

УДК 534.222.2

## ИНИЦИИРОВАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ ДЕТОНАЦИИ В ТРУБАХ С ВИТКАМИ И СПИРАЛЬЮ ЩЕЛКИНА

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

Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва

Поступила в редакцию 27.04.2005 г.

Экспериментально продемонстрированы возможности значительного снижения критической энергии инициирования детонации в распылах жидкого углеводородного топлива в воздухе. Разработанная конструкция включала трубу околопредельного диаметра и комбинацию спирали Щелкина, витков трубы и переходных конусов для перепуска детонационной волны в трубу большого диаметра.

PACS: 47.27.nf, 47.40.Rs

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время активно ведутся работы по созданию нового типа реактивных двигателей – импульсных детонационных двигателей (ИДД). В таких двигателях топливо сжигается в бегущей детонационной волне (ДВ). По сравнению с существующими схемами организации горения в воздушно-реактивных и ракетных двигателях детонационное сжигание топлива в бегущей ДВ имеет ряд принципиальных преимуществ. Важнейшим из них считается более высокий термодинамический коэффициент полезного действия детонационного цикла, чем в других циклах тепловых машин [1–4].

Основная фундаментальная проблема на пути создания ИДД состоит в низкой детонационной

способности топливных распылов [3, 5] и, следовательно, больших энергетических затратах на циклическое инициирование детонации. Возможность решения этой проблемы связывается с применением инициирующих трубок (“предетонаторов” [6]) – промежуточных устройств, в которых ДВ относительно легко инициируется в топливно-кислородной смеси. Полученную ДВ затем перепускают в камеру сгорания с топливно-воздушной смесью.

В отличие от газовых смесей переход горения в детонацию (ПГД) в капельных смесях жидкого топлива с воздухом практически не изучен. В экспериментальных исследованиях [5, 7, 8] гетерогенная (“капельная”) детонация инициируется сильными источниками: ударной волной (УВ) [5],



Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

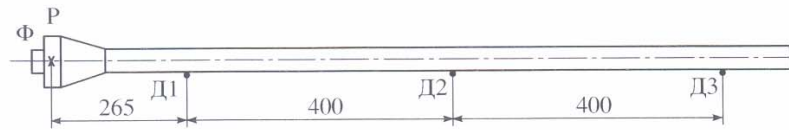


Рис. 2. Прямая инициирующая трубка.

газовой детонацией [7] или зарядом взрывчатого вещества [8]. В [9–13] детонация распылов жидкого топлива в воздухе инициировалась либо одним, либо двумя электрическими разрядами. В капельных смесях жидкого топлива с газообразным кислородом ПГД наблюдался в работе [14], где длина преддетонационного участка составляла от 20 до 100 калибров трубы. Сообщения об экспериментальных наблюдениях ПГД в капельных смесях углеводородных топлив с воздухом в литературе отсутствуют.

Целью данной работы является снижение минимальной энергии инициирования детонации в распылах жидкого *n*-гексана и *n*-гептана в воздухе до значений, приемлемых для практических приложений.

### 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Основной элемент установки – детонационная камера состоит из инициирующей трубки и основной трубы. В опытах использовались стальные инициирующие трубки диаметром 28 мм.

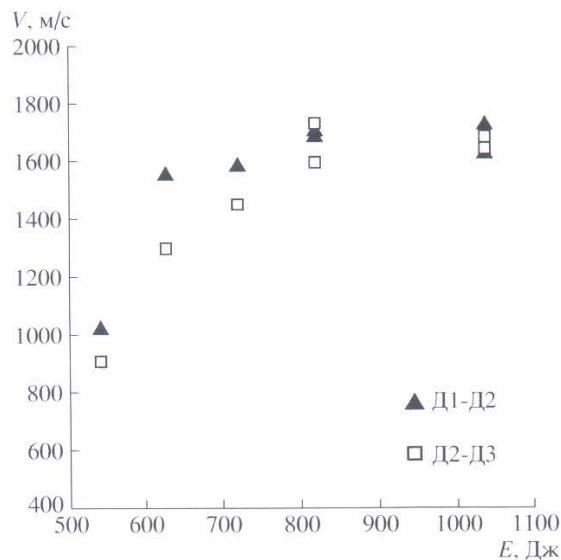


Рис. 3. Средняя скорость УВ  $V$  на двух измерительных базах как функция энергии зажигания  $E$  для инициирующей трубки, показанной на рис. 2.

