию. Полученные результаты существенно расширяют представления о природе последовательных стадий развития пламени, механизмах и сценариях возникновения детонации.

### 1. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Постановка эксперимента была достаточно простой (рис. 1). Детальное описание можно найти в работах [1, 2]. Использовались калиброванные прозрачные пластиковые трубы внутреннего диаметра  $D = 40, 60$  и  $90$  мм. Относительная длина трубы составляла 100 и более калибров в каждом эксперименте, и это позволяло избежать эффектов, связанных с отражением акустических волн сжатия от дальнего торца трубы и с их взаимодействием с фрон-

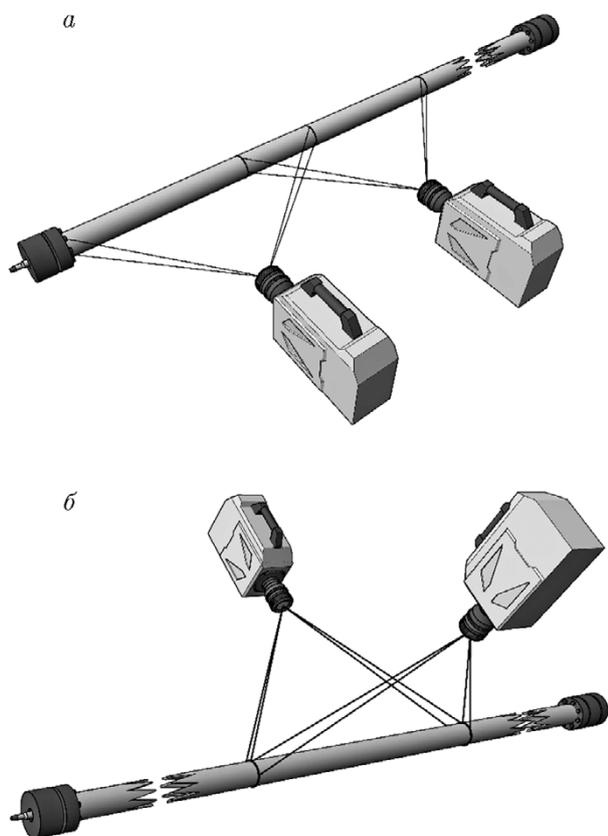


Рис. 1. Схема проведения эксперимента

том пламени в течение всего времени наблюдения. Один из торцов трубы был глухим, в нем устанавливалась система инициирования горения. Другой конец трубы закрывался тонкой лавсановой диафрагмой, способной выдержать незначительный перепад давления. Перед проведением эксперимента труба вакуумировалась и заполнялась рабочей смесью. Эксперименты проводились со стехиометрической смесью ацетилена и кислорода, разбавленной азотом либо аргоном.

Для высокоскоростной фотографии фронта пламени использовались две идентичные камеры Photron FASTCAM SA-Z type 2100 (Япония). Обе камеры были оснащены объективами Tamron SP 24-70 mm F/2.8 Di VC USD и узкополосными фильтрами Edmund Optics BP 430 nm  $\pm$  10 nm OD4 50 mm. 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 запи-

си, общее время записи, разрешение кадра, скорость съемки, время экспозиции каждого кадра и т. д.), равно как и настройки обоих объективов, и используемые светофильтры были абсолютно идентичными. Камеры были синхронизированы между собой и управлялись при помощи одного компьютера с программным обеспечением Photron FASTCAM Viewer. Камеры либо располагались вдоль оси трубы, одна за другой, с небольшим взаимным перекрытием областей наблюдения (рис. 1,а), либо монтировались в одном сечении трубы, перпендикулярно оси трубы, под углом 90° друг к другу (рис. 1,б).

По смещению области свечения от кадра к кадру определялась скорость распространения фронта пламени вдоль оси трубы. С учетом незначительного (порядка нескольких пикселей) смещения, особенно при малых скоростях распространения, значения скорости осреднялись по 5–20 кадрам. При определении скорости 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 осредненные (интерполированные) кривые.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### 2.1. Основные стадии развития пламени в гладком канале

Решающую роль в ускорении пламени в канале играет взаимодействие фронта реакции с потоком, который формируется благодаря выталкивающему действию расширяющихся продуктов сгорания. До момента формирования детонации принято выделять несколько основных характерных стадий ускорения пламени, в экспериментальных работах [1, 2] впервые приведены детальные, качественные фотографии фронта пламени на каждой из них. На первой стадии (рис. 2, I) фронт пламени экспоненциально ускоряется, затем идет стадия замедления и движения практически с неизменной скоростью (рис. 2, II), и наконец стадия повторного ускорения, в результате которого образуется детонационная волна (рис. 2, III). Остановимся подробнее на каждой из стадий, рассмотрим динамику поведения фронта пламени и соответствующие изменения в его структуре и форме.

