

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ЗОНОЙ ФОРКАМЕРНО-ФАКЕЛЬНОГО ЗАЖИГАНИЯ

© 2006 г. С. М. Фролов, В. С. Аксенов, В. Я. Басевич

Представлено академиком Ал. Ал. Берлиным 30.03.2006 г.

Поступило 31.03.2006 г.

Впервые экспериментально зарегистрировано инициирование детонации в стехиометрической пропано-воздушной смеси при управляемом взаимодействии ударной волны (УВ) с облаком горячего взрывчатого газа, образованным при струйном истечении продуктов горения из форкамеры. Показано, что для инициирования детонации необходима тщательная синхронизация момента прихода УВ в облако с моментом воспламенения в облаке.

Известны два классических способа инициирования газовой детонации: прямое инициирование с помощью сильных источников [1] и переход горения в детонацию [2, 3]. При прямом инициировании образуется сильная первичная УВ, в которой температура, давление и длительность фазы сжатия достаточны для возбуждения быстрых экзотермических реакций в непосредственной близости от ударного фронта. В этом случае детонация формируется после некоторого (относительно короткого) переходного периода. При переходе горения в детонацию наличие первичной УВ необязательно. Вследствие неустойчивости и гидродинамических неоднородностей пламя, возникшее от слабого источника зажигания, в процессе распространения изменяет свою форму, вызывая прогрессирующее тепловое расширение газа и образование УВ в свежей смеси. После некоторого (относительно длительного) переходного периода в области между УВ и ускоряющимся пламенем происходит самовоспламенение газа, ведущее к детонации.

В [4, 5] экспериментально доказана возможность инициирования детонации другим способом, отличным от классических, а именно путем ускорения слабой первичной УВ бегущим импульсом принудительного зажигания. В этом случае быстрые экзотермические реакции за ударным фронтом возбуждаются не самой УВ, а с помощью внешнего источника зажигания. Внешний источ-

ник, “передвигаясь” вместе с УВ, стимулирует химические превращения во взрывчатой смеси, способствуя быстрому переходу УВ в детонацию. В [4, 5] для получения детонации в стехиометрической пропано-воздушной смеси при нормальных начальных условиях в прямой гладкой трубе диаметром 51 мм понадобилось последовательное зажигание смеси семью электрическими разрядниками, равномерно распределенными вдоль трубы на участке длиной в 12–14 диаметров трубы. Необходимым условием инициирования детонации была тщательная синхронизация момента запуска каждого разрядника с моментом прихода первичной УВ в соответствующее сечение трубы.

В данной работе продолжены исследования, начатые в [4, 5]. В отличие от [4, 5], здесь для принудительного зажигания газа во фронте УВ использована не серия электрических разрядов, а классическая форкамера [6]. Основная идея форкамерно-факельного зажигания состоит в том, что запальная свеча устанавливается не непосредственно в камере сгорания, а в небольшой форкамере, отделенной от основной камеры одним или несколькими соплами. Горение в форкамере приводит к возрастанию в ней давления и выбросу высокоскоростной струи горячих продуктов горения в основную камеру. Эта струя, перемещиваясь со свежей смесью в основной камере, воспламеняет газ сразу в значительном объеме.

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Основные элементы установки – генератор первичной УВ, прямая детонационная труба диаметром 60 мм и длиной 3.5 м и форкамера. Генератор первичной УВ (электроразрядная камера или пороховой газогенератор) устанавливали на одном конце детонационной трубы. Другой конец трубы был закрыт. На некотором расстоянии от генератора к боковой стенке трубы через резьбовое отверстие присоединяли форкамеру.

Форкамера представляла собой стальную цилиндрическую камеру диаметром 31 мм и длиной 50 мм. На одном торце форкамеры устанавливали запальную свечу, а на другом – сменное кони-