Выбор такого диаметра трубок основан на том, что он близок к предельному диаметру детонации смесей *n*-гексана и *n*-гептана с воздухом и требует минимальной энергии прямого инициирования детонации [12]. Для перепуска образованных ДВ в трубы большего диаметра (41 и 51 мм) применялись расширительные муфты. Полная длина детонационной камеры с инициирующей трубкой, расширительными муфтами и трубами большего диаметра не превышала 1.8 м. Выбор такой длины камеры связан с необходимостью получения детонации на коротких расстояниях.

На одном конце инициирующей трубки устанавливалась пневматическая форсунка, обеспечивающая весь расход воздуха (до 30 г/с) через детонационную камеру и тонкое распыление топлива со средним размером капель 5–6 мкм (на расстоянии 70 мм от сопла форсунки). Другой конец камеры соединялся с атмосферой через огнепреградитель в виде цилиндрического сосуда, заполненного металлической сеткой.

Опыты проводились при импульсной подаче воздуха и топлива. Воздух поступал из баллона емкостью 40 л через электромагнитный клапан 1. Топливо под давлением подавалось в форсунку через электромагнитный клапан 2. Коэффициент избытка горючего в опытах составлял  $1.3 \pm 0.1$ . Длительность импульса равнялась 1 с, а начальная температура воздуха и топлива –  $293 \pm 4$  К. Электрический разрядник Р размещался на расстоянии 60 мм от сопла форсунки. Подробное описание характеристик форсунки и разрядника приведено в [9, 12].

Электропитание разрядника включало высоковольтный конденсатор емкостью  $C$ . Энергия разряда  $E$  варьировалась с помощью изменения напряжения на конденсаторе  $U$ . Энергия рассчитывалась по емкости конденсатора и напряжению  $E = 0.5CU^2$ . Погрешность определения энергии разряда не превышала 5% с учетом остаточного напряжения на конденсаторе. Сигнал запуска разряда поступал на запускающее устройство разрядника  $У$  от цифрового управляющего блока. Управляющий блок позволял заранее устанавливать время задержки запуска разряда после начала подачи воздуха и топлива в детонационную камеру. Продолжительность разрядного тока составляла  $\tau = 50 \pm 5$  мкс. Для измерения динамики волновых процессов использовались пьезоэлектрические датчики давления серии ЛХ-600. В дето-

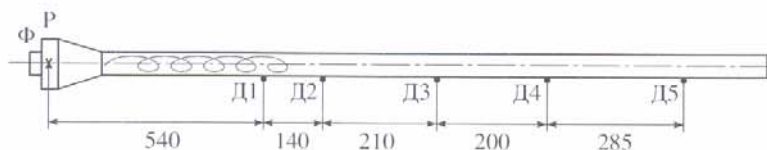


Рис. 4. Прямая иницирующая трубка со спиралью Щелкина из проволоки диаметром 4 мм.

национной камере устанавливалось до пяти датчиков (Д1–Д5 на рис. 1). Погрешность измерения скорости ударной или детонационной волны на измерительной базе 200 мм, как правило, не превышала 2%. Система диагностики включала аналого-цифровой преобразователь L-783 и персональный компьютер ПК.

На установке (рис. 1) было проведено несколько серий экспериментов, цель которых состояла в получении детонации в распылах жидкого *n*-гексана и *n*-гептана в воздухе при минимальной энергии иницирования  $E$ .

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**2.1. Иницирование взрывных режимов горения в прямой гладкой трубке.** На рис. 2 показана схема иницирующей трубки диаметром 28 мм с форсункой Ф и конусной разрядной камерой. В разрядной камере установлен электрический разрядник Р. Емкость конденсатора разрядника  $C = 640$  мкФ. Датчики давления Д1, Д2 и Д3 располагались на расстояниях 265, 665 и 1065 мм от разрядника.