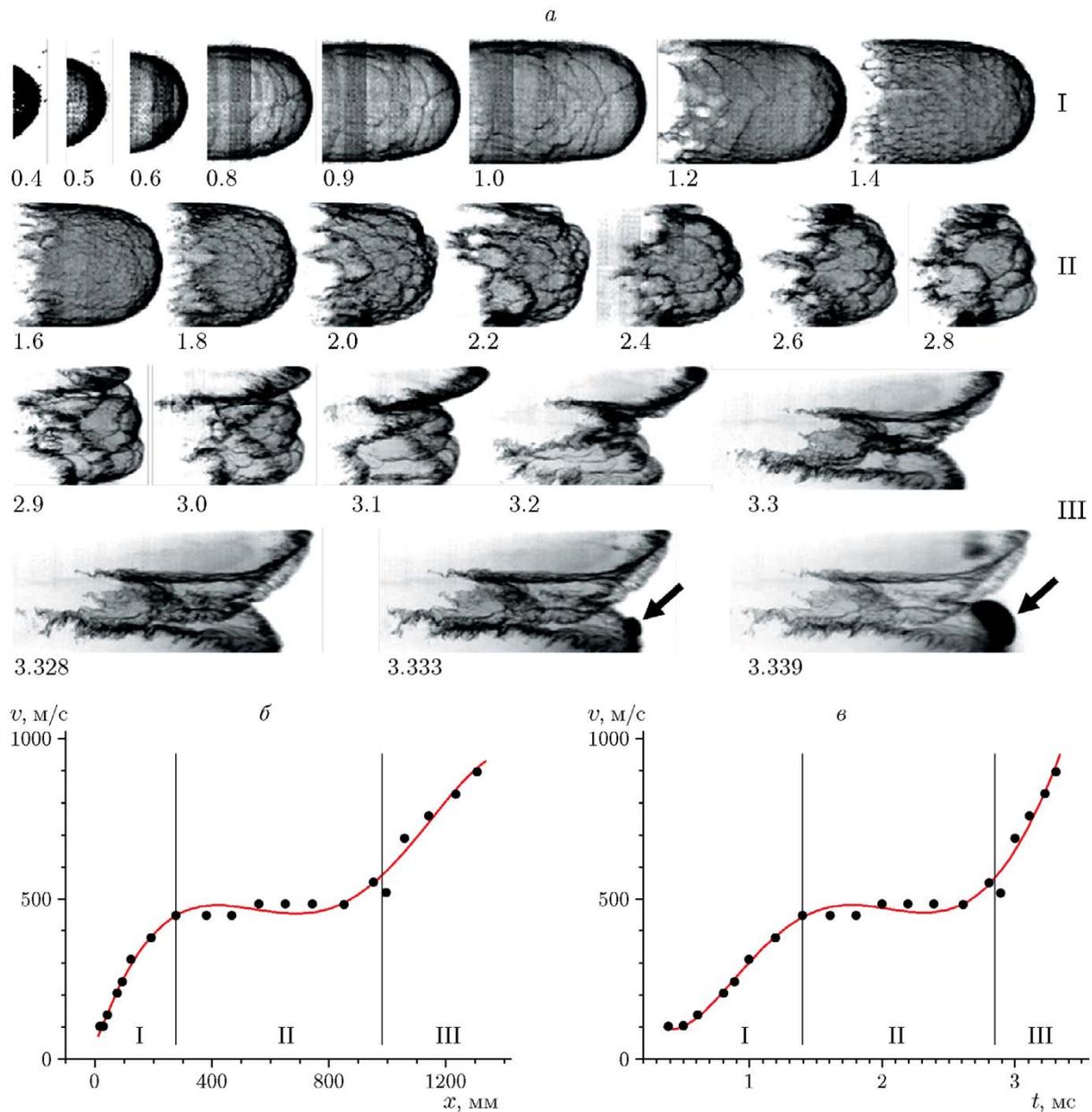


Рис. 2. Мгновенные фотографии (инвертированные изображения) пламени в смеси ацетилен/кислород/азот при  $p_0 = 24.8$  кПа (*a*) и профили скорости (интерполяция по результатам обработки и осреднения массива изображений) в зависимости от расстояния (*б*) и времени (*в*): *a* — поперечный размер каждого кадра (внутренний диаметр трубы) 90 мм, время около каждого кадра указано в миллисекундах, I — стадия экспоненциального ускорения пламени, II — стадия замедления и движения с постоянной скоростью, III — стадия повторного ускорения и возникновения детонации; стрелками на последних двух кадрах указана область локального взрыва, приводящего к формированию детонационной волны

