

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ
БЕГУЩИМ ИМПУЛЬСОМ ЗАЖИГАНИЯ

© 2004 г. С. М. Фролов, В. Я. Басевич, В. С. Аксенов, С. А. Полихов

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

Поступила в редакцию 02.06.2003

На примере стехиометрических газовых смесей $C_3H_8-(O_2 + 3N_2)$ и пропана с воздухом экспериментально доказано, что детонацию в гладкой трубе можно инициировать с помощью бегущего импульса зажигания, который формируется путем последовательного запуска нескольких источников зажигания с тщательно подобранными временами задержки. В проведенных экспериментах детонация возникала на длинах 0.6–0.7 м, равных 12–14 диаметрам трубы, и распространялась с постоянной скоростью на участке трубы длиной 0.9–0.8 м без дальнейшего воздействия разрядами. Обнаруженная высокая чувствительность процесса инициирования детонации к малым отклонениям времен запуска источников зажигания свидетельствует о резонансном характере явления. Суммарная энергия инициирования детонации, рассчитанная по номинальной емкости конденсаторов и напряжению на шине, оказалась ниже критической энергии прямого инициирования детонации одним зарядом ВВ. Предлагаемый метод инициирования детонации может применяться в перспективных импульсных детонационных двигателях летательных аппаратов.

ВВЕДЕНИЕ

По оценкам Я.Б. Зельдовича [1], реактивные двигатели, в которых используется детонационное сгорание топлива, должны быть термодинамически более эффективными, чем двигатели, работающие на медленном (дефлаграционном) сжигании топлива. В настоящее время активно изучается возможность сжигания топлива в периодически генерируемых детонационных волнах (ДВ) для создания реактивной тяги [2]. Одна из наиболее сложных проблем на пути создания импульсных детонационных двигателей – обеспечение условий для надежного инициирования ДВ в топливно-воздушных смесях на коротких расстояниях порядка одного метра.

Известно, что в ДВ имеется сильная взаимосвязь (“сцепление” по терминологии [3]) между лидирующей ударной волной (УВ) и экзотермическими химическими превращениями, индуцированными этой УВ в реагирующей среде. В данной работе предлагается метод инициирования детонации, основанный на необходимости обеспечения такого “сцепления” между УВ и энерговыделением. С фундаментальной точки зрения неважно, каким образом возникает быстрая экзотермическая реакция в ударно-сжатой взрывчатой смеси: самопроизвольно, вследствие химических превращений, индуцированных УВ, или за счет внешнего источника зажигания (ИЗ). В первом случае, ввиду высоких энергий активации химических реакций в воздушных смесях углеводородных топлив, для обеспечения “сцепления” необходимы УВ с достаточной высокими интенсивностью и

длительностью фазы сжатия. Такие УВ получают при взрывах зарядов конденсированного ВВ массой, превышающей 20–30 г. Во втором случае, чтобы стимулировать “сцепление”, предлагается использовать внешний ИЗ для искусственного возбуждения экзотермических реакций в ударно-сжатой взрывчатой смеси в непосредственной близости к ударному фронту. В этом случае исходная УВ может быть относительно слабой, а внешний ИЗ должен быть распределенным, чтобы обеспечивать периодическое или непрерывное “сцепление” между энерговыделением и распространяющейся УВ. Таким образом, во втором случае детонация инициируется бегущим импульсом зажигания.

Идея использования внешних ИЗ для возбуждения детонации впервые выдвинута Я.Б. Зельдовичем и А.С. Компанейцем [4]. Они рассмотрели задачу об инициировании газовой детонации с помощью принудительного зажигания распределенными внешними источниками, установленными вдоль канала с горючим газом. Если видимая скорость перемещения поджигающего импульса постоянна и равна скорости детонации в газе, в конечном итоге должна образоваться ДВ. Для моделирования движущегося источника зажигания авторы работ [5, 6] рассмотрели задачу о самовоспламенении в неоднородно прогретом горючем газе и в газе с неоднородным составом, подразумевая, что начальный градиент периода индукции самовоспламенения приведет к похожему эффекту. В самом деле, в [5, 6] доказано численными расчетами, что неоднородности температуры и состава в реагирующем газе, подготовлен-

