

ИНИЦИИРОВАНИЕ ДЕТОНАЦИИ
В РАСПЫЛАХ ЖИДКОГО ТОПЛИВА

© 2005 г. С. М. Фролов, В. С. Аксенов, В. Я. Басевич

Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва

Поступила в редакцию 01.10.2004

Предложены и экспериментально продемонстрированы три новых метода инициирования детонации в распылах жидкого *n*-гексана и *n*-гептана в воздухе: 1) инициирование детонации в гладкой трубе двумя последовательными электрическими разрядами; 2) двухстадийное инициирование детонации, совмещающее классический метод спирали Щелкина с идеей внешнего стимулирования взрыва во фронте бегущей ударной волны; 3) комбинированное инициирование с газодинамической фокусировкой слабой ударной волной с помощью витков труб. Эти методы дополняют известные методы – прямое инициирование детонации и переход горения в детонацию – и включают принудительное зажигание горючей смеси в окрестности фронта относительно слабой первичной ударной волны. При таком зажигании обеспечивается быстрое сгорание смеси и трансформация ударной волны в детонацию. Детонация возникает на коротких расстояниях, причем энергия инициирования оказывается значительно меньше, чем при прямом инициировании одним разрядом. Использование трубы околопредельного диаметра, спирали Щелкина и витка снижает требуемые энергетические затраты и расширяет пределы инициирования детонации.

1. ВВЕДЕНИЕ

В течение последнего десятилетия нарастающими темпами ведутся работы по созданию нового типа реактивных двигателей на химическом топливе – импульсных детонационных двигателей (ИДД) [1, 2]. В таких двигателях применяется новый принцип преобразования химической энергии топлива в реактивное движение: топливо сжигают в бегущей детонационной волне (ДВ). По сравнению с существующими схемами организации горения в воздушно-реактивных и ракетных двигателях детонационное сжигание топлива в бегущей волне имеет ряд принципиальных преимуществ. Во-первых, термодинамический коэффициент полезного действия (КПД) детонационного цикла значительно превышает КПД других циклов, особенно при низких давлениях в камере сгорания [3]. Во-вторых, ИДД может работать как на специальных топливах, так и на штатном (жидком) авиационном или ракетном топливе. В-третьих, в отличие от многих существующих реактивных двигателей, ИДД конструктивно прост (не требует дорогостоящих компрессорных и турбонасосных агрегатов), надежен (в ИДД отсутствуют подвижные элементы) и самодостаточен (не требует разгонных блоков для выхода на рабочий режим). Наконец, использование многокамерных схем ИДД позволит простым увеличением числа камер повышать тяговые характеристики двигателя. Ввиду того, что практическая реализация детонационного сжигания топлива приведет к экономии энергоресурсов, работают и над созданием стационарных энергетических установок.

Основная фундаментальная проблема на пути реализации ИДД – низкая детонационная способность топливных распылов [2, 4] и, следовательно, большие энергетические затраты на циклическое инициирование детонации. Возможность решения этой проблемы связывают в основном с применением “преддетонатора” [5] – промежуточного устройства, в котором ДВ относительно легко инициируется в топливно-кислородной смеси. Полученную ДВ затем перепускают в камеру сгорания с топливно-воздушной смесью (ТВС).

В отличие от газовых смесей, переход горения в детонацию (ПГД) в капельных смесях жидкого топлива с воздухом (кислородом) практически не изучен. В экспериментальных исследованиях [4, 6, 7] гетерогенную (“капельную”) детонацию инициировали сильными источниками – ударной волной (УВ) [4], газовой детонацией [6] или зарядом ВВ [7]. В [8–11] детонацию распылов жидкого топлива в воздухе инициировали либо одним, либо двумя электрическими разрядами. В капельных смесях жидкого топлива с газообразным кислородом ПГД наблюдали в [12], где сообщается о длине преддетонационного участка, равной от 20 до 100 калибров трубы. Сообщения об экспериментальных наблюдениях ПГД в капельных смесях углеводородных топлив с воздухом в литературе отсутствуют.

Данная работа – продолжение работ [8–11], в которых предложен и исследован новый способ инициирования детонации в распылах жидкого топлива, открывающий путь к созданию “преддетонатора” на ТВС без использования кислорода. Способ