### 2.2. Стадия начального ускорения

После инициирования горения у закрытого торца трубы пламя начинает равномерно и изотропно распространяться от источника воспламенения, его форма при этом близка к идеальной полусферической, контуры четкие

(рис. 3*a*). Это движение обусловлено расширением продуктов сгорания, видимая скорость пламени при этом  $U_{vis} = \theta U_{lam}$ , где  $\theta = \rho_u / \rho_b$  — отношение плотностей несгоревшего  $\rho_u$  и сгоревшего  $\rho_b$  газов,  $U_{lam}$  — нормальная (ламинарная) скорость горения (рис. 3*a*).

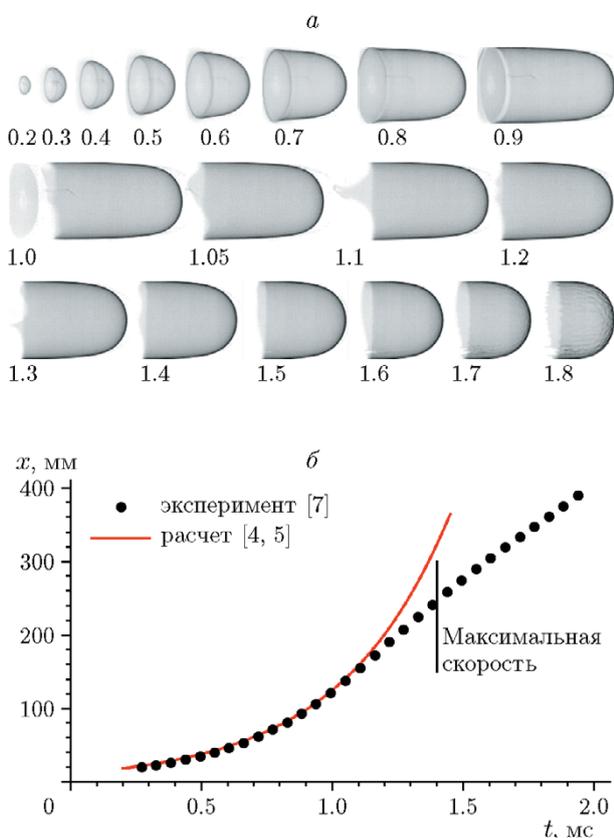


Рис. 3. Эволюция фронта пламени (инвертированные изображения скоростной съемки) на ранней стадии горения смеси ацетилен/кислород/аргон при  $p_0 = 12$  кПа в трубе диаметром 60 мм (а) и зависимость скорости лидирующей точки фронта от времени (б)

По мере приближения к стенкам канала фронт начинает вытягиваться вдоль оси в направлении движения, принимая пальцеобразную вытянутую форму. Существенное увеличение поверхности пламени, вызванное взаимодействием фронта с потоком несгоревшего газа перед ним, положительно влияет на динамику его распространения. В [2, 3] показано, что на этой стадии скорость лидирующей кромки фронта очень хорошо описывается экспоненциальной зависимостью, впервые представленной в работе [4] и впоследствии уточненной в [5]:

$$v = \theta U_{lam} \exp(2\alpha(\theta - 1)U_{lam}(t - t_0)/R), \quad (1)$$

где  $R$  — радиус канала,  $t_0$  — момент времени, соответствующий началу изменения формы фронта от полусферической к сильно вытянутой,  $\alpha$  — коэффициент порядка единицы (рис. 3, б). Для расчетов использовались значения  $\theta = 12.2$ ,  $U_{lam} = 4.9$ ,  $\alpha = 0.58$ .