На рис. 3 приведены результаты измерений средней скорости УВ в опытах с *n*-гексаном на двух измерительных базах: между датчиками Д1 и Д2 (Д1–Д2) и между датчиками Д2 и Д3 (Д2–Д3). При увеличении энергии разряда от 540 до 820 Дж скорость УВ на этих измерительных базах возрастает, причем наблюдается затухание УВ при распространении вдоль трубки. При энергии разряда 1040 Дж в иницирующей трубке была зарегистрирована ДВ, которая распространялась с постоянной скоростью  $1700 \pm 50$  м/с. Измеренная скорость детонации оказалась несколько ниже расчетного значения Чепмена–Жуге (1840 м/с). Это, по-видимому, связано с тем, что диаметр иницирующей трубки близок к предельной величине, когда существенными становятся потери энергии и количества движения ударно сжатого вещества в стенки трубки [15–17]. Кроме того, следует иметь в виду, что опыты проводились с гетерогенной смесью, для детонации которой характерны дополнительные потери, связанные с двухфазными эффектами (неоднородность смеси, недогорание и т.д.) [17]. Близость диаметра трубки к предельному значению отражается и на характере нарастания скорости УВ при увеличении энергии разряда (рис. 3). В отличие от подобных зави-

симостей для труб большого диаметра [9, 11–13], в которых наблюдается скачок скорости УВ от 1000–1200 м/с до 1700–1800 м/с при увеличении энергии разряда до критической энергии иницирования детонации, зависимость  $V(E)$  на рис. 3 является гладкой.

Из рис. 3 следует, что критическая энергия иницирования гетерогенной детонации *n*-гексана в трубке диаметром 28 мм с помощью используемого в опытах электрического разрядника составляет 900–1000 Дж. Отметим, что при уменьшении емкости конденсатора разрядника  $C$  от 640 до 440 мкФ критическая энергия иницирования детонации оставалась на том же уровне, т.е. для иницирования детонации требовалось соответствующее повышение напряжения на конденсаторе. Аналогичные результаты получены для *n*-гептано-воздушных смесей. Очевидно, что для практических приложений детонационного сжигания топлива полученные значения критической энергии иницирования детонации очень велики.

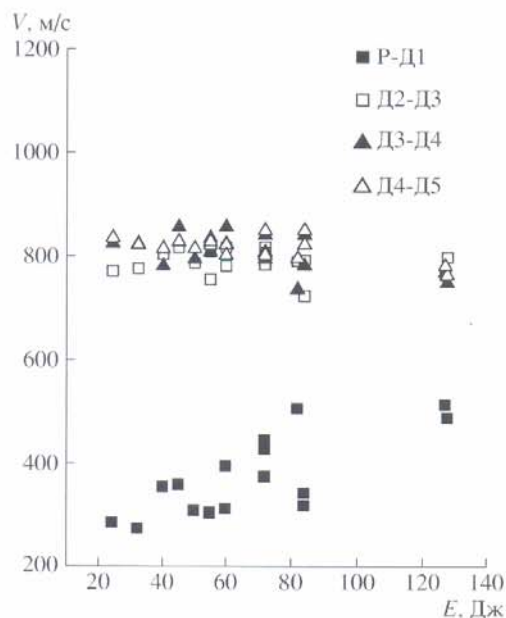


Рис. 5. Средняя скорость УВ  $V$  на разных измерительных базах как функция энергии зажигания  $E$  для иницирующей трубки, показанной на рис. 4.

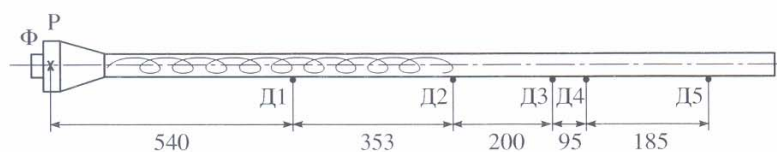


Рис. 6. Прямая инициирующая трубка со спиралью Щелкина из проволоки диаметром 7 мм.

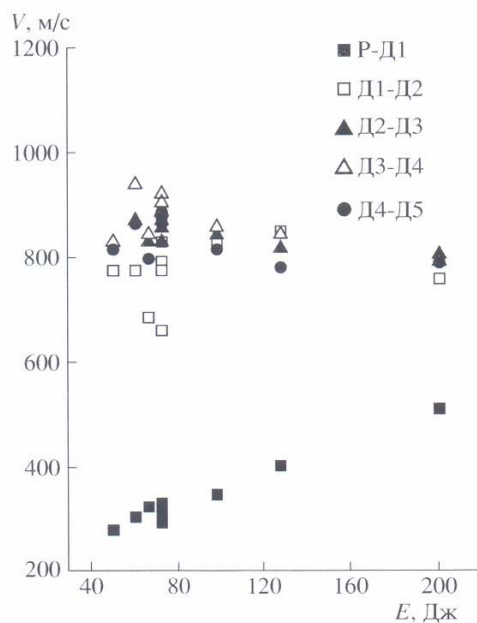


Рис. 7. Средняя скорость УВ  $V$  на разных измерительных базах как функция энергии зажигания  $E$  для инициирующей трубки, показанной на рис. 6.