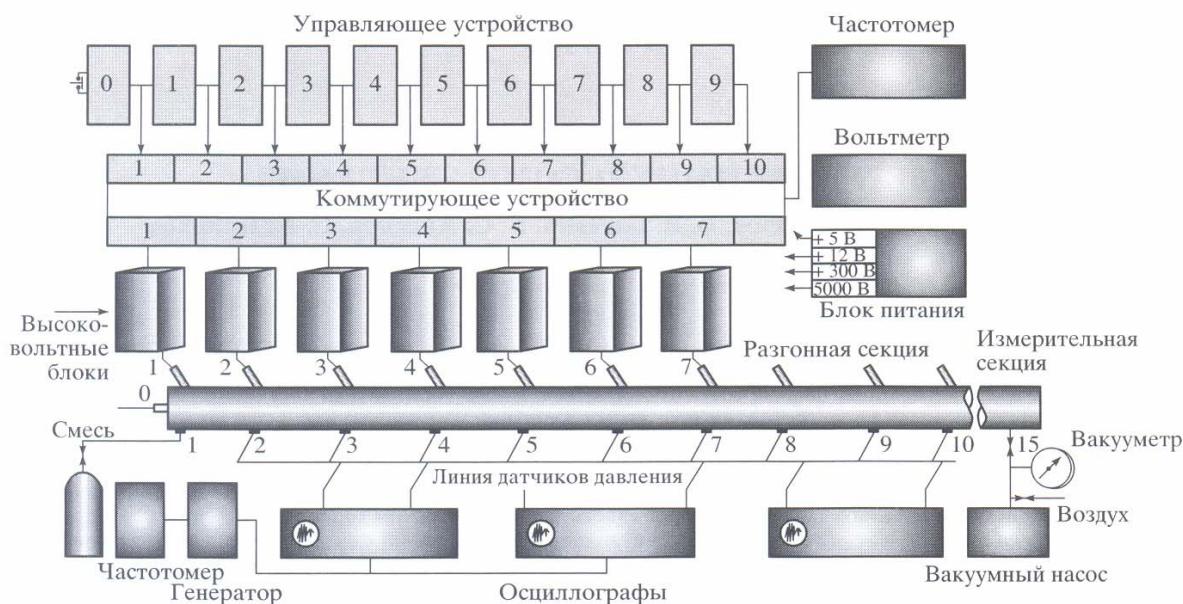


Рис. 1. Экспериментальная установка.

ном к самовоспламенению, могут приводить к самопроизвольному возбуждению детонации. В [7] путем одномерных газодинамических расчетов решали задачу о движении внешнего источника энерговыделения с постоянной скоростью в сжимаемом инертном газе. Показано, что скорость УВ, возникающей в газе, определяется скоростью движения источника. Скорость волны достигает максимального значения при скорости источника, приближающейся к характерной скорости детонации, вычисленной по удельному энерговыделению источника в расчете на единицу массы газа. Позднее в работе [8] эту задачу решали с учетом взаимного влияния интенсивности УВ и скорости энерговыделения. В [9] предложили механизм усиления УВ и дали ему специальное название – SWACER (аббревиатура: “усиление УВ вследствие когерентного энерговыделения”). С помощью этого механизма предприняли попытку объяснить экспериментальные наблюдения по фотохимическому инициированию детонации [10], возбуждению детонации горячей турбулентной струей [11], а также явление “взрыва во взрыве” [12] при переходе горения в детонацию. Среди недавних публикаций, связанных с дальнейшими обобщениями механизма, отметим работы [13, 14]. Несмотря на обширную литературу по рассматриваемой проблеме, прямых экспериментальных доказательств обсуждаемых идей и механизмов не существовало.

Цель данной работы – описание экспериментов по ускорению слабой УВ бегущим импульсом

зажигания, создаваемым распределенными внешними источниками в инертном и горючем газе.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1 показана экспериментальная установка. Основным элементом установки – закрытая с обоих концов детонационная труба внутренним диаметром 51 мм и длиной 1.5 м. Труба состоит из разгонной секции длиной 1 м и измерительной секции длиной 0.5 м. В торце разгонной секции (сечение 0 на рис. 1) размещен торцевой запускающий ИЗ. Начиная с сечения 1, отстоящего от торца на 26 мм, вдоль разгонной секции с шагом 100 мм (в сечениях 2, 3 и т.д.) под углом 45° установлены разгонные ИЗ. В сечении 1 установлен разрядник, запускаемый потоком разрядной плазмы от торцевого ИЗ (рис. 2). Запуск торцевого ИЗ и разрядника приводил к формированию первичной УВ. Для измерения динамики волновых процессов использовали пьезоэлектрические датчики давления и ионизационные зонды. Для датчиков и зондов вдоль всей трубы с шагом 100 мм предусмотрены гнезда, причем в разгонной секции эти гнезда размещены в одном сечении с ИЗ.