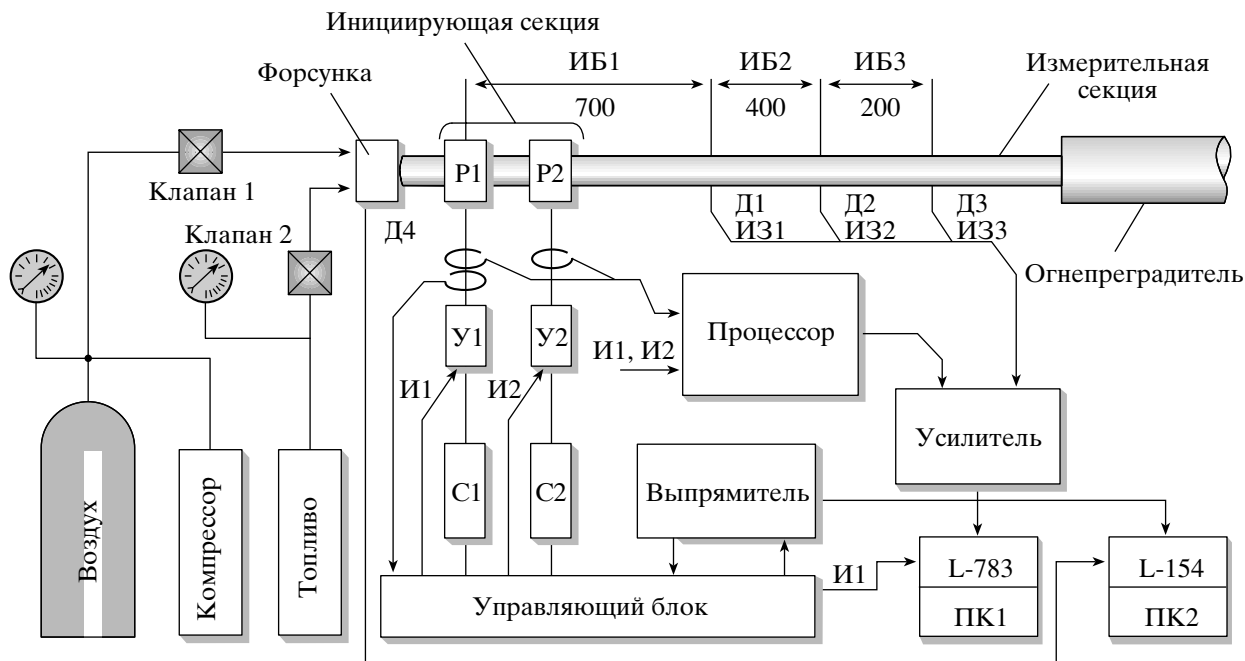


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: P1, P2 – электрические разрядники; ИБ1, ИБ2, ИБ3 – измерительные базы; Д1, Д2, Д3 – датчики давления; ИЗ1, ИЗ2, ИЗ3 – ионизационные зонды; ПК1, ПК2 – персональные компьютеры; С1, С2 – блоки конденсаторов; И1, И2 – синхроимпульсы; У1, У2 – запусковые устройства.

основан на идее Я.Б. Зельдовича и А.С. Компанейца [13] о возможности инициирования газовой детонации с помощью принудительного зажигания распределенными внешними источниками, установленными вдоль канала с горючим газом. Для газовых пропано-воздушных смесей экспериментальное доказательство идеи [13] получено в [14–16].

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Основной элемент установки – детонационная труба, состоящая из двух секций: инициирующей и измерительной. В опытах использовали стальные трубы диаметром 51 и 28 мм. На одном конце трубы устанавливали пневматическую форсунку, обеспечивающую весь расход воздуха (до 30 г/с) через трубу и тонкое распыление топлива со средним размером капель 5–6 мкм (на расстоянии 70 мм от сопла форсунки). Другой конец трубы соединяли с атмосферой огнепреградителем в виде камеры, заполненной металлической сеткой.

Опыты проводили при импульсной подаче воздуха и топлива. Воздух поступал из баллона емкостью 40 л через электромагнитный клапан 1. Топливо под давлением поступало в форсунку через электромагнитный клапан 2. Коэффициент избытка горючего в опытах составил 1.3 ± 0.1 . Длительность импульса – 1 с. Начальная температура

воздуха и топлива – 293 ± 4 К. В инициирующей секции установлены два электрических разрядника: P1 и P2. Первый разрядник размещен на расстоянии 60 мм от сопла форсунки, а второй – на расстоянии L от первого разрядника, кратном 100 мм. Электропитание разрядников включало высоковольтные конденсаторы С1 и С2 емкостью C_1 и C_2 . Энергию разрядов E_1 и E_2 варьировали, изменяя напряжение на конденсаторах U , которое было одинаковым для обоих разрядников. Энергию рассчитывали по емкости конденсаторов и напряжению: $E = 0.5CU^2$. Сигнал запуска разряда поступал на разрядник от цифрового управляющего блока. Управляющий блок позволял заранее устанавливать время задержки запуска второго разряда по отношению к первому. Продолжительность разрядного тока, τ , варьировали от 50 до 100 мкс, используя разрядники разной конструкции. Для измерения динамики волновых процессов использовали пьезоэлектрические датчики давления серии ЛХ-600 и ионизационные зонды. В измерительной секции устанавливали три пары датчиков и зондов. Расстояние до датчиков и зондов отсчитывали от первого разрядника. Система диагностики включала аналого-цифровые преобразователи и персональные компьютеры. В экспериментах подбирали время задержки запуска второго разряда, Δt_d , добиваясь инициирования детонации при наименьшей суммарной энергии разрядов $E = E_1 + E_2$.

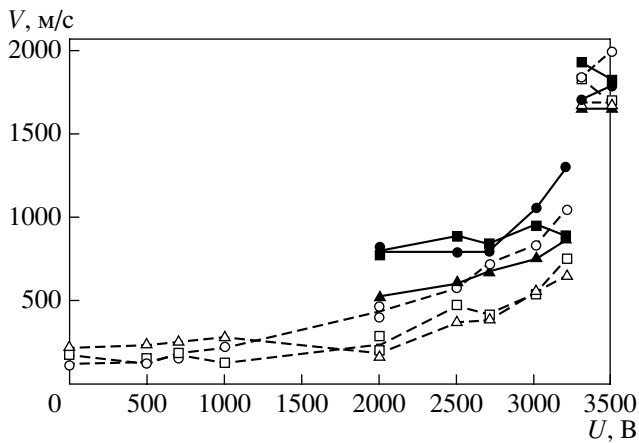


Рис. 2. Измеренные средние скорости ударных волн (сплошные линии) и фронта горения (штриховые линии) в н-гексано-воздушной смеси в зависимости от напряжения на конденсаторе разрядника P1: ○, ● – ИБ1; □, ■ – ИБ2; △, ▲ – ИБ3.

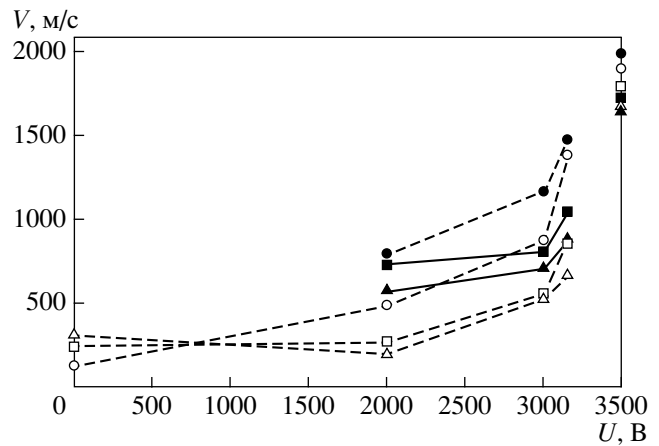


Рис. 3. Измеренные средние скорости ударных волн (сплошные линии) и фронта горения (штриховые линии) в н-гептановоздушной смеси в зависимости от напряжения на конденсаторе разрядника P1. Обозначения те же, что и на рис. 2.