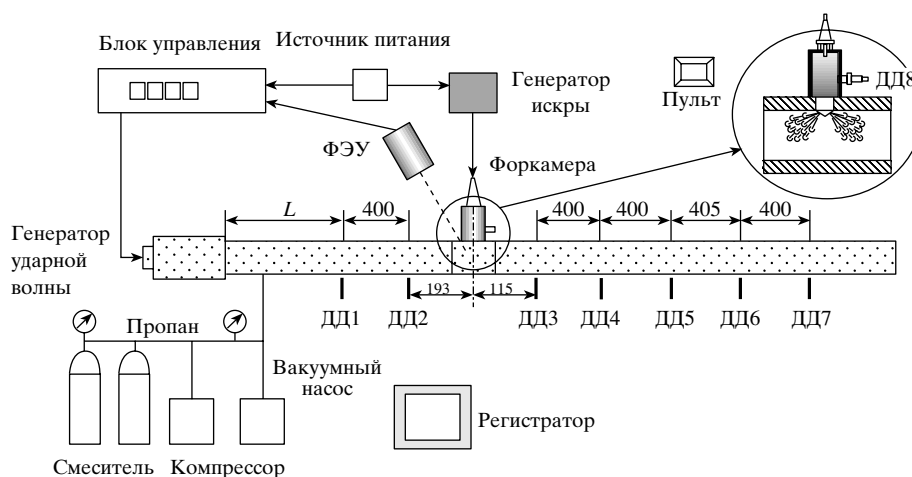


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

ческое сопло с углом раствора 120° (см. вставку на рис. 1) и двумя круглыми отверстиями диаметром 5 мм, соединяющими форкамеру с объемом трубы. Толщина стенки сопла 1 мм. Оси сопловых отверстий и трубы находились в одной плоскости.

Система измерений включала 8 высокочастотных пьезоэлектрических датчиков давления ДД1–ДД8 т ипа ЛХ600 и фотоумножитель ФЭУЗ-9. Датчики давления устанавливали вдоль трубы и в боковой стенке форкамеры. Они использовали для регистрации времени прихода УВ в соответствующее сечение детонационной трубы и для анализа динамики волновых процессов в форкамере и в УВ, прошедшей через облако форкамерных газов (далее – форкамерное облако). В боковой стенке трубы в том же сечении, где располагалась форкамера, имелось окно для регистрации свечения с помощью ФЭУ. Ось конуса поля зрения ФЭУ была перпендикулярна осям форкамеры и детонационной трубы. Сигналы от датчиков давления и фотоумножителя поступали в персональный компьютер через аналого-цифровой преобразователь (АЦП L-Card L7–83).

Перед каждым опытом трубу и форкамеру вакуумировали, а затем заполняли стехиометрической пропано-воздушной смесью при нормальных начальных условиях (температура 293 ± 2 К, давление 0.1 МПа). В предварительных опытах провели испытания генераторов первичной УВ и форкамеры, а также отладили методику измерений. При испытании генераторов изучали распространение первичной УВ вдоль трубы без зажигания газа в форкамере. Среднюю скорость УВ на измерительных базах рассчитывали, зная расстояние между датчиками давления и интервал времени между регистрацией ударных фронтов. Погрешность определения средней скорости УВ не более 2.5%. Испытания форкамеры проводили без УВ, изменяя параметры сменных сопел таким

образом, чтобы обеспечить режим ее работы с заметной задержкой между выбросом продуктов горения из форкамеры и воспламенением смеси в трубе. При использовании форкамеры с двумя круглыми сопловыми отверстиями диаметром 5 мм задержка между зажиганием смеси в форкамере и воспламенением форкамерного облака в трубе составляла 3–5–4–0 мс. Первые пороговые признаки повышения давления в трубе в результате форкамерного зажигания появлялись через ~5 мс после регистрации вспышки смеси с помощью ФЭУ. Сама вспышка регистрировалась ФЭУ как экспоненциальное увеличение интенсивности свечения на три порядка в течение ~3 м с. За момент вспышки принимали момент достижения сигналом ФЭУ уровня 0.13 В. После воспламенения газа в форкамерном облаке смесь в трубе сгорала приблизительно за 200–250 мс.

В опытах по изучению взаимодействия УВ с форкамерным облаком все средства регистрации активировались электронным блоком управления в момент зажигания смеси в форкамере. Далее через заданный интервал времени срабатывал генератор первичной УВ, который генерировал УВ в детонационной трубе. Ударная волна распространялась вдоль трубы и приходила в сечение форкамеры либо до, либо после вспышки в форкамерном облаке. Во всех случаях до прихода УВ локальное избыточное давление в форкамерном облаке не превышало 1 кПа. Для количественного описания процесса взаимодействия УВ с облаком использовали время задержки прихода УВ в сечение форкамеры относительно момента вспышки, зарегистрированного ФЭУ (далее “время задержки прихода УВ” τ). Время запуска генератора первичной УВ устанавливали, исходя из результатов предварительных опытов, описанных выше.