В экспериментах использовали три типа ИЗ, отличающиеся интенсивностью и длительностью зажигающего импульса (рис. 3). Источник зажигания I-го типа – форкамера с разрядником и сменными соплами разного диаметра, соединяемыми форкамеру с разгонной секцией. Объем форкамеры варьировали от 5 до 15 см³. Источник зажигания II-го типа – коаксиальный разрядник с

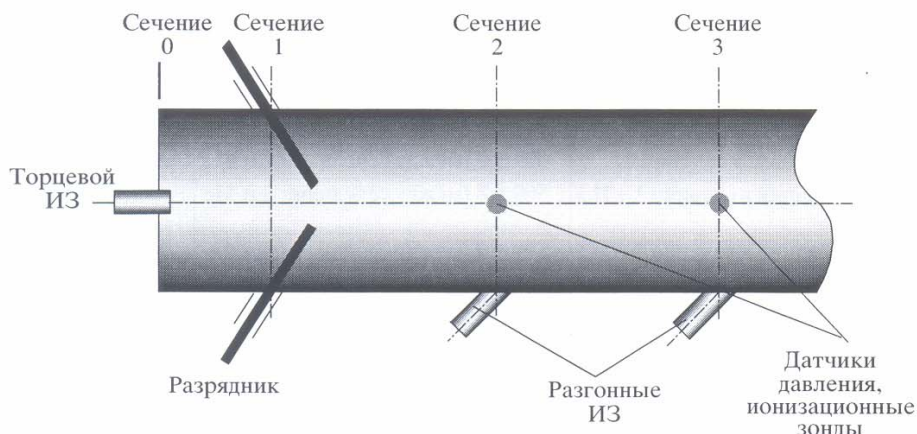


Рис. 2. Расположение источников зажигания в детонационной трубе.

центральный медным электродом и изолированным внешним медным цилиндром с разрядным промежутком 1.5 мм. Источник зажигания III-го типа также выполнен в виде коаксиального разрядника, но с большим разрядным промежутком (до 2.5 мм). В отличие от ИЗ первого типа ИЗ второго и третьего типов выступали внутрь разгонной секции трубы на расстояние 15 мм от ближайшей стенки. Электропитание каждого ИЗ включало индивидуальный высоковольтный конденсатор. Номинальная емкость конденсатора была кратной 100 мкФ. Время срабатывания каждого ИЗ управлялось специальным многоканальным управляющим устройством. Управляющее устройство генерировало сигналы, запускающие последовательное срабатывание ИЗ в соответствии с заранее установленными временными задержками. Временную задержку варьировали в пределах от 0 до 500 мкс. Энергию электрических разрядов варьировали, изменяя напряжение на шине батареи конденсаторов, которое было одинаковым для всех ИЗ. Использовали следующие значения напряжения: 1500, 2100, 2300 и 2500 В. Длительность зажигающего импульса форкамерных ИЗ определялась диаметром сопла форкамеры (2, 4, и 8 мм) и достигала нескольких миллисекунд для наименьшего сопла. Длительность зажигающего импульса для ИЗ второго и третьего типов оценивали как 100 мкс (рис. 4). Высоковольтные цепи тщательно экранировали для предотвращения электромагнитных наводок на измерительную систему. Система диагностики включала осциллографы, частотомеры и персональный компьютер.

Все эксперименты проводили при давлении и температуре исследуемых газов 0.1 МПа и 292–297 К, соответственно. В качестве исследуемых газов использовали: 1) воздух, 2) стехиометрическую смесь пропана с воздухом, обогащенным кислородом ($C_3H_8-(O_2 + 3N_2)$), и 3) стехиометрическую

пропановоздушную смесь ($C_3H_8-(O_2 + 3.76N_2)$). Смеси подготавливали в смесителе и держали в 10-литровых баллонах под давлением не менее 24 ч до начала эксперимента.

Процедура подготовки и проведения экспериментов включала несколько этапов, связанных с необходимостью настройки управляющего устройства для осуществления последовательного запуска нескольких ИЗ с заранее заданной оптимальной задержкой по времени. Цель настройки – путем систематического подбора времени запуска каждого ИЗ получить в разгонной секции УВ наибольшей интенсивности.