На установке, схема которой показана на рис. 1, провели несколько серий экспериментов, цель которых – получить детонацию в распылах жидкого н-гексана и н-гептана в воздухе с помощью одного электрического разрядника или двух последовательно срабатывающих разрядников, используя минимальную энергию инициирования.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

3.1 Инициирование гетерогенной детонации одним разрядом

В первой серии экспериментов использовали трубу диаметром 51 мм и один разрядник, P1 или P2, с $\tau = (100 \pm 10)$ мкс. Номинальная емкость конденсаторов разрядников $C_1 = C_2 = 600$ мкФ. На рис. 2 и 3 приведены результаты экспериментов по инициированию гетерогенной детонации в н-гексановоздушной (рис. 2) и н-гептановоздушной (рис. 3) смесях в трубе диаметром 51 мм с помощью одного разрядника P1. По оси ординат отложены измеренные скорости волн давления (сплошные линии) и видимые скорости пламени (штриховые линии) на измерительных базах ИБ1, ИБ2 и ИБ3 (см. рис. 1). В экспериментах изменяли только напряжение U на шине конденсатора. Из рис. 2 и 3 видно, что для возбуждения детонации н-гексана и н-гептана разрядником P1 потребовалось напряжение около 3300 В. Указанное значение напряжения соответствуют энергии разряда $E = E_1 = 3.3$ кДж. При проведении аналогичных опытов с одним разрядником P2, расположенным на расстоянии 260 мм от сопла форсунки, минимальное напряжение, требуемое для инициирования детонации в воздушных смесях н-гексана и н-гептана, оказалось значительно большим: около

4100 В. Такое напряжение соответствует энергии разряда $E = E_2 = 5.1$ кДж.

3.2 Инициирование гетерогенной детонации двумя разрядами

Во второй серии экспериментов также использовали трубу диаметром 51 мм и два разрядника, P1 и P2, с $\tau = (100 \pm 10)$ мкс. В отличие от первой серии, номинальная емкость конденсаторов была вдвое ниже: $C_1 = C_2 = 300$ мкФ. В опытах изменяли напряжение U , время задержки запуска второго разряда, Δt_d , и расстояние L . На рис. 4 показаны результаты опытов с н-гексано-воздушной смесью при $L = 200$ мм.

Знаки “+” на рис. 4 относятся к условиям (по U и Δt_d), при которых на измерительных базах ИБ2 и ИБ3 регистрировали ДВ, распространяющуюся со средней скоростью (1780 ± 100) м/с. Измеренная скорость ДВ близка к термодинамическому значению скорости детонации в гомогенной стехиометрической смеси н-гексана с воздухом (1840 м/с). Знаки “-” соответствуют условиям, при которых детонация не возникала. Из рис. 4 видно, что инициирование детонации двумя разрядниками более эффективно с точки зрения энергетических затрат: минимальное требуемое напряжение U_{min} снижается на 25% (с 3300 до 2500 В) и 39% (с 4100 до 2500 В), а энергия инициирования снижается на 43% (с 3.3 до 1.9 кДж) и 62% (с 5.1 до 1.9 кДж) по сравнению с инициированием одиночными разрядами. Ширина “полуострова” детонации на рис. 4 очень мала и составляет 50 мкс при $U = 3000$ В и 10 мкс вблизи предела инициирования ($U = 2500$ В).

Минимальное напряжение U_{min} и оптимальное время задержки Δt_{d0} , при котором $U = U_{min}$, зависят от расстояния L между разрядниками. Так,

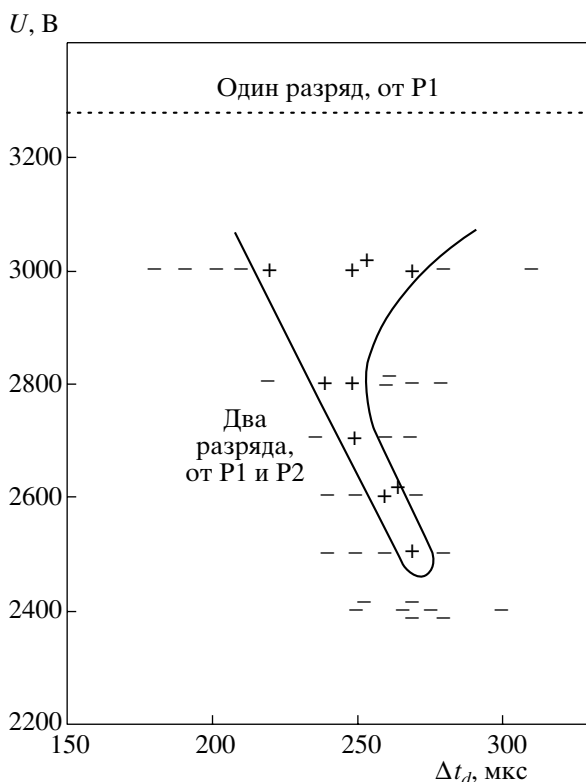


Рис. 4. “Полуостров” детонации для распыла жидкого н-гексана в воздухе в трубе диаметром 51 мм при инициировании двумя последовательными электрическими разрядами, создаваемыми разрядниками P1 и P2.

при $L = 100, 200$ и 300 мм получили: $U_{min} = 3000$ В и $\Delta t_{d0} = 100$ мкс; 2500 В и 270 мкс; 3000 В и 370 мкс, соответственно. При $L = 400$ мм и $U = 3000$ В детонация не возникала при любых Δt_d . Видно, что для достижения наименьшей энергии инициирования детонации существует оптимальное расстояние ($L \approx 200$ мм) между разрядниками.