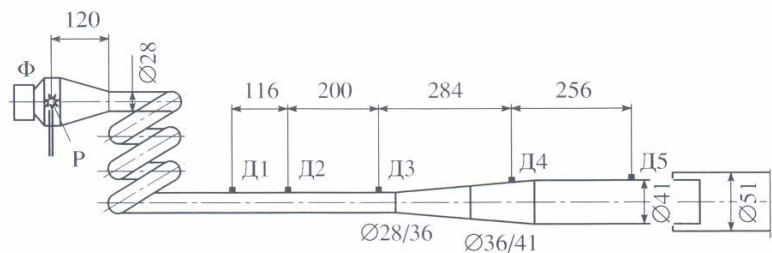


Рис. 8. Детонационная камера с инициирующей трубкой в виде змеевика с тремя витками.

В связи с этим возникает необходимость снижения энергии инициирования детонации до значений, приемлемых для практики.

**2.2. Иницирование взрывных режимов горения в прямой трубке со спиралью Щелкина.** С целью значительного снижения критической энергии инициирования детонации мы обратились к классическим работам К.И. Щелкина по сокра-

щению предетонационного расстояния для газовых взрывчатых смесей [18]. Поскольку в [18] первостепенное значение отводилось газодинамическим факторам в явлении ПГД, было предложено устанавливать в детонационную трубу регулярные препятствия в виде проволочной спирали, способствующие ускорению турбулентного пламени и возникновению детонации. Это позво-

лило сократить длину преддетонационного участка в десятки раз. Следуя [18], было проведено несколько серий экспериментов по инициированию взрывных режимов горения в трубках диаметром 28 мм со спиралью разной длины, свитыми из стальной проволоки разного диаметра. Ниже приведены некоторые результаты опытов.

В первой серии использовалась инициирующая трубка, показанная на рис. 4. Спираль, свитая из стальной проволоки диаметром 4 мм с шагом 20 мм, имела длину 400 мм и устанавливалась на выходе из конусной разрядной камеры. Внешний диаметр спирали был равен внутреннему диаметру трубы. Емкость конденсатора разрядника равнялась  $C = 100$  мкФ.

На рис. 5 приведены результаты измерений средней скорости УВ  $V$  на разных измерительных базах (см. рис. 4): между разрядником Р и датчиком Д1 (Р–Д1), датчиками Д2 и Д3 (Д2–Д3), датчиками Д3 и Д4 (Д3–Д4) и датчиками Д4 и Д5 (Д4–Д5). Распределения  $V$  построены как функции энергии разряда  $E$ . Максимальная скорость УВ на выходе из спирали составляла около 800 м/с при изменении энергии разряда от 20 до 130 Дж. Интересно, что после выхода из спирали УВ распространялась с почти постоянной скоростью  $800 \pm 50$  м/с на участке трубы длиной 0,7–0,8 м. Отметим, что на участке Р–Д1 наблюдалась плохая повторяемость результатов опытов по измеренной средней скорости волны давления. На этом участке профиль давления в волне имеет куполообразную форму без ярко выраженного ударного фронта.

Варьирование диаметра проволоки спирали не приводило к каким-либо существенным изменениям динамики взрывных процессов. На рис. 6 показана схема трубки, в которой проведена серия опытов со спиралью длиной 400 мм, свитой из стальной проволоки диаметром 7 мм с шагом спирали 20 мм. На рис. 7 приведены результаты измерений средней скорости УВ на разных измерительных базах (см. рис. 6) как функции энергии разряда  $E$ . На выходе из спирали скорость УВ по-прежнему не превышала 800 м/с при изменении энергии разряда от 50 до 200 Дж. При энергиях разряда от 60 до 80 Дж наблюдалось некоторое ускорение УВ (до 900 м/с) после выхода из спирали.