Провели две серии экспериментов, различающихся типом использованного генератора первичной УВ – электроразрядного генератора (серия 1) и порохового газогенератора (серия 2). В каждой из двух серий опытов варьировали расстояние L от генератора УВ до форкамеры и интенсивность первичной УВ (серии 1 а, 1б, 2а и 2 б).

Электроразрядный генератор создавал УВ с очень короткой фазой сжатия, поскольку характерное время выделения энергии в электрическом разряде составляло 2 0–4-0 мкс. На рис. 2 представлены зависимости средней скорости первичной УВ V от пройденного расстояния X вдоль трубы в сериях 1а (сплошные линии) и 1 б (штриховые линии). В серии 1а расстояние L от электрического разрядника до форкамеры составляло 0.4 м, а энергия разряда – 1.6 кДж. В серии 1б – $L = 1.434$ м, а энергия разряда – 2.5 кДж. Сечение $X = 0$ соответствует положению оси форкамеры. Пунктирная горизонтальная линия соответствует расчетной скорости детонации Чепмена-Жуге в стехиометрической пропано-воздушной смеси (1804 м/с). Кривые 1 и б построены по результатам предварительных опытов без зажигания газа в форкамере. Видно, что в Серии 1а средняя скорость распространения первичной УВ монотонно снижается приблизительно от 1 100 м/с при $X = 0$ до 620 м/с при $X = 2.35$ м, а в Серии 1б – от 810 м/с при $X = 0$ до 680 м/с при $X = 2.1$ м.

В обеих сериях 1а и 1б при “отрицательных” задержках прихода УВ в сечение форкамеры (приход до вспышки, $\tau < 0$) кривые затухания УВ практически совпадали с соответствующими кривыми 1 и б.

В серии 1 а при задержке прихода УВ $\tau = 10.3$ мс (кривая 5), а в серии 1б при $\tau \geq 2.3$ мс (кривые 10–15), наблюдали увеличение средней скорости УВ при прохождении через форкамерное облако с последующим ее уменьшением после выхода из облака. Более того, при задержках прихода $\tau \approx 10$ –11 мс (кривые 5, 14 и 15) средняя скорость УВ возрастала до 1500–1800 м/с, т.е. до уровня скорости детонации в стехиометрической пропано-воздушной смеси. Отметим, что такое увеличение скорости вызвано, главным образом, столкновением УВ с границей раздела холодного и горячего газов и ее распространением по горячему газу [3].

В отличие от опытов серии 1а, в которых после выхода УВ из форкамерного облака наблюдалось монотонное уменьшение ее средней скорости вдоль трубы до 700–870 м/с при $X = 2.3$ м, в опытах серии 1б наблюдалось возрастание средней скорости УВ до 8 10–960 м/с при $X = 2.1$ м. Максимальное увеличение средней скорости УВ (приблизительно на $\Delta V = 100$ м/с) наблюдалось при задержках $\tau \approx 3$ –7 мс (кривые 11–13). По сравнению с базовой кривой 6 увеличение средней скорости УВ на расстоянии $X = 2.1$ м в серии 1б