### 2.3. Торможение пламени

На этой стадии фронт пламени замедляется [1, 2]. Вблизи торца трубы, в зоне зажигания, где продукты сгорания находятся максимально длительное время, возникает область разрежения, которая формирует поток газа в направлении, противоположном движению пламени. Скорость фронта вдоль трубы падает, дефицит скорости составляет до 1/3 от ее максимального значения на стадии первого ускорения. Однако с ростом начального давления эффект торможения становится не таким ярко выраженным и можно ожидать, что при дальнейшем росте начального давления  $p_0$  такой эффект исчезнет вовсе. Фронт пламени приобретает более плоскую форму, особенно это заметно при низком начальном давлении смеси (см. рис. 2, стадия II). Поверхность фронта начинает дробиться, и на ней формируется ячеистая структура. Перед фронтом пламени наблюдается поток несгоревшего газа в направлении движения фронта, вызванный выталкивающим действием расширяющихся продуктов сгорания. За фронтом поток, созданный волнами разрежения в продуктах сгорания, направлен в противоположную сторону. Фронт, как поверхность разрыва, подвержен газодинамическим неустойчивостям типа Дарье — Ландау и Рэлея — Тейлора, что также существенно влияет на форму его поверхности и ведет к появлению ячеистых структур. Размеры формирующейся структуры существенно зависят от начального давления смеси и резко уменьшаются с его увеличением. За фазой замедления следует некоторый период времени, когда фронт пламени распространяется почти с постоянной скоростью. Структура и форма фронта пламени за этот период практически не претерпевают существенных изменений. Форма фронта близка к полусферической и вытянута приблизительно на диаметр канала вдоль оси трубы (см. рис. 2, стадия II). Поверхность имеет ярко выраженную ячеистую структуру. Причем по мере движения пламени размер ячеек укрупняется, а их количество сокращается. При этом они начинают вытягиваться в продольном направлении вдоль оси трубы. Этот эффект наиболее ярко выражен при низких начальных давлениях.

Методами численного анализа обнаружено [6], что на ранних стадиях развития имеет место подобие нестационарного процесса горения в каналах различной ширины. Для проверки

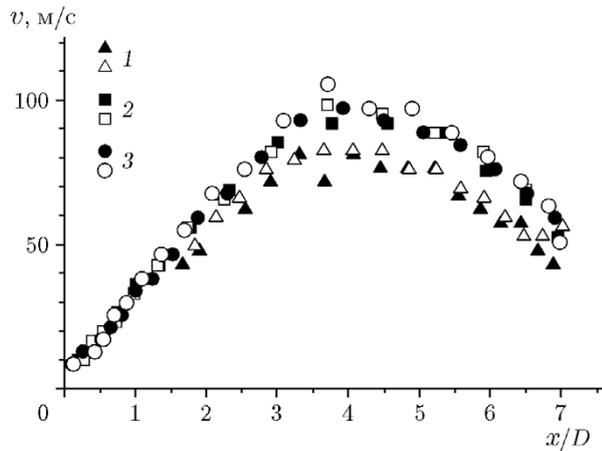


Рис. 4. Скорость фронта пламени в смеси ацетилена с воздухом при нормальном атмосферном давлении в трубах диаметром 40 мм (1), 60 мм (2), 90 мм (3)

этой гипотезы была выполнена серия экспериментов в трубах различного диаметра ( $D = 40, 60$  и  $90$  мм), в качестве горючего использовалась стехиометрическая смесь ацетилена с воздухом при атмосферном начальном давлении. Эксперименты [7] продемонстрировали и под-

твердили (рис. 4), что на ранней стадии горения, включая торможение фронта пламени, при переходе к безразмерным величинам наблюдается явное подобие поведения фронта пламени в каналах различного размера, причем указанное подобие носит как качественный, так и количественный характер. Была предложена оригинальная методика определения нормальной скорости горения смесей, основанная на знании динамики поведения фронта пламени на этой начальной стадии [7].

#### 2.4. Повторное ускорение и формирование детонации

На заключительной стадии наблюдается повторное ускорение фронта пламени. При этом его форма и структура претерпевают существенные изменения [8, 9].

Остановимся подробнее на изменении структуры фронта волны при повторном ускорении, как одной из наиболее интересных фаз распространения пламени, определяющих переход горения в детонацию. На рис. 5 показана непрерывная последовательность фотографий фронта пламени в смеси ацетилен/кис-

