

БЫСТРЫЙ ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ

© 2008 г. С. М. Фролов

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

Поступила в редакцию 13.04.2008 г.

Представлен обзор исследований явления быстрого перехода горения в детонацию (ПГД) в газовых и капельных топливно-воздушных взрывчатых смесях. Под быстрым ПГД подразумевается процесс возникновения детонации, при котором турбулентное пламя разгоняется до значительно меньшей скорости, чем скорость, требуемая для классического ПГД в прямой трубе с гладкими или шероховатыми стенками. Основная цель исследований – определить условия, при которых возможен быстрый ПГД в слабочувствительных взрывчатых смесях при очень низких энергиях зажигания. Приведены примеры быстрого ПГД, которые проверены экспериментально и с помощью многомерных численных расчетов. Среди них – следующие ПГД: 1) на участке трубы с регулярными препятствиями специальной формы, 2) в витках труб и 3) в трубах с U-образными поворотами. Во всех случаях быстрый ПГД происходит благодаря образованию распределенных очагов зажигания при отражениях бегущей ударной волны, образованной ускоряющимся пламенем. Показано, что при использовании разных комбинаций отражающих элементов возможен быстрый ПГД в воздушной смеси авиационного керосина при энергии зажигания на уровне 5 Дж.

ВВЕДЕНИЕ

Классический механизм перехода горения в детонацию (ПГД) в прямой гладкой трубе включает несколько стадий [1, 2], а именно: 1) вынужденное зажигание смеси с образованием ламинарного пламени, 2) прогрессирующее увеличение скорости горения вследствие проявления неустойчивости и последующей турбулизации течения перед фронтом пламени, 3) образование и усиление ударной волны (УВ) перед ускоряющимся фронтом пламени и 4) самовоспламенение ударно-сжатой смеси в области между УВ и фронтом пламени [3] (“взрыв во взрыве” [4]), приводящее к образованию пересжатой детонационной волны (ДВ), а затем и 5) самоподдерживающейся детонации Чепмена–Жуге (ЧЖ). Известно, что время и расстояние ПГД определяются главным образом первыми тремя стадиями [5], а для возникновения детонации в воздушных смесях углеводородных топлив необходимо, чтобы “видимая” скорость турбулентного фронта пламени в лабораторной системе координат превышала 1000 м/с [6]. При такой скорости фронта пламени бегущая впереди УВ имеет скорость выше 1300 м/с (число Маха $УВ M \sim 3.8$), а давление и температура взрывчатой смеси за ней превышают соответственно 1.7 МПа и 1200 К.

В недавних работах [7–11], а также в обзорах [12, 13] предложен новый способ получения детонации в прямой гладкой трубе. Суть способа заключается в принудительном ускорении относительно слабой УВ, бегущей перед фронтом пламени, до интенсивности, достаточной для возникновения детонационного взрыва. Для этой цели в [7–12] вдоль

прямой гладкой трубы устанавливались распределенные источники зажигания. Чтобы исключить из рассмотрения плохо воспроизводимые три начальные стадии ПГД, первичную УВ получали либо с помощью электрического разряда [7–12], либо с помощью секции трубы со спиралью Щелкина [13, 14]. В опытах полученную УВ ускоряли, включая каждый последующий источник зажигания согласованно с ее приходом в соответствующее сечение трубы. Другими словами, УВ ускоряли, обеспечивая быстрое принудительное зажигание взрывчатой смеси в ближайшей окрестности бегущего ударного фронта. Такой прием позволил инициировать детонацию на расстоянии и за время, значительно меньшие по сравнению с классическим ПГД. В опытах [7–12] с инициированием детонации рассогласование между приходом УВ и зажиганием газа не превышало 100 мкс. При большем рассогласовании момента зажигания с приходом УВ при прочих равных условиях детонация не возникала. Интересно, что значение допустимого рассогласования сопоставимо с характерным временем реакции в ДВ на пределе детонации [15].