3.3 Иницирование гетерогенной детонации двумя разрядами в трубе предельного диаметра

В третьей серии экспериментов использовали трубу диаметром 28 мм и два разрядника, P1 и P2, с $\tau = (50 \pm 5)$ мкс. Емкость конденсаторов $C_1 = C_2 = 225$ мкФ. В опытах изменяли время задержки Δt_d при напряжении $U = 2000$ В и расстоянии между разрядниками $L = 200$ мм. Измерительные базы ИБ1, ИБ2 и ИБ3 составили 265, 400 и 400 мм, соответственно.

Результаты опытов показаны на рис. 5. Детонация возникала при $211 < \Delta t_d < 221$ мкс, т.е. ширина “полуострова” детонации, как и в трубе диаметром 51 мм, на пределе инициирования очень мала (~ 10 мкс). Наименьшая суммарная энергия разрядов, при которой получили детонацию, $E = 0.9$ кДж.

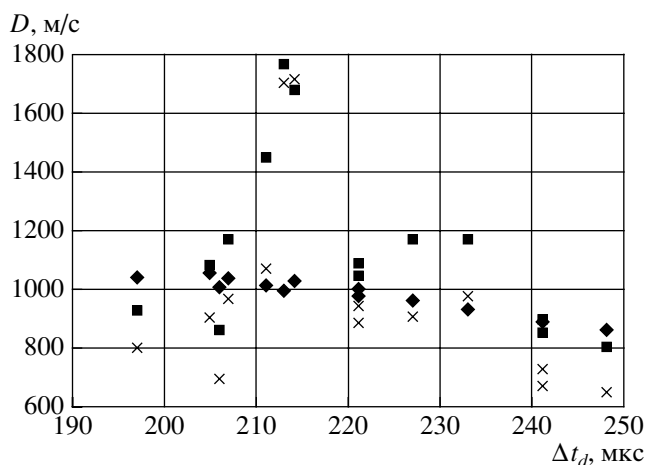


Рис. 5. “Полуостров” детонации для распыла жидкого н-гексана в воздухе в трубе диаметром 28 мм при инициировании двумя последовательными электрическими разрядами, создаваемыми разрядниками P1 и P2; \blacklozenge – ИБ1, \blacksquare – ИБ2, \times – ИБ3.

На рис. 6а и 6б приведены осциллограммы давления на датчиках Д1, Д2 и Д3, расположенных в сечениях 265, 665 и 1065 мм при $\Delta t_d = 214$ (а) и 211 мкс (б). Видно, что в отличие от рис. 6а, где зарегистрирована ДВ, на рис. 6б зарегистрирована затухающая УВ. В обоих случаях средняя скорость первичной УВ, образованной первым разрядом, составила (1020 ± 12) м/с. На рис. 6а средняя скорость ДВ на двух измерительных базах равна (1700 ± 13) м/с и (1720 ± 13) м/с, что ниже термодинамической скорости детонации ввиду близости диаметра трубы к предельному диаметру. Давление на фронте ДВ составило 15–20 атм (без учета “шума”). На рис. 6б средняя скорость затухающей УВ на тех же измерительных базах равна (1440 ± 11) м/с и (1060 ± 8) м/с. Кроме сигналов датчиков давления, на рис. 6 приведены записи канала диагностики с сигналами управляющего блока и разрядных токов. Эти записи позволяют определить истинную задержку запуска второго разрядника с погрешностью 0.3 мкс. Сигналы разрядных токов видны и на осциллограммах давления в виде возмущений “нулевой” линии. Отметим, что оптимальное время запуска второго разряда $\Delta t_{d0} = 214$ мкс хорошо согласуется с приходом первичной УВ в сечение второго разрядника: сигнал датчика Д1 на рис. 6а совпадает с окончанием разрядного тока на втором разряднике.

3.4 Иницирование гетерогенной детонации двумя разрядами в трубе предельного диаметра со спиралью Щелкина

При внимательном рассмотрении рис. 2 и 3 обнаруживается, что при малых энергиях разряда видимая скорость пламени увеличивается по мере

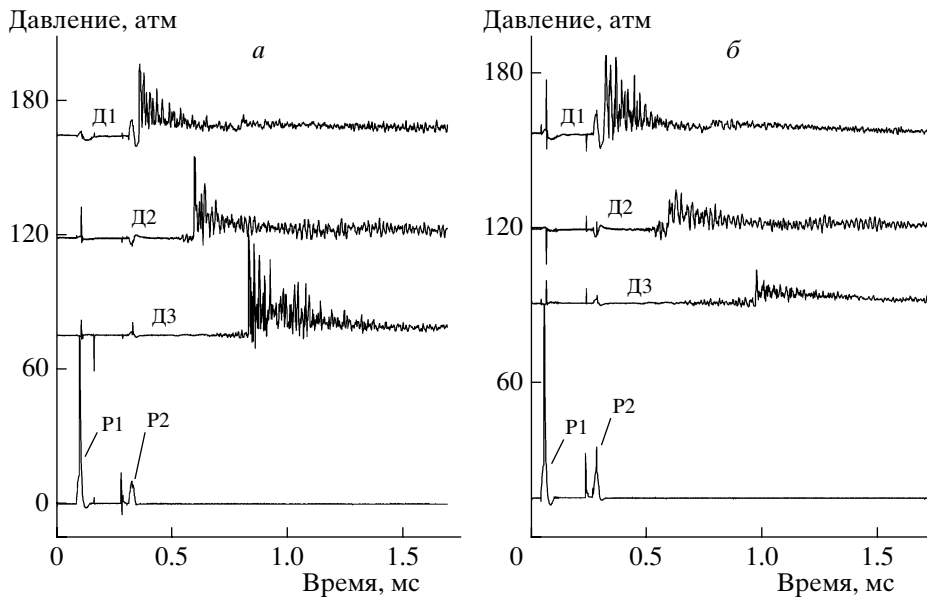


Рис. 6. Осциллограммы давления при детонации (а) и в отсутствие детонации (б) в распыле жидкого н-гексана в воздухе. Труба диаметром 28 мм. Иницирование двумя последовательными электрическими разрядами, создаваемыми разрядниками Р1 и Р2.