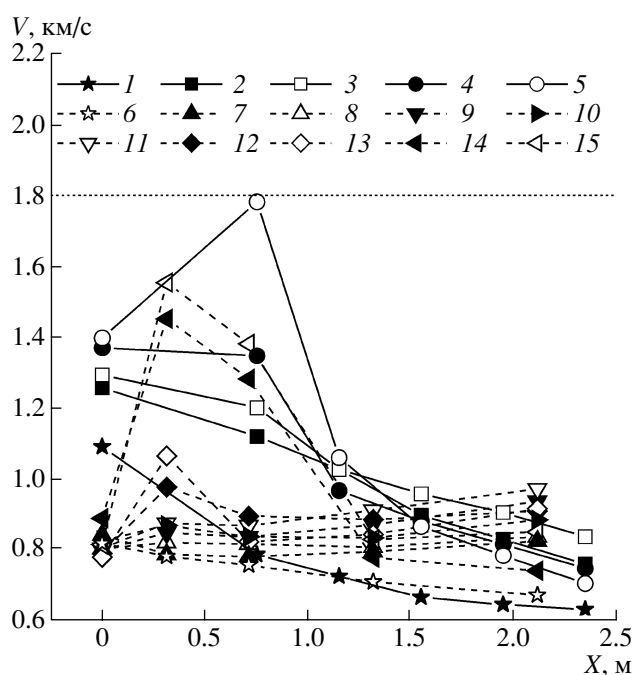


Рис. 2. Измеренные зависимости средней скорости первичной УВ от пройденного расстояния вдоль трубы при разных задержках прихода УВ в форкамерное облако в серии 1. Серия 1а (сплошные линии): 1 – без форкамеры, 2 – 2.4, 3 – 4.4, 4 – 6.4, 5 – 10.3 мс; серия 1б (штриховые линии): 6 – без форкамеры, 7 – $\tau = 1.4$, 8 – 1.4, 9 – 1.4, 10 – 2.3, 11 – 3.4, 12 – 5.3, 13 – 7.4, 14 – 11.2, 15 – 11.5 мс. Сечение $X = 0$ соответствует положению оси форкамеры. Пунктирная горизонтальная линия соответствует скорости детонации Чепмена-Жуге в стехиометрической пропано-воздушной смеси.

достигало значений $\Delta V = 200$ –300 м/с. Наблюдаемые эффекты ускорения УВ после взаимодействия с форкамерным облаком свидетельствуют о наличии зоны энерговыделения в непосредственной близости к ударному фронту. Действительно, датчики давления ДДЗ–ДД7, расположенные за форкамерой, регистрировали ярко выраженные вторичные взрывные волны, догоняющие первичную УВ.

В опытах серии 2 для создания первичной УВ использовали пороховой газогенератор – цилиндрическую камеру сгорания, оборудованную сменным расходным соплом и мембранным узлом. В газогенераторе размещали заряд пористого пироксилинового пороха массой 1.50–2.25 г. Для зажигания заряда использовали пиротехнический воспламенитель. Полное время горения пороха составляло 1–2 мс. Применение порохового газогенератора позволило увеличить длительность энерговыделения по сравнению с электроразрядом и получить УВ со значительно более продолжительной фазой сжатия. Продолжительность фазы сжатия в УВ определялась диаметром сопла. Толщина и материал мембраны определяли начальную ско-

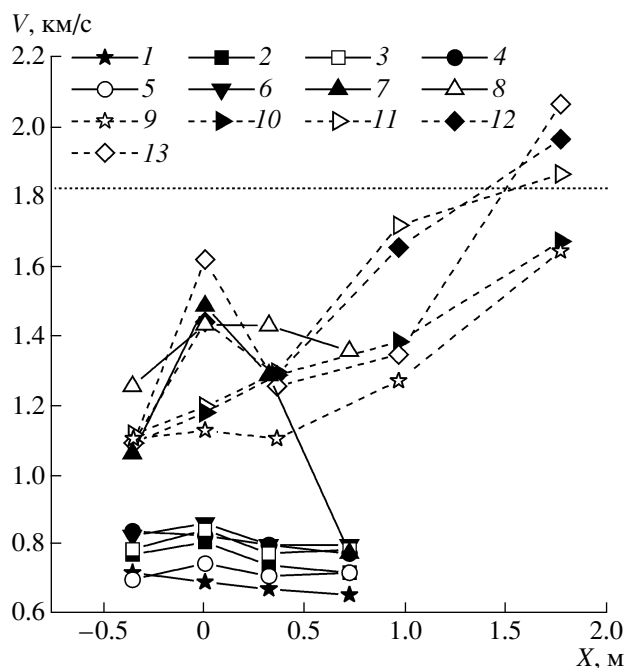


Рис. 3. Измеренные зависимости средней скорости первичной УВ от пройденного расстояния вдоль трубы при разных задержках прихода УВ в форкамерное облако в серии 2. Серия 2а (сплошные линии): 1 – без форкамеры, 2 – $\tau = -0.6$, 3 – -0.6 , 4 – -0.4 , 5 – 0.0 , 6 – 2.3 , 7 – 12.2 , 8 – 31.0 мс; Серия 2б (штриховые линии): 9 – без форкамеры, 10 – $\tau = -2.0$, 11 – 2.6 , 12 – 4.6 , 13 – 5.6 мс. Сечение $X = 0$ соответствует положению оси форкамеры. Пунктирная горизонтальная линия соответствует скорости детонации Чепмена-Жуге в стехиометрической пропано-воздушной смеси.

рость УВ. Начальную скорость УВ также варьировали, изменяя расстояние от порохового газогенератора до форкамеры: $L = 1.563$ м в серии 2а и $L = 1.293$ м в серии 2б (см. рис. 1). Опыты Серий 2а и 2 б в основном проводили с УВ, имеющими начальную скорость $V = 700\text{--}850$ м/с и $1\ 080\text{--}1120$ м/с соответственно. В рамках серии 2а провели также опыты с повышенной начальной скоростью УВ: $1000 \leq V \leq 1250$ м/с.