В опытах [7–12] детонацию стехиометрической пропановоздушной смеси получали в трубе диаметром 51 мм при начальной скорости УВ на уровне 800–1000 м/с (числа Маха $УВ M \sim 2.4–3.0$). Отметим, что для образования такой же УВ перед фронтом пламени последний должен ускориться до “видимой” скорости около 550–750 м/с. Эта скорость значительно меньше скорости пламени (~1000 м/с), необходимой для самопроизвольного ПГД. Следовательно, если предусмот-

реть возможность принудительного ускорения УВ перед фронтом пламени, можно значительно сократить длину и время ПГД, т.е. обеспечить “быстрый” ПГД. Далее под “быстрым” ПГД будем подразумевать процесс возникновения детонации в топливно-воздушной смеси, при котором турбулентное пламя разгоняется до скорости, значительно меньшей, чем скорость, требуемая для классического ПГД в прямой трубе. В [12] классический ПГД назван “медленным”, чтобы отличать его от быстрого ПГД. Новый способ инициирования детонации, исследуемый в [7–12], был назван в [7] “иницированием детонации бегущим импульсом принудительного зажигания”.

Перейдем от рассмотрения ПГД в прямой гладкой трубе к ПГД в трубе с регулярными препятствиями [2, 16]. Механизм ПГД в таких трубах во многом подобен механизму [1–6], описанному выше. Однако имеются и существенные различия. Во-первых, в трубе с препятствиями пламя ускоряется значительно быстрее вследствие дополнительной турбулизации свежей взрывчатой смеси при обтекании препятствий. Во-вторых, появляются новые возможности для воспламенения газа: газ может самовоспламениться при отражении УВ от препятствия или (в случае больших препятствий) вследствие смещения направленных струй горячих продуктов горения с холодной свежей смесью.

Возможность локального самовоспламенения свежей смеси при отражении УВ от препятствия наводит на мысль [12], что при ПГД в трубах с препятствиями принципиально возможен не только классический сценарий [1–6], но и сценарий инициирования детонации бегущим импульсом зажигания, но не принудительного, а самопроизвольного. В этом случае зажигание газа в окрестности УВ, бегущей перед фронтом пламени, происходит не за счет внешнего стимулирования химической активности, а благодаря самовоспламенению ударно-сжатого вещества при отражении УВ от препятствий. Другими словами, при ПГД в трубах с препятствиями имеется стадия процесса, на которой принципиально возможно быстрое инициирование детонации бегущим импульсом самопроизвольного зажигания (быстрый ПГД). При этом, как и в опытах с принудительным зажиганием [7–12], возможность быстрого ПГД определяется тем, насколько согласованы друг с другом момент прихода УВ в то или иное сечение трубы и момент зажигания газа в этом сечении. В рассматриваемом случае необходимо сравнивать момент прихода УВ на препятствие с моментом самовоспламенения газа за отраженной волной. Последний, как известно, характеризуется задержкой самовоспламенения.

Задержка самовоспламенения зависит от состава смеси, интенсивности бегущей УВ и дли-

тельности фазы сжатия в ней. Если исходить из допустимого уровня задержек самовоспламенения меньше 100 мкс при нормальном отражении длинной УВ от препятствий, то для осуществления быстрого ПГД в стехиометрической пропановоздушной смеси понадобится УВ, бегущая со скоростью 950–970 м/с (число Маха УВ $M \sim 2.8$) [17]. При ПГД такая волна образуется перед пламенем, распространяющимся со скоростью около 700 м/с. Давление и температура при отражении такой УВ от препятствия приблизительно равны 4.5 МПа и 1300 К. Полученное значение скорости УВ лежит в диапазоне скоростей УВ, используемых в опытах [7–12] по инициированию детонации бегущим импульсом принудительного зажигания. Следовательно, на той стадии ПГД в стехиометрической пропановоздушной смеси, когда скорость пламени еще не достигла ~ 700 м/с, предпосылки для быстрого ПГД нет. На этой стадии происходит прогрессирующее ускорение турбулентного пламени и усиление УВ благодаря взаимодействию с волнами сжатия, генерируемыми пламенем и отдельными очагами зажигания в окрестности препятствий. Когда же скорость пламени превысит ~ 700 м/с, а скорость ударной волны перед фронтом пламени, соответственно, превысит ~ 950 – 970 м/с, появляется теоретическая возможность быстрого ПГД.