Увеличение длины спирали также не приводило к каким-либо существенным изменениям в динамике взрывной волны. Например, при использовании спиралей длиной 650–700 мм, свитых из стальной проволоки диаметром 4 и 7 мм с шагом спирали 20 мм, максимальная скорость УВ в опы-

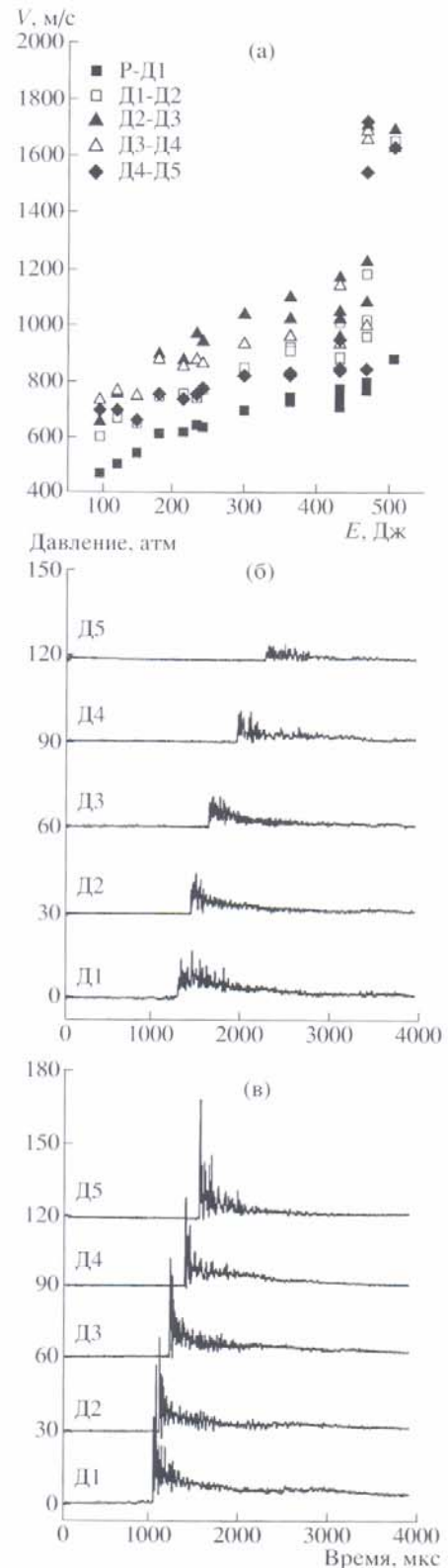


Рис. 9. (а) – средняя скорость УВ  $V$  на разных измерительных базах как функция энергии зажигания  $E$  для детонационной камеры, показанной на рис. 8; (б) – осциллограммы давления при  $E = 300$  и (в) –  $E = 507$  Дж.

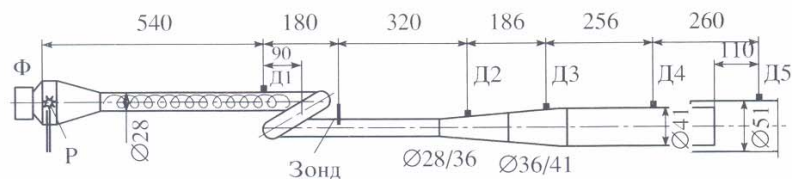


Рис. 10. Детонационная камера с инициирующей трубкой со спиралью Щелкина и витком.

тах никогда не превышала  $900 \pm 20$  м/с. Таким образом, применение спиралей Щелкина не вызвало инициирования детонации. Тем не менее для генерации УВ, распространяющихся со скоростью 800–900 м/с, потребовались значения энергии разряда (20–30 Дж), значительно меньшие, чем в прямой гладкой инициирующей трубке (~500 Дж, см. рис. 3).

**2.3. Иницирование взрывных режимов горения в трубке с витками.** Известно, что повороты трубопроводов являются местами повышенной вероятности возникновения детонации [19]. При входе УВ в поворот трубы появляются локальные области отражений с газодинамической фокусировкой УВ, а также области расширения течения. Кроме того, при движении газа по криволинейной траектории с высокими скоростями существенно перераспределяются термодинамические параметры и скорости по сечению трубы, что вызывает дополнительную генерацию турбулентности. В областях повышенного давления и температуры создаются условия для быстрого энерговыделения и ускорения пламени, а иногда и для возникновения детонации [11, 13].