Трубу вакуумировали и заполняли исследуемым газом. После срабатывания торцевого ИЗ и разрядника в сечении 1 скорость образованной УВ рассчитывали по записям датчиков давления,

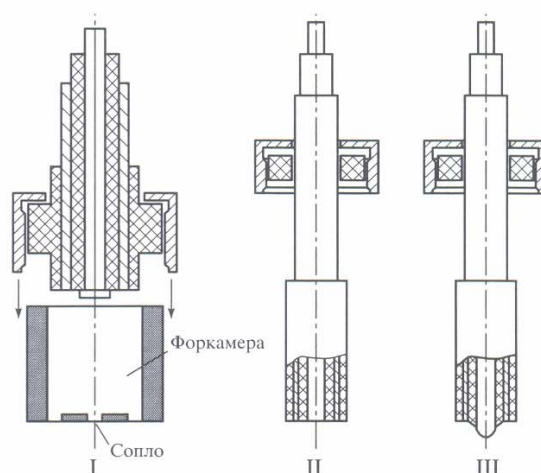


Рис. 3. Три типа источников зажигания.

Таблица 1. Измеренные скорости УВ в воздухе на разных измерительных базах при оптимальных временах запуска разгонных ИЗ третьего типа. Напряжение на конденсаторах – 2500 В

Количество конденсаторов (100 мкФ)	Скорость, м / с	Скорость между сечениями 11 и 14 (300 мм), м/с
3 (торцевой ИЗ + разрядник в сечении 1)	609 ± 9 (между сечениями 2 и 4)	468 ± 7
4 (торцевой ИЗ + разрядник в сечении 1 + ИЗ в сечении 2)	560 ± 8 (между сечениями 3 и 5)	460 ± 7
5 (торцевой ИЗ + разрядник в сечении 1 + ИЗ в сечениях 2 и 3)	579 ± 9 (между сечениями 4 и 6)	489 ± 7
6 (торцевой ИЗ + разрядник в сечении 1 + ИЗ в сечениях 2, 3 и 4)	569 ± 8 (между сечениями 5 и 7)	494 ± 7
7 (торцевой ИЗ + разрядник в сечении 1 + ИЗ в сечениях 2, 3, 4 и 5)	540 ± 8 (между сечениями 6 и 8)	490 ± 7

установленных в сечениях 2 и 4. На основе полученного значения скорости УВ оценивали время задержки запуска разгонного ИЗ в сечении 2 для следующего опыта. Это время устанавливали в управляющем устройстве. В следующем опыте последовательно запускали торцевой ИЗ, разрядник в сечении 1 и разгонный ИЗ в сечении 2. Используя датчики давления в сечениях 3 и 5, определяли скорость образованной УВ. В последующих опытах варьировали время задержки запуска разгонного ИЗ в сечении 2, добиваясь наибольшей скорости УВ на измерительной базе между сечениями 3 и 5.

Следующий этап настройки – определение оптимальной задержки запуска разгонного ИЗ в сечении 3, такого, чтобы скорость УВ на измерительной базе между сечениями 4 и 6 была максимальной при последовательном срабатывании торцевого ИЗ, разрядника в сечении 1 и разгонных ИЗ в сечениях 2 и 3 при фиксированном оптимальном времени задержки разгонного ИЗ в сечении 2. Процедуру настройки заканчивали, когда для всех установленных разгонных ИЗ были определены времена запуска, обеспечивающие максимальное ускорение УВ в разгонной секции. В некоторых случаях для определения оптимального времени задержки запуска разгонных ИЗ использовали информа-

цию, получаемую из измеряемых профилей давления в УВ.

На каждой стадии описанной процедуры выполняли несколько опытов, чтобы получить статистику воспроизводимости результатов. Управляющее устройство обеспечивало удовлетворительную воспроизводимость результатов измерений как в опытах с воздухом, так и в опытах с горючим газом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Распространение ударных волн в воздухе

В табл. 1 показаны результаты экспериментов по распространению УВ в воздухе при напряжении на конденсаторах 2500 В и оптимальных задержках срабатывания разгонных ИЗ в сечениях от 2 до 5 включительно. Емкость конденсатора торцевого ИЗ – 100 мкФ, разрядника в сечении 1 – 200 мкФ, всех разгонных ИЗ – 100 мкФ. Видно, что последовательное срабатывание ИЗ приводит к поддержанию скорости УВ на приблизительно постоянном уровне в 540–580 м/с. В конце измерительной секции, между сечениями 11 и 14, скорость УВ падает до 460–490 м/с. Снижение напряжения до 1500 В приводит к уменьшению скорости УВ в разгонной секции до 400–490 м/с и дальнейшему ее уменьшению между сечениями 11 и 14 до 360–440 м/с. При заданных параметрах экспериментальной установки ускорения УВ в воздухе не наблюдали.