Отметим, что в приведенных выше оценках не учитывались эффекты, вызванные расширением взрывчатой смеси в волнах разрежения, неизбежно возникающих при дифракции УВ на препятствиях. Эти эффекты, зависящие от формы препятствий, приводят к увеличению задержек воспламенения и, следовательно, к увеличению порогового значения скорости пламени, требуемой для быстрого ПГД.

В связи с принципиальной возможностью быстрого ПГД возникают фундаментальные вопросы относительно условий его реализации, а также средств и методов его предотвращения. В данном обзоре приведены примеры реализации быстрого ПГД в условиях, когда в потоке за бегущей УВ спонтанно возникают распределенные очаги самовоспламенения.

ПРОФИЛИРОВАННЫЕ ПРЕПЯТСТВИЯ

Большинство исследований ПГД в топливно-воздушных смесях проведено в прямых трубах и каналах со спиралью Шелкина [2] или с регулярными кольцевыми препятствиями [16]. Цель этих исследований заключалась в определении влияния параметров препятствий (высоты и шага) на время и длину ПГД. Однако ввиду возможности быстрого ПГД важное значение может иметь и форма препятствий, с помощью которой можно управлять местоположением и размером очага самовоспламенения при отражении бегущей УВ,

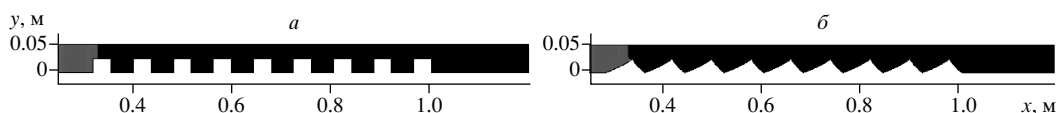


Рис. 1. Вход УВ в канал с регулярными препятствиями в виде прямоугольных выступов (*a*) и в виде комбинации парабол (*б*). Показана только нижняя часть плоского канала.

а также задержкой самовоспламенения [18, 19]. Удивительно, но до наших работ [18, 19] влияние формы препятствий на ПГД не исследовалось, хотя явление газодинамической фокусировки взрывных волн при отражении от неплоского торца ударной трубы известно давно [20].

Результаты расчетных и экспериментальных исследований [18, 19], представленные в данном разделе, показывают, как использование регулярных препятствий специальной формы позволяет реализовать быстрый ПГД. Для двумерных газодинамических расчетов выбраны препятствия в виде регулярных прямоугольных выступов (рис. 1*a*) и в виде комбинации двух парабол (рис. 1*б*). Высота и полная площадь сечения прямоугольных выступов в плоскости рис. 1 были такими же, как у параболических препятствий. В начальный момент времени плоский канал был заполнен неподвижной газовой взрывчатой смесью с температурой T_0 и давлением p_0 . Плоскую УВ с начальными числом Маха M и длительностью фазы сжатия τ получали с помощью инициирующей секции, заполненной газом высокого давления. Ударная волна распространялась слева направо и входила в участок канала с препятствиями.

На участке с препятствиями вследствие отражений бегущей УВ и взаимодействия отраженных волн друг с другом может произойти самовоспламенение газа [2]. После самовоспламенения возможны два сценария событий: медленный и быстрый. По медленному сценарию в канале образуются очаги турбулентного пламени, которые, разрастаясь, приводят к образованию волн давления, догоняющих и ускоряющих УВ. В перспективе в области между развитой зоной турбулентного горения и УВ может произойти “взрыв во взрыве”, ведущий к детонации. Таким образом, в медленном сценарии определяющую роль играет процесс развития и распространения турбулентного пламени, как и в классическом ПГД. В быстром сценарии роль турбулентного пламени становится несущественной: на первый план выходит энерговыделение в направленных фронтах самовоспламенения, которые быстро распространяются по свежей взрывчатой смеси, претерпевшей ударное сжатие.