Для анализа эффективности применения витков труб как элементов, способствующих инициированию детонации, была проведена серия опытов в гладкой трубке диаметром 28 мм со змеевиком (см. рис. 8). К разрядной камере присоединялся змеевик, состоящий из трех витков, с осевой линией диаметром 140 мм. На выходе из змеевика устанавливался прямой участок трубки диаметром 28 мм, который через конусную муфту соединялся с трубой диаметром 41 мм, утопленной с равномерным радиальным зазором в трубу диаметром 51 мм.

Опыты с *n*-гексаном показали, что с увеличением энергии разряда от 95 до 510 Дж скорость УВ, выходящей в прямой участок инициирующей трубки, монотонно возрастает (рис. 9а). На выходе из змеевика профили давления в УВ близки к прямоугольным (рис. 9б). На прямом участке трубки между датчиками Д1 и Д3 профиль давления в волне приобретал треугольную форму. При энергии зажигания выше 470 Дж на измерительных базах Д1–Д2, Д2–Д3, Д3–Д4 и Д4–Д5 регистрировалась ДВ с характерной скоростью распространения 1630–1720 м/с (рис. 9в). Детонационная вол-

на распространялась, не затухая, через переходный участок и выходила в трубу диаметром 51 мм.

Эта серия опытов интересна тем, что в ней получены условия инициирования детонации в короткой гладкой трубке со змеевиком из трех витков. Полученное значение критической энергии инициирования в 2 раза ниже энергии инициирования детонации в прямой трубке диаметром 28 мм (см. рис. 3). В опытах со змеевиками из одного и двух витков детонация при таких энергиях разряда не наблюдалась.

Из рис. 9а следует, что детонация возникает, когда средняя скорость УВ в змеевике близка к 800 м/с (измерительная база Р–Д1). В рассматриваемых опытах такая скорость УВ обеспечивалась электрическим разрядом с энергией, большей 470 Дж. Учитывая, что на выходе из спирали Щелкина (см. раздел 2.2) получаются такие же волны при значительно меньшей энергии разряда, обнаруженные особенности спиралей и змеевика позволяют предложить эффективную компоновку детонационной камеры для инициирования детонации.

**2.4. Иницирование взрывных режимов горения в трубке со спиралью Щелкина и витком.** Схема комбинированной детонационной камеры приведена на рис. 10. В инициирующей трубке использовалась спираль Щелкина длиной 400 мм, свитая из стальной проволоки диаметром 4 мм с шагом спирали 20 мм. К секции со спиралью присоединялся змеевик из одного витка. Участок инициирующей трубки после змеевика переходил через конусную муфту в трубу диаметром 41 мм, которая в свою очередь была утоплена с равномерным радиальным зазором в трубу диаметром 51 мм. В дополнение к датчикам давления Д1–Д5 в детонационной камере устанавливался специальный зонд, который использовался для определения скорости распространения волн давления. Описание конструкции и принципа работы зонда приведено в [12].

Из рис. 11а видно, что при энергии зажигания *n*-гексано-воздушной смеси от 30 до 50 Дж на измерительных базах Зонд–Д2, Д2–Д3, Д3–Д4 и Д4–Д5 зарегистрирована ДВ. Детонация возникает на расстоянии около 1 м от разрядника (около 28 калибров трубы), переходит в трубу диаметром 41 мм, а затем и в трубу диаметром 51 мм. Средняя скорость