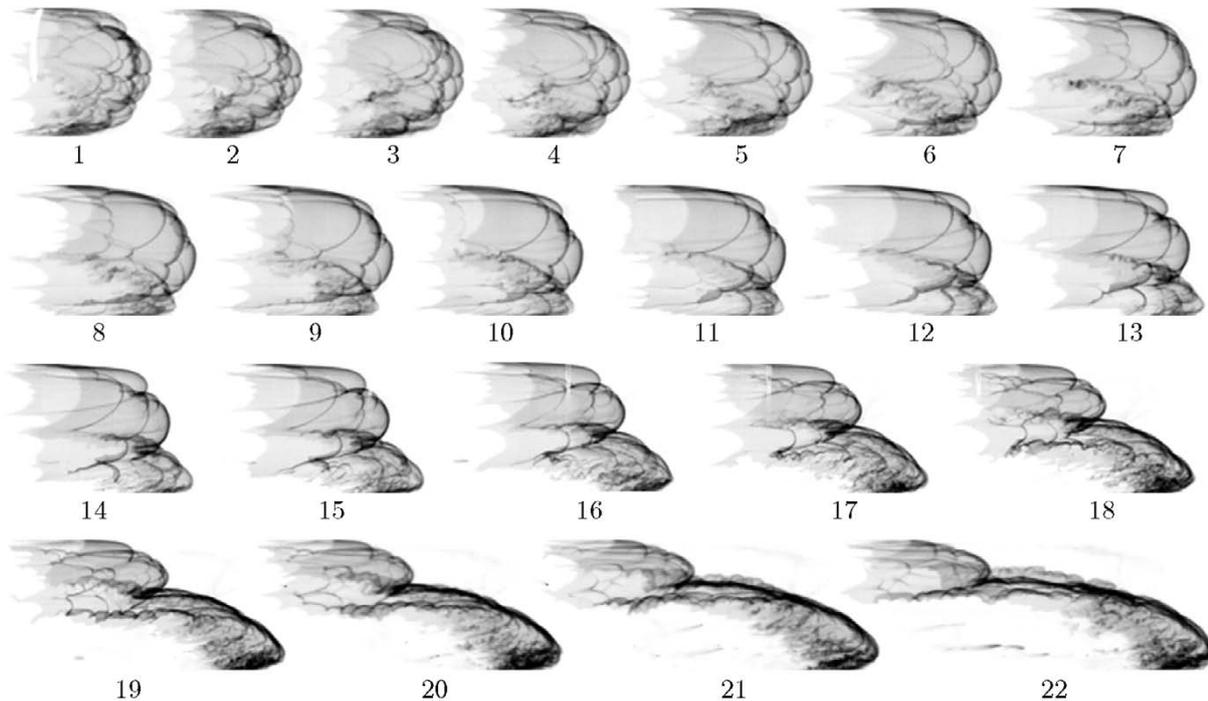


Рис. 5. Детализированная раскадровка (инвертированные изображения скоростной съемки) процесса ускорения пламени и изменения его формы в смеси ацетилен/кислород/аргон при  $p_0 = 12$  кПа:

время между кадрами 77.8 мкс, поперечный размер каждого кадра (внутренний диаметр трубы) 60 мм

лород/аргон при начальном давлении  $p_0 = 12$  кПа. Кадры соответствуют движению с постоянной скоростью и последующим ускорением (см. рис. 2, стадия II и начало стадии III). Как видно из рис. 5, в момент времени, предшествующий ускорению, нижний участок изображения фронта начинает «размываться», его контуры становятся нечеткими (кадры 1–5 на рис. 5). При этом на верхнем участке изображений контуры пламени по-прежнему продолжают оставаться гладкими и ровными. Естественно предположить, что размытие изображения отдельных участков фронта пламени связано с существенным изменением локальных параметров течения в этой зоне. Пламя в области пограничного слоя подвержено газодинамическим возмущениям, развивающимся на масштабах пограничного слоя, оно приобретает более сложную пространственную структуру, и горение в таком фронте с развитой поверхностью происходит быстрее ввиду большей удельной площади фронта. Поскольку изображение пламени является двумерным (осредненным по третьей координате в направлении наблюдения), то на зону возмущенного фронта в пристеночной области налагается свечение от гладких, невозмущенных участков, т. е. она находится в их «тени». В целом фронт пламени имеет приблизительно полусферическую форму. Его центральная часть, выступающая вперед в направлении движения, находится в ядре потока и представляет собой зону почти ламинарного горения с гладкими контурами. Размытые участки фронта находятся в отстающей пристеночной области, в области пограничного слоя, и для данного эксперимента они расположены в нижней части канала с некоторым смещением к дальней либо ближней стенке относительно направления наблюдения или оси фотокамеры. Возмущение фронта в области пограничного слоя приводит к увеличению площади горения в некоторой локальной области вблизи стенок трубы. С увеличением площади фронта скорость горения в этой области начинает возрастать и этот участок фронта выдвигается вперед относительно отстающей зоны горения (см. рис. 5, нижняя часть изображений на кадрах 8–13 и далее). Это закономерно приводит к значительному увеличению протяженности и площади всей зоны горения вдоль оси трубы, что необратимым образом вызывает увеличение энерговыделения, скорости газового потока и волны горения. При

этом опережающий участок фронта как бы вытесняет и тормозит его основную, отстающую часть.

Возникнув локально в некоей области пограничного слоя, зона «возмущенного» (возможно, турбулентного) горения начинает словно растекаться по периметру трубы (кольцевому пограничному слою), одновременно двигаясь вниз по потоку. В дальнейшем, смыкаясь на периметре и отеснив при этом отстающий участок фронта пламени в ядро потока, формируется коническая, сильно вытянутая вдоль оси трубы форма пламени, по виду напоминающая бумажный кулек или вафельный стаканчик [8]. При этом наиболее интенсивно химическая реакция протекает в кольцевом пограничном слое вдоль стенок трубы, а в ядре потока, ближе к оси трубы происходит более медленное догорание смеси, сопровождаемое формированием вытянутого на несколько диаметров вдоль оси трубы кометообразного «хвоста».