Здесь рассматривается лишь второй, быстрый сценарий ПГД. Явления, вызванные распространением турбулентного пламени, протекают относительно медленно. Поэтому математическую

модель быстрого ПГД в [18, 19] строили на основе уравнений движения вязкого сжимаемого газа, дополненных уравнениями энергии и химической кинетики, а также уравнением состояния идеального газа, и не принимали во внимание турбулентный характер течения. Химическое превращение описывали одностадийной реакцией с аррениусовской зависимостью константы скорости от температуры, предварительно откалиброванной по известным экспериментальным данным для задержек самовоспламенения стехиометрической пропановоздушной смеси. В качестве начальных условий выбирали: давление – 0.1 МПа, температура – 293 К. Для интегрирования системы уравнений использовали метод конечных объемов с аппроксимацией потоков по Годунову [18]. Расчеты проводили для нижней половины канала (рис. 1) на структурированных сетках с количеством расчетных ячеек до 200000 с максимальным размером ячейки 500 мкм и максимальным шагом интегрирования по времени – 10 нс.

На рис. 2 показаны расчетные поля температуры в канале с регулярными препятствиями в виде прямоугольных выступов (рис. 2*a*) и в виде комбинации парабол (рис. 2*б*). Начальные параметры УВ: $M = 3$ и $\tau \approx 800$ мкс. В расчетах с препятствиями в виде прямоугольных выступов детонация не возникла (рис. 2*a*) несмотря на то, что самовоспламенение газа происходило раньше, чем на рис. 2*б*.

На рис. 2*б* самовоспламенение газа произошло в ядре течения над пятым препятствием вблизи газодинамического фокуса в момент времени около 490 мкс. Этот локальный взрыв привел к быстрому возникновению детонации. Пройдя через участок канала с препятствиями, ДВ затем распространялась с постоянной средней скоростью на гладком участке. Когда УВ той же начальной интенсивности и длительности входила в участок с препятствиями справа, а не слева (см. рис. 1), быстрый ПГД не происходил. Это свидетельствует о том, что для быстрого ПГД важную роль играет не только форма наветренной стороны препятствий, но и форма их подветренной стороны.

Чтобы понять причину быстрого ПГД в канале с регулярными препятствиями в виде комбинации парабол, в [18] проведен тщательный анализ пространственных распределений температуры в окрестности очага самовоспламенения над пятым препятствием непосредственно перед взрывом.