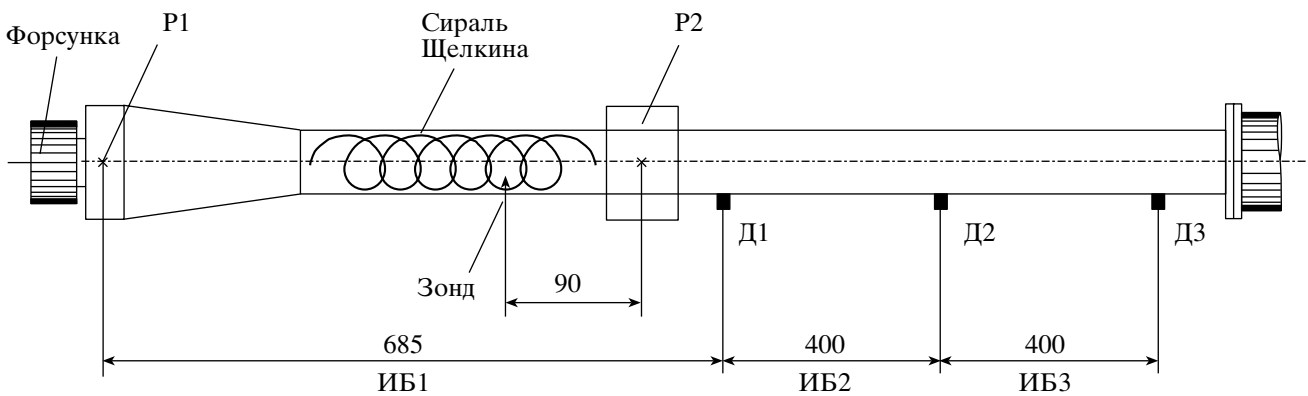


Рис. 7. Схема трубы диаметром 28 мм со спиралью Щелкина и двумя электрическими разрядниками – Р1 и Р2.

его движения вдоль трубы. Например, из рис. 2 следует, что при напряжении $U = 500$ В видимая скорость пламени на измерительной базе ИБ3 вдвое больше, чем на базе ИБ1. С увеличением напряжения U ситуация изменяется на обратную: видимая скорость пламени по мере движения вдоль трубы уменьшается. Например, при $U = 1000$ В (см. рис. 2) видимая скорость пламени на измерительной базе ИБ3 вдвое меньше, чем на базе ИБ1. Такому наблюдаемому эффекту можно дать следующее объяснение. При низких энергиях зажигания распространение пламени определяется главным образом турбулентностью струи, вытекающей из форсунки, а при высоких – ударной волной от разряда. В первом случае после зажигания пламя ускоряется по механизму Щелкина [17]. Во втором случае высокая начальная ско-

рость расширения продуктов горения обусловлена течением за УВ, и по мере затухания УВ видимая скорость пламени уменьшается. Следовательно, увеличение степени турбулентности течения при низких энергиях зажигания могло бы способствовать более быстрому ускорению пламени и снижению энергии иницирования детонации.

В четвертой серии опытов использовали трубу диаметром 28 мм и два разрядника, Р1 и Р2, с $\tau = (50 \pm 5)$ мкс. Для повышения степени турбулентности течения между разрядниками устанавливали спираль Щелкина длиной 460 мм, свитую из стальной проволоки диаметром 4 мм с шагом 18 мм. На рис. 7 показана схема трубы.

Емкость конденсатора C_1 уменьшили до 25 мкФ, а емкость конденсатора C_2 оставили прежней –

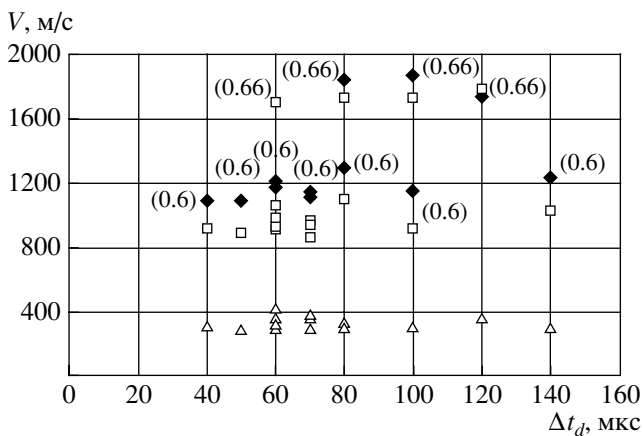


Рис. 8. “Полуостров” детонации для распыла жидкого н-гексана в воздухе в трубе диаметром 28 мм со спиралью Щелкина при инициировании двумя последовательными электрическими разрядами, создаваемыми разрядниками P1 и P2. Числа в скобках соответствуют энергии E в кДж: \blacktriangle – ИБ1, \blacklozenge – ИБ2, \blacksquare – ИБ3.

225 мкФ. В опытах варьировали напряжение U и время задержки запуска второго разрядника Δt_d по отношению к времени прихода первичной УВ на специальный зонд, установленный в секции со спиралью на расстоянии 90 мм от второго разрядника. Использование спирали позволило уменьшить энергию инициирования детонации до значения $E = 0.66$ кДж, что в 5 раз меньше, чем минимальная энергия инициирования детонации одиночным разрядом в трубе диаметром 51 мм. В опытах со спиралью детонация возникала при $60 < \Delta t_d < 120$ мкс (рис. 8), т.е. ширина “полуострова” детонации в окрестности предела инициирования была значительно больше, чем в опытах без спирали. Это связано с тем, что в УВ, выходящей из спирали, профиль давления значительно отличается от профиля давления в УВ в опытах без спирали: он близок к ступенчатому, а не к треугольному профилю. Следовательно, спираль существенно снижает требования к точности синхронизации запуска второго разряда с приходом первичной УВ.