Регистрация процесса двумя камерами, установленными в плоскости, перпендикулярной оси трубы под углом  $90^\circ$  друг к другу, позволила установить следующее [8]. На заключительной стадии ускорения, непосредственно перед возникновением детонации, пламя принимает коническую, сильно вытянутую вдоль оси трубы форму. За счет торможения потока несгоревшего газа около стенок трубы и, как следствие, повышения его температуры и плотности более интенсивное сгорание происходит в пограничном слое вдоль стенок трубы. Форма пламени в пристеночной области близка к овальной, напоминает срез круглой трубы под некоторым углом или основание бумажного кулька/рожка. В центральной части фронт пламени за счет потока, вызванного волнами разрежения (в направлении, противоположном направлению распространения пламени), образует почти правильный конус, завершающийся длинным кометообразным хвостом.

На финальной стадии ускорения фронта пламени в зависимости от степени разбавления смеси инертным газом и начального давления регистрировались два сценария возникновения детонации. В одном случае возникновение локального взрыва происходит прямо на передней кромке фронта ускоряющегося пламени (рис. 6, *a*). В другом случае на некотором расстоянии (обычно до одного калибра трубы) перед фронтом пламени сложной формы, в одной, реже в нескольких точках начинает фор-

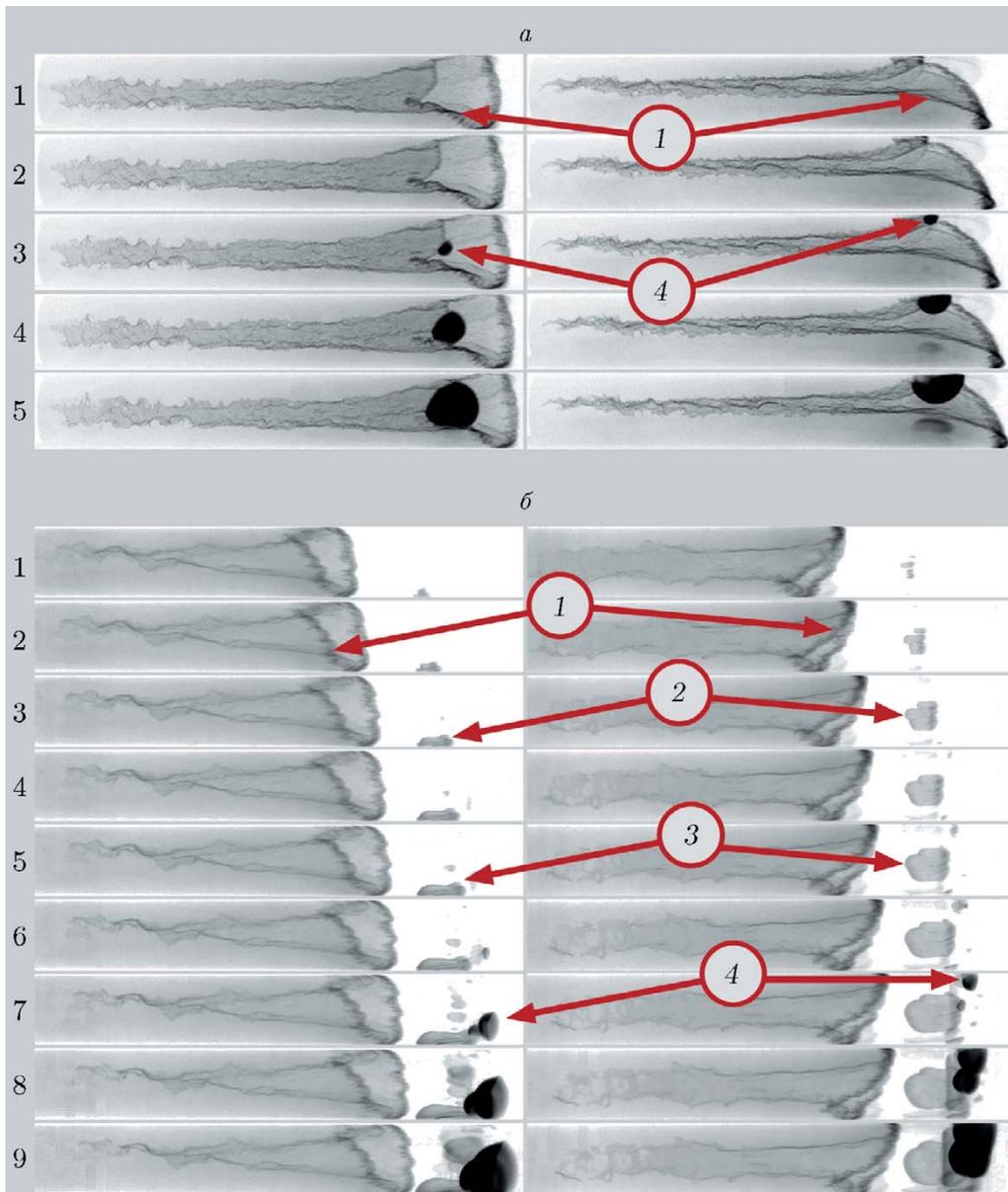


Рис. 6. Стереоскопическая визуализация (инвертированные изображения) процесса формирования детонации согласно двум режимам: в результате локального взрыва на кромке фронта ускоряющегося пламени (а) и в результате локального самовоспламенения с дальнейшим формированием детонационной волны на расстоянии перед фронтом пламени (б):

стехиометрическая смесь ацетилен с кислородом, разбавленная на 55 % азотом, начальное давление около 20 кПа; съемка двумя камерами, расположенными под углом  $90^\circ$  друг к другу, слева — изображения с камеры 1, справа — с камеры 2; скорость съемки  $2 \cdot 10^5$  кадр/с; распространение пламени слева направо; 1 — фронт пламени, 2 — очаг самовоспламенения, 3 — вторичный фронт реакции, 4 — локальный взрыв, приводящий к формированию детонационной волны

мироваться один или несколько очагов горения. Такой комплекс (фронт пламени и один или несколько расширяющихся очагов горения) продолжает распространяться вдоль оси трубы еще некоторое время, после чего в одной или нескольких точках возникают очаги взры-

ва, которые, сливаясь, формируют единую детонационную волну (рис. 6,б).

По изображениям, получаемым одновременно с двух камер, была выполнена трехмерная реконструкция процесса и восстановлено пространственное положение очагов вторично-

го самовоспламенения и очагов взрыва. Показано [8], что как очаги самовоспламенения, так и очаги взрыва, приводящие к формированию детонационной волны, расположены в кольцевом пограничном слое вдоль стенок трубы.