На рис. 3 представлены зависимости средней скорости первичной УВ от пройденного расстояния вдоль трубы в сериях 2а (сплошные линии) и 2б (штриховые линии). Как и на рис. 2, сечение $X = 0$ на рис. 3 соответствует положению оси форкамеры, а пунктирная горизонтальная линия соответствует скорости детонации Чепмена-Жуге в стехиометрической пропано-воздушной смеси. Кривые 1 и 9 построены по результатам предварительных опытов без зажигания газа в форкамере. Видно, что в опытах серии 2а средняя скорость первичной УВ (кривая 1) монотонно снижается приблизительно от 710 м/с при $X = -0.35$ м до 650 м/с при $X = 0.7$ м. В отличие от кривой 1б аздовая кривая 9 для серии 2б свидетельствует о медленном ускорении УВ вдоль детонационной трубы: от 1100 м/с

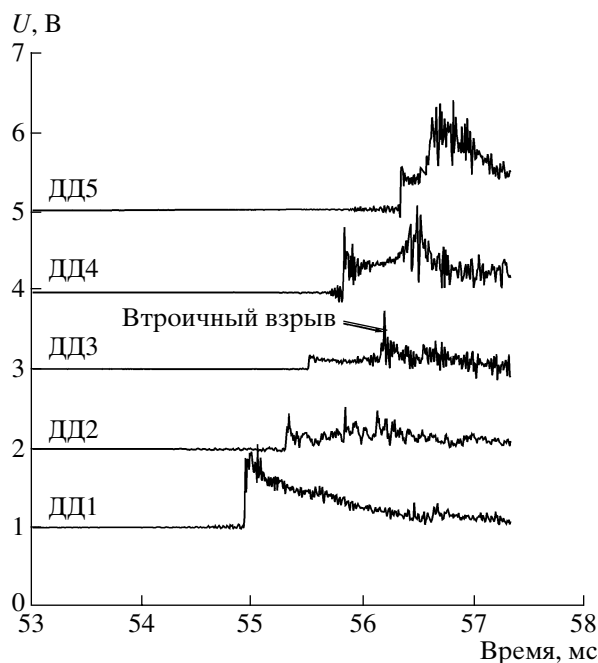


Рис. 4. Записи датчиков давления ДД1–ДД5 в опыте серии 2а с задержкой прихода УВ $\tau = 12.2$ мс (см. кривую 7 на рис. 3).

при $X = 0.35$ м до 1650 м/с при $X = 1.7$ м. Аналогичное поведение первичных УВ в серии 2б зарегистрировано при больших “отрицательных” задержках $\tau < -3$ мс.

Результаты опытов серии 2а в целом повторяют аналогичные результаты серии 1б. Например, кривая 6 на рис. 3 практически совпадает с кривой 10 на рис. 2. Эти кривые соответствуют опытам с близкими значениями скорости УВ при $X = 0$ ($\approx 820\text{--}850$ м/с) и одинаковыми значениями задержки прихода УВ $\tau \approx 2.3$ мс.

В опытах серии 2а с повышенной начальной скоростью УВ (кривые 7 и 8 на рис. 3) при прохождении УВ через форкамерное облако наблюдались вторичные взрывы. На рис. 4 представлена запись давления, соответствующая $\tau = 12.2$ мс (кривая 7 на рис. 3). Скорость первичной УВ на измерительной базе ДД1–ДД2 с оставила 1057 ± 30 м/с. На базе ДД2–ДД3 первичная волна ускорилась до 1481 ± 40 м/с, а затем замедлилась до 1282 ± 30 м/с на базе ДД3–ДД4 и до 770 ± 15 м/с на базе ДД4–ДД5. Запись давления датчиком ДД3 показывает, что за передним фронтом УВ происходит вторичный взрыв, и вторичная взрывная волна приближается к первичной УВ (см. записи датчиков ДД4 и ДД5), распространяясь со средней скоростью $2200\text{--}2300$ м/с.