Эксперименты по ускорению ударной волны в смеси $C_3H_8-(O_2 + 3N_2)$

На рис. 5 показана пространственно-временная диаграмма с результатами опытов по ускорению первичной УВ в стехиометрической смеси пропана с воздухом, обогащенным кислородом. В этих опытах напряжение на шине батареи конденсаторов – 2500 В. Емкость конденсатора торцевого ИЗ – 100 мкФ, разрядника в сечении 1 – 200 мкФ, всех разгонных ИЗ – 100 мкФ. Результаты отно-

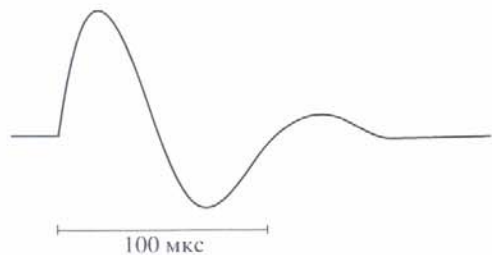


Рис. 4. Разрядный ток, измеренный с помощью пояса Роговского.

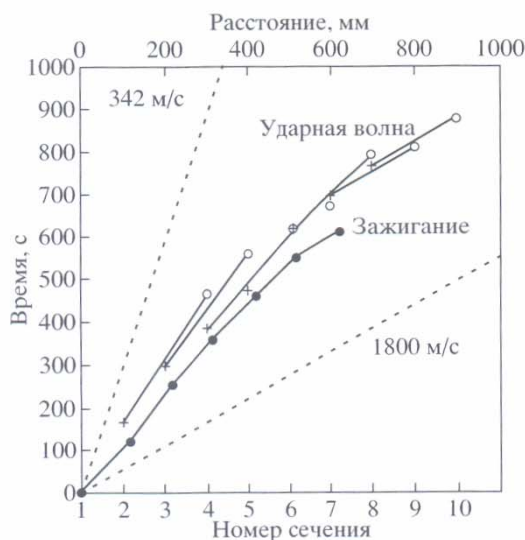


Рис. 5. Экспериментальная $x-t$ -диаграмма ускорения УВ в стехиометрической смеси $C_3H_8-(O_2 + 3N_2)$. Детонация возникает в сечении 7 или 8.

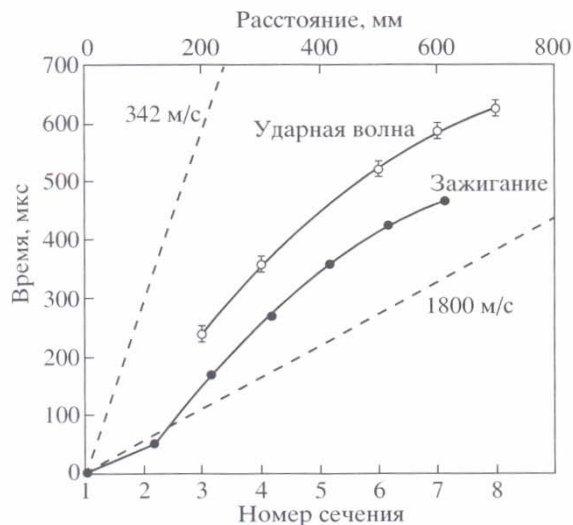


Рис. 6. Экспериментальная $x-t$ -диаграмма ускорения УВ в стехиометрической пропановоздушной смеси. Детонация возникает в сечении 7 или 8.