Анализ динамики развития горения из очагов вторичного самовоспламенения в области между головной ударной волной и фронтом основного пламени позволил определить следующее. Воспламенение всегда происходит локально в пограничном слое вблизи поверхности трубы [8]. После самовоспламенения в очаге фронт вторичного пламени начинает распространяться, растекаясь вдоль стенки трубы в кольцевом пограничном слое заторможенного газа с повышенными значениями температуры и давления и пониженной скоростью относительно ядра основного потока газа. При этом скорость расширения вторичного пламени вдоль периметра трубы в направлении, перпендикулярном основному потоку, примерно совпадает со скоростью горения в продольном направлении. В радиальном направлении к оси трубы пламя практически не распространяется, и это может быть вызвано двумя факторами: 1) из-за торможения потока газа на стенках трубы и наличия пограничного слоя скорость потока газа ближе к оси трубы возрастает, снося фронт пламени вниз по потоку и прижимая его к стенке трубы; 2) из-за торможения потока газа значение температуры смеси резко падает по мере удаления от стенок, что снижает скорость горения в радиальном направлении. Определены скорость развития горения из очагов самовоспламенения и скорость потока газа вдоль стенок трубы перед основным фронтом пламени. Рассчитана скорость такого потока газа за падающей ударной волной в одномерном приближении, и показано, что наблюдаемое снижение скорости у стенок трубы (почти на 400 м/с) должно приводить к локальному повышению температуры газа практически на 300°. Такое существенное повышение температуры неизбежно вызовет резкое снижение времени задержки воспламенения.

Комбинация высокоскоростной визуализации процесса ПГД с измерениями положения головной ударной волны (по анализу осциллограмм давления) и положения фронта пламени (по анализу сигналов датчиков тока ионизации) позволила выявить следующее [9]. В смеси, разбавленной азотом, возникновение очагов самовоспламенения перед основным фрон-

том не всегда приводило к локальному взрыву и формированию детонационной волны. В некоторых случаях из них развивалась вторичная волна горения, распространяющаяся вместе с первичной до момента перехода в детонацию в результате появления новых очагов самовоспламенения. В некоторых экспериментах возникновение вторичного воспламенения без ПГД наблюдалось на длине более 1 м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен краткий обзор работ, выполненных в 2017–2022 гг. коллективом лаборатории физико-химической гидродинамики Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова (Минск, Беларусь), по экспериментальному изучению процессов ускорения пламени и перехода горения в детонацию в круглых гладких трубах. По результатам выполненного комплекса работ можно сформулировать следующие выводы.