3.5 Иницирование гетерогенной детонации одним и двумя разрядами в трубе предельного диаметра со спиралью Щелкина и витком трубы

На рис. 9 показана схема экспериментальной установки, в которой достигнута минимальная энергия инициирования детонации капельных н-гексано- и н-гептановоздушных смесей – 30 Дж. В этой установке для дальнейшего усиления полученной УВ за секцией со спиралью Щелкина установили новый элемент – виток трубы. Установка состоит из форсунки, разрядной камеры, двух электрических разрядников – P1 и P2, спирали Щелкина, витка трубы, специального зонда, двух конусных переходников и основной трубы диаметром 51 мм. Зонд представлял собой два стальных электрода, выдвинутых перпендикулярно стенке до оси трубы. Расстояние между электродами – 3 мм. Схема питания зонда позволяла регистрировать момент прохождения УВ через зазор между электродами и подавать запускающий сигнал на разрядник P2. Пьезоэлектрические датчики давления Д1–Д5 использовались для регистрации профилей волн давления в трубе и для определения скорости распространения этих волн. Ожидалось, что наличие криволинейных отражающих поверхностей в витке трубы может привести к газодинамической “фокусировке” УВ и возникновению детонации. Отметим, что фокусирующее действие витков взрывных труб в реагирующих средах до сих пор не исследовалось, хотя явление фокусировки УВ в прямых трубах при отражении от неплоской торцевой стенки известно давно [18].

Сначала провели серию опытов с одним разрядником, P1. На рис. 10 приведены записи давления, зарегистрированные датчиками Д1–Д5 при энергии зажигания $E_1 = 32$ Дж. В отличие от опытов в прямой трубе, здесь на выходе из витка (датчик Д2) 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 основную трубу, распространяясь со скоростью (1750 ± 20) м/с.

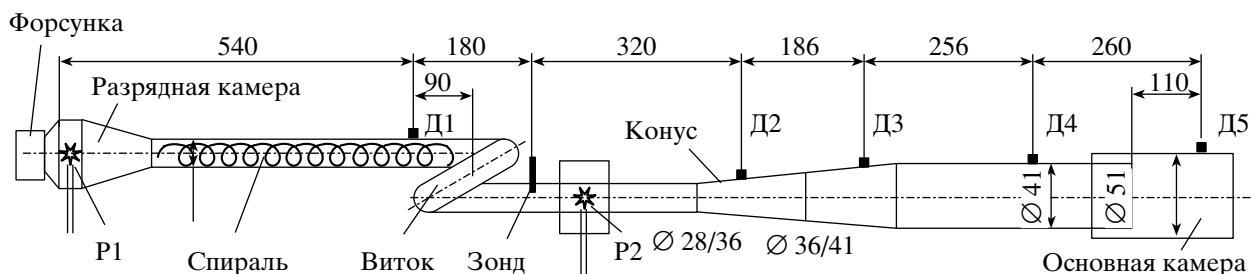


Рис. 9. Схема взрывной трубы диаметром 28 мм с витком, спиралью Щелкина, двумя разрядниками – P1 и P2 и переходным участком к трубе диаметром 51 мм.

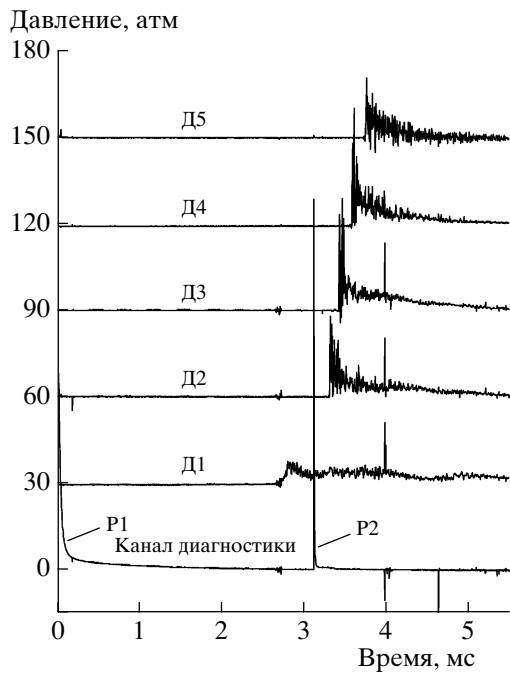


Рис. 10. Записи давления в опыте с капельной н-гексано-воздушной смесью при использовании одного разрядника, P1, на установке, схема которой показана на рис. 9.

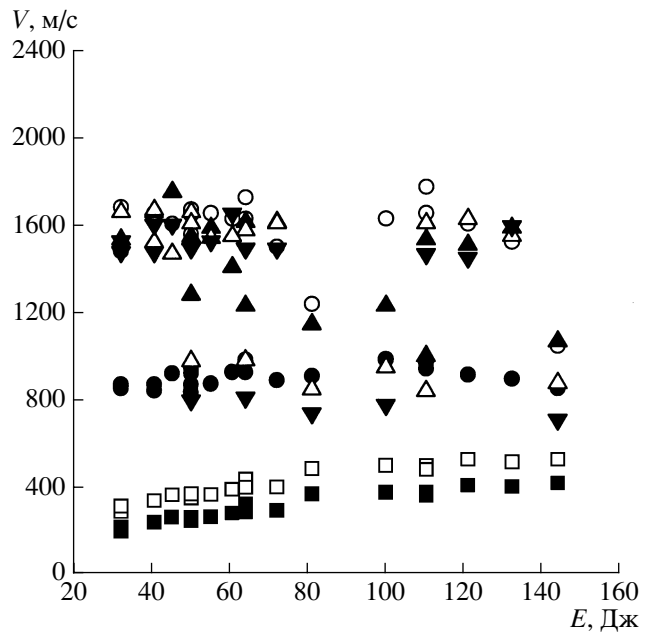


Рис. 11. Результаты измерений скорости УВ в капельной н-гексановоздушной смеси на разных измерительных базах в трубе, изображенной на рис. 9, в зависимости от энергии зажигания разрядника P1; ■ – P1–Д1, □ – P1–Зонд, ● – Д1–Зонд, ○ – Зонд–Д2, ▲ – Д2–Д3, △ – Д3–Д4, ▼ – Д4–Д5.