сятся к разгонным ИЗ третьего типа. Штриховые линии “342 м/с” и “1800 м/с” соответствуют характерным значениям скорости звука и скорости детонации Чепмена–Жуге в данной смеси. Черные кружки соответствуют найденным оптимальным значениям времени запуска шести ИЗ, установленных в разгонной секции. Светлые кружки на семи линиях обозначают измеренное время прихода УВ в соответствующее сечение. Указанные линии – экспериментальные $x-t$ -диаграммы распространения УВ, образованных всеми ИЗ, расположенными до сечения, обозначенного крестиками. Эти линии построены для разных экспериментов. Из рис. 5 видно, что в разгонной секции при последовательном срабатывании шести разгонных ИЗ в одном опыте, начиная с сечения 7 или 8 (на расстоянии 0.6–0.7 м от разрядника), возникает ДВ с характерной скоростью распространения (1770 ± 25) м/с, близкой к скорости детонации Чепмена–Жуге. Возникающая волна распространяется с такой скоростью (постоянной) до конца измерительной секции без дальнейшего воз-

действия разрядами, о чем свидетельствуют записи датчиков давления и ионизационных зондов, расположенных в сечениях 11–14.

Изменение времени запуска (опережение или запаздывание) любого разгонного ИЗ на 40–50 мкс по сравнению с найденной оптимальной последовательностью приводило к срыву инициирования ДВ. Снижение напряжения от 2500 до 2100 В (табл. 2) также приводило к срыву инициирования ДВ в условиях экспериментов, относящихся к рис. 5.

Эксперименты по ускорению ударной волны в пропановоздушной смеси

На рис. 6 показана пространственно-временная диаграмма с результатами опытов по ускорению первичной УВ в стехиометрической пропановоздушной смеси. Напряжение на батарее конденсаторов – 2500 В. Применение результатов настройки управляющего устройства, полученных для смеси пропана с воздухом, обогащенным

Таблица 2. Влияние напряжения на ускорение УВ в стехиометрической смеси $C_3H_8-(O_2 + 3N_2)$. Измерительная база 1 – между сечениями 8 и 10. Измерительная база 2 – между сечениями 11 и 14. Источники зажигания третьего типа

Напряжение, В	Скорость, м/с		Количество конденсаторов (100 мкФ)	Примечание
	база 1	база 2		
2500	1767	1805	9	Детонация
2300	1606	1748	9	Околопредельная детонация
2100	565	648	9	Нет детонации

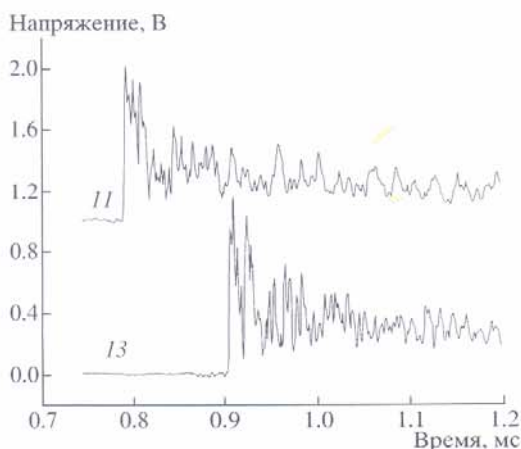


Рис. 7. Записи давления в сечениях 11 и 13 при инициировании детонации в стехиометрической пропановоздушной смеси бегущим импульсом зажигания.

кислородом (см. рис. 5), не привело к инициированию детонации. Поэтому всю процедуру настройки проводили заново. Для получения более сильной первичной УВ емкость конденсатора запускающего ИЗ увеличили до 200 мкФ, а емкость конденсатора разрядника в сечении 1 – до 400 мкФ. Как и на рис. 5, черные кружки на рис. 6 соответствуют найденным оптимальным значениям времени запуска разгонных ИЗ, а светлые кружки – измеренному времени прихода УВ в соответствующее сечение. Видно, что при последовательном срабатывании шести разгонных ИЗ в одном опыте, начиная с сечения 7 или 8 (на расстоянии 0.6–0.7 м от разрядника), в разгонной секции возникает ДВ. Она распространяется со скоростью 1700–1800 м/с в измерительной секции, о чем свидетельствуют записи датчиков давления и ионизационных зондов. Например, на рис. 7 показаны записи давления на датчиках в сечениях 11 и 13, из которых следует, что средняя скорость взрывной волны на этой измерительной базе (200 мм) равна (1745 ± 25) м/с.