Показаны и описаны все стадии процесса развития пламени и формирования детонационной волны в гладком канале круглого сечения. Получены качественные мгновенные фотографии эволюции во времени фронта пламени, соответствующие каждой стадии [1, 2].

Установлено, что на начальной стадии ускоренного распространения скорость фронта экспоненциально растет [2, 3]. Показано, что существует явное подобие поведения фронта пламени в трубах различного внутреннего диаметра, на основании этого предложена оригинальная методика определения нормальной скорости горения топливно-окислительных газовых смесей [7].

Обнаружено, что на заключительной стадии ускоренного распространения, непосредственно перед возникновением детонации, пламя принимает коническую, сильно вытянутую вдоль оси трубы форму [8]. Показаны два характерных режима возникновения детонации. В первом режиме впереди основного фронта пламени за головной ударной волной возникает один или несколько очагов самовоспламенения. По мере развития фронта реакции из этих очагов происходит локальный взрыв газа в одной или нескольких точках. Во втором режиме взрыв газа происходит на передней кромке основного фронта пламени без самовоспламенения смеси впереди него [8].

Как очаги самовоспламенения, так и очаги взрыва регистрировались в кольцевом погра-

ничном слое вдоль стенки трубы. Расширение области горения из очагов самовоспламенения также в основном происходило в пограничном слое и практически отсутствовало в радиальном направлении. Определены скорость развития горения из очагов самовоспламенения и скорость потока газа вдоль стенок трубы перед основным фронтом пламени. Рассчитана скорость такого потока газа за падающей ударной волной в одномерном приближении, и показано, что наблюдаемое снижение скорости у стенок трубы должно приводить к существенному локальному повышению температуры газа. Такое повышение температуры неизбежно вызовет резкое снижение времени задержки воспламенения [8].

Показано пространственное распределение очагов самовоспламенения между головной ударной волной и фронтом пламени [9].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Кривошеев П. Н., Новицкий А. О., Пенязьков О. Г.** Эволюция структуры и формы фронта реакции при ускорении пламени и переходе горения в детонацию // *Хим. физика*. — 2022. — Т. 41, № 8. — С. 38–47. — DOI: 10.31857/S0207401X22080076.
2. **Krivosheyev P., Novitski A., Penyazkov O.** Flame front dynamics, shape and structure on acceleration and deflagration-to-detonation transition // *Acta Astronaut.* — 2023. — V. 204. — P. 692–704. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.10.016.
3. **Кривошеев П. Н., Пенязьков О. Г.** О начальной стадии горения смесей ацетилен-кислород в трубе // *Хим. физика*. — 2023. — Т. 42, № 3. — С. 1–6. — DOI: 10.31857/S0287401X23030093.
4. **Clanet C., Searby G.** On the «tulip flame» phenomenon // *Combust. Flame*. — 1996. — V. 105, N 1-2. — P. 225–238. — DOI: 10.1016/0010-2180(95)00195-6.
5. **Liberman M. A., Ivanov M. F., Kiverin A. D., Kuznetsov M. S., Chukalovsky A. A., Rakhimova T. V.** Deflagration-to-detonation transition in highly reactive combustible mixtures // *Acta Astronaut.* — 2010. — V. 67, N 7-8. — P. 688–701. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2010.05.024.
6. **Киверин А. Д., Тюрнин А. В., Яковенко И. С.** Автомодельность процесса распространения пламени в канале // *Хим. физика*. — 2021. — Т. 40, № 12. — С. 18–22. — DOI: 10.31857/S0207401X21120098.
7. **Yakovenko I., Kiverin A., Krivosheyev P., Kuzmitski V., Navitski A., Penyazkov O., Tyurnin A., Yarkov A.** Burning rate estimation based on flame evolution in a channel // *Acta Astronaut.* — 2023. — V. 204. — P. 768–775. — DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.10.036.
8. **Krivosheyev P., Penyazkov O., Sakalou A.** Analysis of the final stage of flame acceleration and the onset of detonation in a cylindrical tube using high-speed stereoscopic imaging // *Combust. Flame*. — 2020. — V. 216. — P. 146–160. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2020.02.027.
9. **Baranyshyn Y. A., Krivosheyev P. N., Penyazkov O. G., Sevrouk K. L.** Flame front dynamics studies at deflagration-to-detonation transition in a cylindrical tube at low-energy initiation mode // *Shock Waves*. — 2020. — V. 30. — P. 305–313. — DOI: 10.1007/s00193-020-00937-0.

*Поступила в редакцию 28.11.2022.*

*Принята к публикации 14.12.2022.*