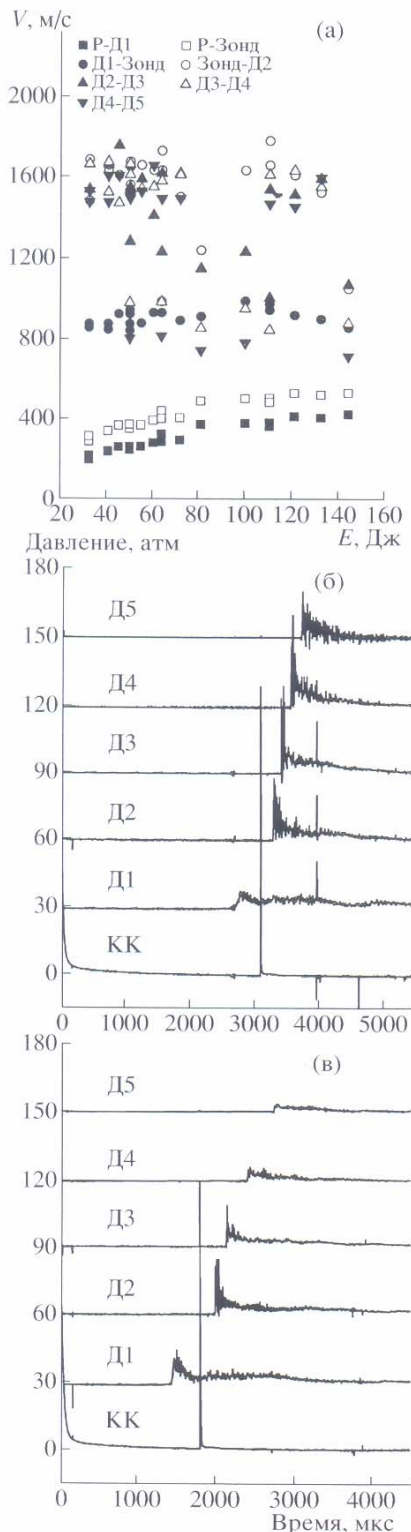


Рис. 11. (а) – средняя скорость УВ  $V$  на разных измерительных базах как функция энергии зажигания  $E$  для детонационной камеры, показанной на рис. 10; (б) – осциллограммы давления при  $E = 30$  и (в) –  $E = 100$  Дж.

ДВ составляет 1500–1700 м/с. Давление в ДВ достигает 15–20 атм (без учета “шума”). На рис. 11б и 11в приведены осциллограммы давления на разных измерительных базах при  $E = 30$  и 100 Дж. Кривые КК соответствуют записям контрольного канала, показывающим сигналы разрядного тока (в окрестности начала координат) и зонда (ярко выраженный пик).

При энергиях зажигания от 30 до 50 Дж детонация на выходе из витка возникала с высокой повторяемостью и всегда переходила в трубу диаметром 51 мм (рис. 11б). Высокая повторяемость опытов с возбуждением детонации в витке стала возможной благодаря тщательной доводке конструкции установки.

При энергиях зажигания от 50 до 130 Дж детонация не всегда переходила в большую трубу (рис. 11в). При энергиях зажигания от 130 до 300 Дж детонация вообще не наблюдалась. Аналогичные результаты получены для капельных *n*-гептано-воздушных смесей. Эффекты, регистрируемые в инициирующей трубке с витком, по-видимому, связаны с тем, что при относительно высоких значениях  $E$  кумулирующая волна давления (по терминологии Щелкина [18]) образует-ся за пределами витка.

Таким образом, в детонационной камере, изображенной на рис. 10, минимальная энергия инициирования детонации капельных *n*-гексано-воздушных и *n*-гептано-воздушных смесей составила 30 Дж, что более чем в 30 раз ниже значений для прямой гладкой инициирующей трубки. В опытах с витком и спиралью электрический разряд был источником зажигания смеси, а не сильной инициирующей УВ. Следовательно, нами впервые зарегистрирован ПГД в капельных смесях углеводородного топлива с воздухом. Длина преддетонационного участка в трубке диаметром 28 мм оказалась близкой к 1 м, т.е. к 36 калибрам трубы, а полная длина детонационной камеры – 1.8 м. Для сравнения отметим, что переход горения в детонацию в газовой пропано-воздушной смеси требует не менее 260 калибров в случае использования прямой гладкой трубы [20] и более 60 калибров при прямой трубе с турбулизаторами в виде регулярных препятствий [21].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и экспериментально продемонстрирован новый способ инициирования детонации в распылах жидкого топлива в воздухе. Комбинированное инициирование детонации достигалось с помощью труб околорезельного диаметра, спирали Щелкина, витков и переходных конусов для перепуска ДВ в трубу большого диаметра. Детонация возникала на коротких расстояниях, причем энергия инициирования оказалась значительно

меньшей, чем при прямом инициировании одним электрическим разрядом. Такой способ инициирования детонации может быть рекомендован для практических приложений, например в ИДД для летательных аппаратов.