Чтобы исследовать чувствительность процесса к малым отклонениям времени задержки запуска разгонных ИЗ, провели специальную серию опытов. Так, запуск ИЗ в сечении 4 с задержкой 320 мкс вместо оптимального значения 270 мкс (см. рис. 6) приводил к срыву инициирования ДВ при прочих равных условиях. Такой же результат получен при отклонении времени запуска других разгонных ИЗ на 50 мкс от соответствующего оптимального значения. Это свидетельствует о резонансном характере процесса.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, экспериментально доказано, что детонацию в горючем газе можно инициировать с помощью бегущего импульса зажигания, который формируется путем последовательного запуска нескольких ИЗ с тщательно подобранными временами задержки. Такой способ инициирования детонации существенно отличается от традиционных способов – прямого инициирования или перехода горения в детонацию. При прямом инициировании одним источником детонация возникает после стадии ослабления очень сильной первичной УВ, поэтому большая доля энергии инициатора и горючего газа расходуется нецелесообразным образом – на сжатие, нагрев и термическое разложение продуктов реакции за УВ. Расстояние, необходимое для возникновения самоподдерживающегося плоского фронта детонации пропановоздушной смеси, составляет 1.0–1.5 м [15]. При переходе горения в детонацию необходимо, чтобы пламя ускорилось до видимой скорости порядка 1000 м/с. В случае пропановоздушной смеси для этого надо иметь гладкую трубу длиной более 260 диаметров [16] или трубу с турбулизаторами в виде регулярных препятствий длиной более 60 диаметров [17]. Часть энергии при таком инициировании детонации также расходуется нецелесообразным образом – идет на сжатие и нагрев большого объема продуктов сгорания.

При использовании бегущего импульса зажигания обеспечивается целевая подача энергии горючего газа во фронт УВ, которая быстро усиливается и достигает интенсивностей, достаточных для возбуждения детонации. Для получения детонации на кратчайших расстояниях поджигающий импульс должен перемещаться с ускорением. В проведенных экспериментах ДВ возникла на длинах 0.6–0.7 м, равных 12–14 диаметрам трубы. Первичная УВ была относительно слабой – имела скорость (между сечениями 2 и 4) около $M = 2.0$ –2.5. Суммарная номинальная энергия электрических разрядов для условий рис. 6 равна 1.68 МДж/м², что меньше значения 3 МДж/м², приведенного в [15] для критической энергии инициирования детонации плоским зарядом ВВ. Учитывая, что эффективность преобразования электрической энергии разряда в энергию УВ мала по сравнению с эффективностью ВВ и обычно составляет около 10% [18], реальное значение суммарной критической энергии инициирования детонации оказывается значительно меньшим.

Из рис. 5 и 6 следует, что для получения ДВ необходимо было запускать разгонные ИЗ с некоторым опережением по отношению к времени прихода УВ в соответствующее сечение трубы. Среднее требуемое опережение зажигания составило 80–100 мкс, что коррелирует с характерной продолжительностью разрядного тока (см. рис. 4). В смеси

$C_3H_8-(O_2 + 3N_2)$ запуск каждого последующего ИЗ в сечениях от 2-го до 5-го приводил к возрастанию скорости УВ на 80–140 м/с со скачком скорости около 600 м/с при запуске ИЗ в сечении 6. В пропановоздушной смеси скорость УВ постепенно возрастала от (850 ± 12) до (1767 ± 25) м/с в результате последовательного запуска ИЗ в сечениях от 2-го до 7-го. Детонацию получали лишь в опытах с ИЗ второго и третьего типов. Во всех опытах с форкамерными ИЗ детонация не возникла, что, по-видимому, связано с относительно длительным временем зажигания и горения горючих смесей.

На основе результатов опытов можно сделать три вывода, позволяющих рассматривать описанный способ инициирования ДВ перспективным для применения в импульсных детонационных двигателях. Во-первых, он обеспечивает приемлемые расстояния до появления ДВ в гладкой трубе. Во-вторых, энергия каждого отдельного источника зажигания много меньше критической энергии, требуемой для прямого инициирования детонации одним источником. В-третьих, получаемая суммарная энергия источников зажигания оказывается значительно меньше критической энергии прямого инициирования детонации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые получено прямое экспериментальное доказательство идеи Я.Б. Зельдовича и А.С. Компанейца о возможности инициирования газовой детонации с помощью зажигания распределенными внешними источниками, установленными вдоль канала с горючим газом. На примере стехиометрических газовых смесей $C_3H_8-(O_2 + 3N_2)$ и пропана с воздухом экспериментально доказано, что детонацию в гладкой трубе можно инициировать с помощью бегущего импульса зажигания, который формируется путем последовательного запуска нескольких источников зажигания с тщательно подобранными временами задержки. В отличие от традиционных способов инициирования детонации (прямое инициирование или переход горения в детонацию) бегущий импульс зажигания обеспечивает целевую подачу энергии взрывчатой смеси во фронт УВ, которая быстро усиливается и достигает интенсивностей, достаточных для возбуждения детонации. В проведенных экспериментах детонация возникала на длинах 0,6–0,7 м, равных 12–14 диаметрам трубы, и распространялась с постоянной скоростью на участке трубы длиной 0,9–0,8 м без дальнейшего воздействия разрядами. Обнаруженная высокая чувствительность процесса инициирования детонации к малым отклонениям времен запуска источников зажигания свидетельствует о резонансном характере явления. Суммарная энергия инициирования детонации, рассчитанная по номинальной емкост-