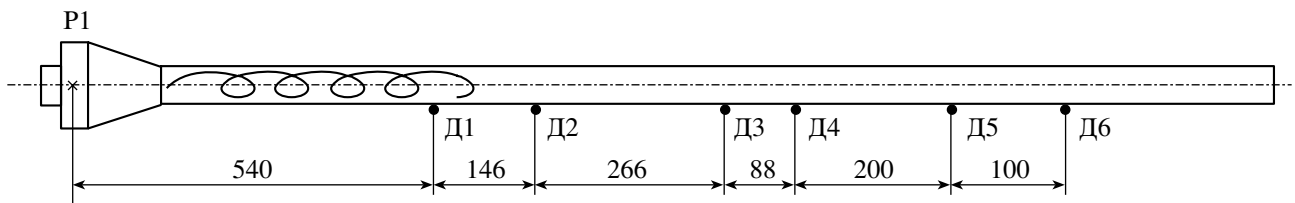


Рис. 12. Схема взрывной трубы диаметром 28 мм с одним разрядником, P1, и спиралью Щелкина.

На рис. 11 приведены результаты измерений скорости волн давления V в этой серии опытов на разных измерительных базах: между разрядником P1 и датчиком Д1 (P1–Д1), между разрядником P1 и зондом (P1–Зонд), между датчиком Д1 и зондом (Д1–Зонд), между зондом и датчиком Д2 (Зонд–Д2), между датчиками Д2 и Д3 (Д2–Д3), между датчиками Д3 и Д4 (Д3–Д4) и между датчиками Д4 и Д5 (Д4–Д5).

При энергиях зажигания от 30 до 50 Дж детонация на выходе из витка возникала с высокой повторяемостью и всегда переходила в основную трубу. При энергиях зажигания от 50 до 130 Дж детонация не всегда переходила в основную трубу. При энергиях зажигания от 130 до 300 Дж детонацию не наблюдали. Аналогичные результаты получены для капельных н-гептановоздушных смесей. Эффекты, наблюдаемые в трубе с витком, по-видимому, связаны с тем, что при от-

носительно высоких значениях E_1 кумулирующая волна давления (по терминологии Щелкина [17]) образуется за пределами витка. Опыты в трубе без витка (см. рис. 12) показали, что при $E = 30\text{--}80$ Дж из спирали Щелкина выходит УВ со скоростью 800–850 м/с (рис. 13).

Установка второго разрядника в трубе, схема которой приведена на рис. 9, позволила обеспечить высокую повторяемость опытов с инициированием детонации в широком диапазоне энергий инициирования – от 30 до 200 Дж. Например, на рис. 14 приведены записи давления, зарегистрированные датчиками Д1–Д5 в опыте с инициированием ДВ при энергии зажигания $E = 135$ Дж ($C_1 = 50$ мкФ, $C_2 = 25$ мкФ, $U = 1900$ В и $\Delta t_d = 80$ мкс). В дополнение к осциллограммам давления на рис. 14 приведены запись канала диагностики и запись напряжения U на разряднике P2. Детонация возникает за вторым разрядником, переходит в тру-

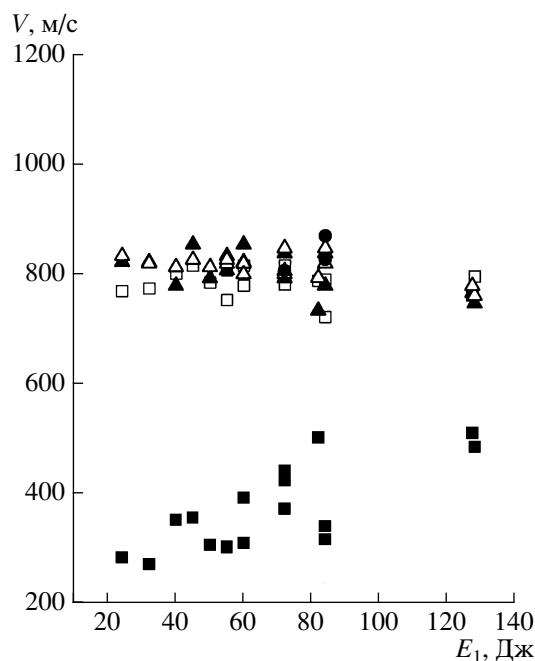


Рис. 13. Результаты измерений скорости УВ в капельной н-гексановоздушной смеси на разных измерительных базах в трубе, изображенной на рис. 12, в зависимости от энергии зажигания разрядника P1; ■ – P1–Д1, □ – Д2–Д3, ▲ – Д3–Д4, △ – Д4–Д5, ● – Д5–Д6.

бу диаметром 41 мм, а затем и в основную трубу, распространяясь со скоростью (1760 ± 20) м/с.

Конструктивные изменения в схеме рис. 9 (изменение формы разрядной камеры, длины спирали, формы витка, длины участка трубы от конца спирали до витка и даже длины участка трубы до конусного переходника) приводили к изменению наблюдаемой динамики взрыва. Высокая повторяемость опытов с возбуждением детонации в витке стала возможной благодаря тщательной доводке конструкции установки.