Работа выполнена при частичной поддержке Международного научно-технического центра (проект № 2740).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я.Б. К вопросу об энергетическом использовании детонационного горения // ЖТФ. 1940. Т. 10. № 17. С. 1453.
2. Фролов С.М. Перспективы использования детонационного сжигания топлива в энергетике и на транспорте // Тяжелое машиностроение. 2003. № 9. С. 19.
3. Roy G.D., Frolov S.M., Borisov A.A., Netzer D.W. Pulse Detonation Propulsion: Challenges, Current Status, and Future Perspective // Progress in Energy and Combustion Sciences. 2004. V. 30. № 6. P. 545.
4. Фролов С.М., Барыкин А.Е., Борисов А.А. Термодинамический цикл с детонационным сжиганием топлива // Хим. физика. 2004. Т. 23. № 3. С. 17.
5. Dabora E.K. Lean Detonation Limit of Sensitized Kerosene Sprays in Air // Progress in Astronautics and Aeronautics Ser. V. 133. N. Y.: AIAA Inc., 1991. P. 311.
6. Brophy C.M., Netzer D.W., Sinibaldi J., Jonson R. Detonation of JP-10 Aerosol for Pulse Detonation Applications // High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control / Eds. Roy G., Frolov S., Netzer D., Borisov A. M.: Elex-KM Publ., 2001. P. 207.
7. Dabora E.K., Ragland K.W., Nicholls J.A. A Study of Heterogeneous Detonations // Astronautica Acta. 1966. V. 12. № 1. P. 9.
8. Benedick W.B., Tieszen S.R., Knystautas R., Lee J.H.S. Detonation of Unconfined Large-Scale Fuel Spray – Air Clouds // Progress in Astronautics and Aeronautics Ser. V. 133. N.Y.: AIAA Inc., 1991. P. 297.
9. Frolov S.M., Basevich V.Ya., Aksenov V.S., Polikhov V.S. Initiation of Confined Spray Detonation by Electric Discharges // Confined Detonations and Pulse Detonation Engines / Eds. Roy G.D., Frolov S.M., Santoro R.J., Tsyganov S.A. M.: Torus Press, 2003. P. 157.
10. Фролов С.М., Басевич В.Я., Аksenov В.С., Полихов С.А. Иницирование детонации в распылах жидкого топлива последовательными электрическими разрядами // Докл. РАН. 2004. Т. 394. № 4. С. 503.
11. Фролов С.М., Аksenov В.С., Басевич В.Я. Сокращение преддетонационного участка в капельной взрывчатой смеси комбинированными средствами // Докл. РАН. 2005. Т. 401. № 2. С. 320.
12. Frolov S.M., Basevich V.Ya., Aksenov V.S., Polikhov V.S. Spray Detonation Initiation by Controlled Triggering of Electric Discharges // J. Propulsion and Power. 2005. V. 21. № 1. P. 54.
13. Фролов С.М., Аksenov В.С., Басевич В.Я. Иницирование детонации в распылах жидкого топлива // Хим. физика. 2005. Т. 24. № 7. С. 69.
14. Pierce T.N., Nicholls J.A. Two-Phase Detonations with Bimodal Drop Distributions // Astronautica Acta. 1972. V. 17. № 4–5. P. 703.
15. Зельдович Я.Б., Компанец А.С. Теория детонации. М.: Гостехтеориздат, 1955. 268 с.
16. Фролов С.М., Гельфанд Б.Е. О предельном диаметре распространения газовой детонации в трубах // Докл. АН СССР. 1990. Т. 312. № 5. С. 1177.
17. Митрофанов В.В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем. Новосибирск: Изд-во ИГ СО РАН, 2003. 200 с.
18. Шелкин К.И. Быстрое горение и спиновая детонация газов. М.: Воениздат, 1949. 196 с.
19. Nettleton M.A. Gaseous Detonations: Their Nature, Effects and Control. London–N.Y.: Chapman and Hall, 1987. 255 с.
20. Veysiere B., Kerampran S., Proust C., Gilles S. Effect of Tube Length on Flame Acceleration and DDT in Tubes of Constant Cross Section // Proc. 19th ICDEERS. 2003. Hakone, Japan. Paper 154 (CD, ISBN 4-9901744-1-0).
21. Santoro R.J., Lee S.-Y., Conrad C. et al. Deflagration-to-Detonation Transition Studies for Multicycle PDE Applications // Advances in Confined Detonations / Eds. Roy G.D., Frolov S.M., Santoro R.J., Tsyganov S.A. M.: Torus Press, 2002. P. 243.