ти конденсаторов и напряжению на шине, оказалась ниже критической энергии прямого инициирования детонации одним зарядом ВВ.

Инициирование детонации бегущим импульсом принудительного зажигания может применяться в перспективных импульсных детонационных двигателях летательных аппаратов.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 02-03-04005) и Федеральной целевой программой "Интеграция" (проект А0030).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зельдович Я.Б. // ЖТФ. 1940. Т. 10. № 17. С. 1453.
2. Фролов С.М. // Тяжелое машиностроение. 2003. № 9. С. 19.
3. Гельфанд Б.Е., Фролов С.М., Цыганов С.А. // Хим. физика. 1989. Т. 8. № 5. С. 655.
4. Зельдович Я.Б., Компанейц А.С. Теория детонации. М.: Гостехтеориздат, 1955.
5. Зельдович Я.Б., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М., Сиващинский Г.И. // ЖПМТФ. 1970. № 2. С. 76.
6. Zel'dovich Ya.B., Gelfand B.E., Tsyganov S.A., Frolov S.M., Polenov A.N. // Dynamics of Explosions / Eds. Kuhl A., Bowen J.R., Leyer J.-C., Borisov A.A. V. 114. Progress in Astronautics and Aeronautics Ser. New York: AIAA Inc., 1988. P. 99.
7. Thibault P.A., Yoshikawa N., Lee J.H.S. // Proc. 1978 Fall Technical Meeting of the Eastern Section of the Combustion Institute. Miami Beach, FL., 1978. P. 1.
8. Yoshikawa N., Thibault P.A., Lee J.H.S. // Proc. 1979 Spring Technical Meeting of the Canadian Section of the Combustion Institute. Kingston, Ontario, 1979. P. 1.
9. Lee J.H.S., Moen I.O. // Progress in Energy and Combustion Sciences. 1980. V. 6. № 4. P. 359.
10. Lee J.H., Knystautas R., Yoshikawa N. // Acta Astronautica. 1978. V. 5. P. 971.
11. Knystautas R., Lee J.H., Moen I.O., Wagner H.-Gg. // Proc. 17th Symp. (Intern.) on Combust. Pittsburgh, PA.: The Combust. Inst., 1979. P. 1235.
12. Oppenheim A.K. Introduction to Gasdynamics of Explosions / Courses and Lectures. № 48. Wien-New York: International Center for Mechanical Sciences, Springer-Verlag, 1972.
13. Shepherd J.E., Lee J.H.S. // Major Research Topics in Combustion / Eds. Hussaini M.Y., Kumar A., Voigt R.G. New York: Springer-Verlag, 1992. P. 439.
14. Khokhlov A.M., Oran E.S., Wheeler J.C. // Combust. and Flame. 1997. V. 108. P. 503.
15. Borisov A.A. // Gaseous and Heterogeneous Detonations: Science to Applications / Eds. Roy G.D., Frolov S.M., Kailasanath K., Smirnov N.N. Moscow: ENAS Publ., 1999. P. 3.
16. Veysiere B., Kerampran S., Proust C., Gilles S. // Proc. 19th ICDERS. 2003. Hakone, Japan: Aoyama Gakuin Univ. Paper#154 (CD ROM ISBN 4-9901744-1-0).
17. Santoro R.J., Lee S.-Y., Conrad C. et al. // Advances in Confined Detonations / Eds. Roy G.D., Frolov S.M., Santoro R.J., Tsyganov S.A. M.: Torus Press, 2002. P. 243.
18. Nettleton M.A. Gaseous Detonations: Their Nature, Effects and Control. London-New York: Chapman and Hall, 1987.