Таким образом, замена прямой взрывной трубы диаметром 51 мм (рис. 1) на комбинированную трубу, изображенную на рис. 9, позволила снизить энергию инициирования детонации капельных н-гексановоздушных и н-гептановоздушных смесей более чем в 100 раз: с 3300 до 30 Дж. В опытах с витком электрический разряд служил источником зажигания смеси, а не источником сильной инициирующей УВ. Следовательно, нами впервые зарегистрирован ПГД в капельных смесях углеводородного топлива с воздухом. Длина преддетонационного участка в трубе диаметром 28 мм оказалась близкой к 1 м, т.е. к 36 калибрам трубы, а полная длина трубы до перехода в основную трубу диаметром 51 мм составила 1.8 м. Для сравнения отметим, что ПГД в газовой пропановоздушной смеси требует не менее 260 калибров в случае прямой гладкой трубы и более 60 калиб-

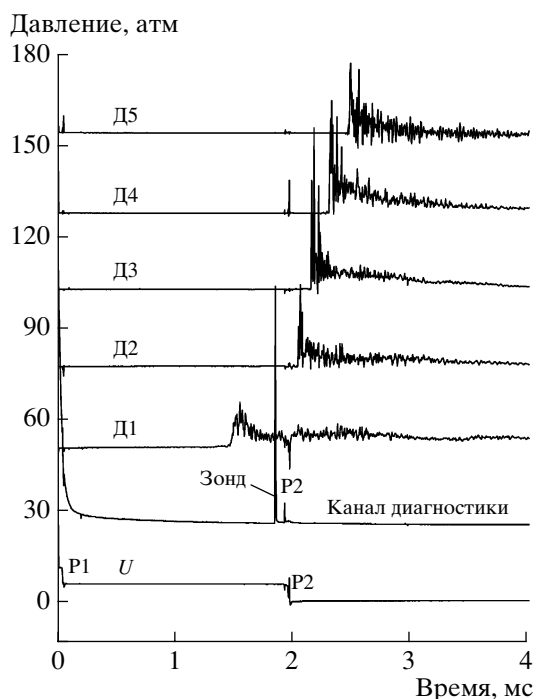


Рис. 14. Записи давления в опыте с капельной н-гексановоздушной смесью при использовании двух разрядников, P1 и P2, на установке, показанной на рис. 9.

ров в случае прямой трубы с турбулизаторами в виде регулярных препятствий [15].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе предложены и экспериментально продемонстрированы три новых метода инициирования детонации в распылах жидкого топлива в воздухе: 1) инициирование детонации в гладкой трубе двумя последовательными электрическими разрядами; 2) двухстадийное инициирование детонации, совмещающее классический метод спирали Щелкина с идеей внешнего стимулирования взрыва во фронте бегущей УВ; 3) комбинированное инициирование с газодинамической фокусировкой слабой УВ с помощью витков труб. Эти методы дополняют известные методы – прямое инициирование ДВ и ПГД – и включают (как основной элемент) принудительное зажигание горючей смеси в окрестности фронта относительно слабой первичной УВ. При таком “синхронизированном” зажигании обеспечиваются быстрое сгорание смеси и трансформация первичной УВ в ДВ. Детонация возникает на коротких расстояниях, причем энергия инициирования оказывается значительно меньше, чем при прямом инициировании одним разрядом. Использование трубы околопредельного диаметра, спирали Щелкина и витка снижает требуемые энер-

гетические затраты и расширяет пределы инициирования детонации.

Работа выполнена при поддержке Международным научно-техническим центром (проект № 2740).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С.М. // Тяжелое машиностроение. 2003. № 9. С. 19.
2. Roy G.D., Frolov S.M., Borisov A.A., Netzer D.W. // Progress in Energy and Combust. Sciences. 2004. V. 30. № 6. P. 545.
3. Фролов С.М., Барыкин А.Е., Борисов А.А. // Хим. физика. 2004. Т. 23. № 3. С. 17.
4. Dabora E.K. // Dynamics of Detonations and Explosions: Detonations / Eds. Kuhl A.L., Leyer J.-C., Borisov A.A., Sirignano W.A. V. 133. Progress in Astronautics and Aeronautics Ser. New York: AIAA Inc., 1991. P. 311.
5. Brophy C.M., Netzer D.W., Sinibaldi J., Jonson R. // High-Speed Deflagration and Detonation: Fundamentals and Control / Eds. Roy G., Frolov S., Netzer D., Borisov A. Moscow: Elex-KM Publ., 2001. P. 207.
6. Dabora E.K., Ragland K.W., Nicholls J.A. // Astronautica Acta. 1966. V. 12. № 1. P. 9.
7. Benedick W.B., Tieszen S.R., Knystautas R., Lee J.H.S. // Dynamics of Detonations and Explosions: Detonations / Eds. Kuhl A.L., Leyer J.-C., Borisov A.A., Sirignano W.A. V. 133. Progress in Astronautics and Aeronautics Ser. New York: AIAA Inc., 1991. P. 297.
8. Frolov S.M., Basevich V.Ya., Aksenov V.S., Polikhov V.S. // Confined Detonations and Pulse Detonation Engines / Eds. Roy G., Frolov S., Santoro R., Tsyganov S. Moscow: Torus Press, 2003. P. 157.
9. Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А. // ДАН. 2004. Т. 394. № 4. С. 503.
10. Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я. // ДАН. 2005. Т. 401. № 2. С.
11. Frolov S.M., Basevich V.Ya., Aksenov V.S., Polikhov V.S. // J. Propulsion and Power. 2005. V. 21. № 1. P. 54.
12. Pierce T.N., Nicholls J.A. // Astronautica Acta. 1972. V. 17. № 4–5. P. 703.
13. Зельдович Я.Б., Компанец А.С. Теория детонации. М.: Гостехтеориздат, 1955.
14. Frolov S.M., Basevich V.Ya., Aksenov V.S., Polikhov S.A. // J. Propulsion and Power. 2003. V. 19. № 4. P. 573.
15. Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А. // ДАН. 2004. Т. 394. № 2. С. 222.
16. Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А. // Хим. физика. 2004. Т. 23. № 4. С. 61.
17. Шелкин К.И. Быстрое горение и спиновая детонация газов. М.: Воениздат, 1949.
18. Sturtevant B., Kulkarny V.A. // J. Fluid Mechanics. 1976. V. 73. P. 651.