Наибольший интерес вызывают результаты опытов серии 2б с зажиганием смеси в форкамере. При задержках прихода УВ $\tau = 2.6\text{--}5.6$ мс (кривые 11–13 на рис. 3) наблюдалось ускорение УВ

до средней скорости 1850–2100 м/с, превышающей скорость детонации Чепмена–Жуге. Столь высокие значения средней скорости УВ означают, что за форкамерным облаком происходит переход УВ в детонацию через образование пережатой детонационной волны. Наименьшее преддетонационное расстояние ($X \approx 1.3–1.5$ м) достигается при малых положительных задержках прихода УВ ($\tau = 2.6$ и 4.6 мс, кривые 11 и 12 на рис. 3). При задержке $\tau = 5.6$ мс (кривая 13 на рис. 3) первичная УВ после прохождения через форкамерное облако сначала распространяется с той же средней скоростью, что и при отрицательных τ ($\tau = -2$ мс, кривая 10 на рис. 3). Однако на расстоянии $X \approx 1.0–1.7$ м наблюдается резкое увеличение средней скорости УВ до 2100 м/с вследствие слияния первичной УВ с вторичной взрывной волной, образованной в форкамерном облаке.

Таким образом, синхронизация прихода УВ в форкамерное облако с моментом вспышки смеси в облаке позволяет ускорить переход УВ в детонацию. В опытах серии 2б для перехода УВ с числом Маха около 3.2 в детонацию понадобилось расстояние около 1.3–1.5 м (22–25 диаметров трубы). Это расстояние следует сравнить с расстоянием, необходимым для возникновения детонации в трубе без зажигания газа в форкамере. Отметим, что в опытах без зажигания газа в форкамере детонацию в трубе не наблюдали (см. кривую 9 на рис. 3). Если экстраполировать кривую 9 до пунктирной прямой $V = 1804$ м/с, получим для преддетонационного расстояния оценочную величину 2.2 м (37 диаметров трубы). Это означает, что при взаимодействии УВ с форкамерным облаком длина преддетонационного расстояния уменьшилась приблизительно в 1.5 раз. Возможность такого уменьшения преддетонационного расстояния определялась начальной интенсивностью и длительностью фазы сжатия первичной УВ, а также временем прихода УВ в форкамерное облако. Ранний или поздний приход УВ в облако не приводил к заметному изменению динамики УВ в детонационной трубе. Эффект сокращения преддетонационного расстояния наблюдался только при тщательной синхронизации прихода УВ в форкамерное облако с моментом вспышки смеси в облаке. Физический механизм такого “резонансного” взаимодействия УВ с облаком связан, по-видимому, с повышенной чувствительностью взрывчатой смеси в облаке, подготовленной к самовоспламенению. В таких усло-

виях сжатие и разогрев смеси в УВ с числом Маха около 3.2 оказались достаточными для возбуждения быстрых экзотермических реакций вблизи ударного фронта и возникновения детонации.

В пользу такой интерпретации полученных результатов говорят и опытные данные [7]. В [7] исследовано влияние предварительного холодного окисления на развитие преддетонационного горения в пентано-кислородных смесях и обнаружено резкое (до 1.5–2.0 раз) сокращение преддетонационного расстояния в зависимости от времени зажигания подготовленной смеси.

В наблюдаемых явлениях определенную роль мог играть и классический механизм ускорения пламени при взаимодействии с УВ, приводящий к многократному увеличению поверхности горения [2, 3]. Однако тот факт, что эффект значительного сокращения преддетонационного расстояния наблюдался лишь при некоторой “резонансной” задержке прихода УВ в форкамерное облако, свидетельствует о второстепенной роли этого механизма. Тем не менее, при больших задержках прихода УВ, когда обсуждаемый эффект не наблюдался, датчики давления, установленные за форкамерой, регистрировали вторичные взрывы за первичной УВ. Эти вторичные взрывы могут способствовать возникновению детонации в более длинных детонационных трубах, чем та, которая использована в данной работе.

Работа выполнена при частичной поддержке Международным научно-техническим центром в рамках проекта № 2740.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я.Б., Когарко С.М., Симонов Н.И. // ЖТФ. 1957. 86. Т. Вып. 8. С. 1744.
2. Соколик А.С. Самовоспламенение, пламя и детонация в газах. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 427 с.
3. Шелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 255 с.
4. Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А. // ДАН. 2004. Т. 394. № 2. С. 222–225.
5. Frolov S.M., Basevich V.Ya., Aksenov V.S., Polikhov S.A. // J. Propulsion and Power. 2003. V. 19. № 4. P. 573.
6. Соколик А.С., Карнов В.П. В Сб. “Сгорание и смеобразование в дизелях”. М.: Изд-во АН СССР, 1958. Ч. 1. С. 483.
7. Шелкин К.И., Соколик А.С. // ЖФХ. 1937. Вып. 10. С. 484.