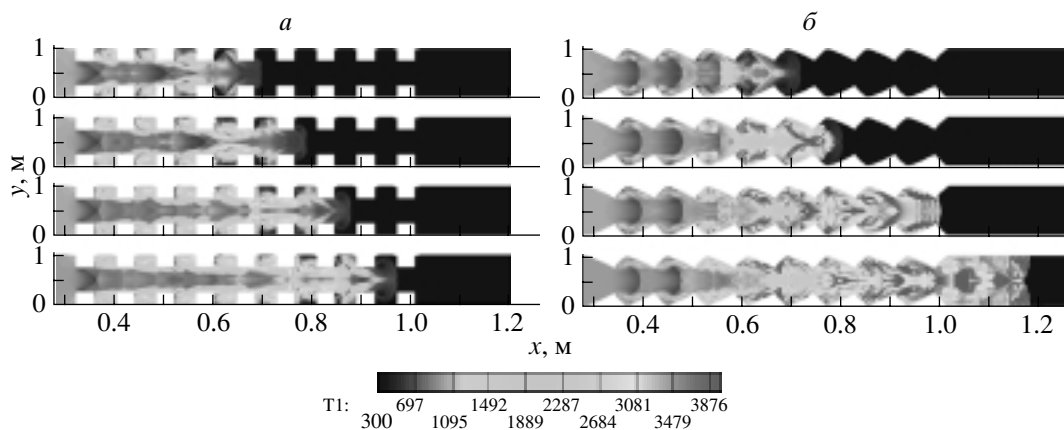


Рис. 2. Расчетные поля температуры при ПГД в канале с регулярными препятствиями в виде прямоугольных выступов (а) и в виде комбинации парабол (б). Верхнее поле соответствует моменту времени 480 мкс. Другие поля построены через интервал в 100 мкс.

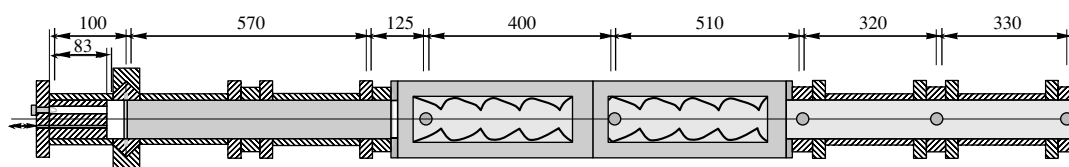


Рис. 3. Схема экспериментальной установки с профилированными регулярными препятствиями.

Расчеты показали, что к моменту самовоспламенения в центральной части канала образовалась область неравномерно нагретой, ударно-сжатой, свежей взрывчатой смеси размером приблизительно 10×3 мм и с температурой выше 2000 К. Самовоспламенение в этой области привело к образованию направленной вторичной взрывной волны. Взаимодействие этой волны с аналогичным вторичным взрывом в фокальной области над шестым препятствием привело к возникновению детонации.

В расчетах с параболическими препятствиями другой формы область самовоспламенения образовывалась далеко от центральной части фронта УВ и подвергалась воздействию волн разрежения, возникающих при дифракции УВ на препятствиях. При распространении УВ в канале с препятствиями в виде прямоугольных выступов самовоспламенение возникало не в свободном ядре течения, а на наветренной стороне препятствий и подвергалось сильному воздействию волн разрежения. Поэтому в канале с такими препятствиями детонация не возникала. Механизм образования направленной взрывной волны при самовоспламенении неравномерно прогретого газа детально исследовался в [21].

На рис. 3 показана схема лабораторной ударной трубы мембранного типа длиной 2.5 м. Труба состояла из камеры высокого давления (КВД) и камеры низкого давления (КНД). В КНД поме-

щали рабочий участок, оборудованный препятствиями. Трубу использовали для экспериментальной проверки полученных расчетных результатов.

Провели две серии экспериментов с регулярными препятствиями той же формы и размеров, что и в расчетах, соответствующих рис. 1. Препятствия изготавливали по шаблону из фанерного листа толщиной 7 мм, устанавливали шпильками в пакет толщиной 100 мм и устанавливали на верхней и нижней стенках рабочего участка трубы. Камеру высокого давления диаметром 70 мм и длиной 0.1 м, отделенную от КНД разрывной мембраной, заполняли стехиометрической пропиленокислородной смесью разного начального давления (до 0.8 МПа). Камера низкого давления включала буферный участок – гладкую трубу диаметром 70 мм и длиной 0.6 м, заполненную воздухом, а также рабочий участок квадратного сечения 100×100 мм и длиной 1 м и выходной участок – гладкую трубу диаметром 70 мм и длиной 0.8 м, заполненные стехиометрической пропиленокислородной смесью. Буферный участок отделяли от рабочего участка тонкой пленкой.

Все опыты проводили в бронекамере при нормальном начальном давлении рабочей смеси (0.1 МПа) и температуре (290 ± 2) К. Ударную волну инициировали, пережигая проволочку в КВД, что приводило к быстрому сгоранию пропиленокислородной смеси и разрыву мембраны. Пара-

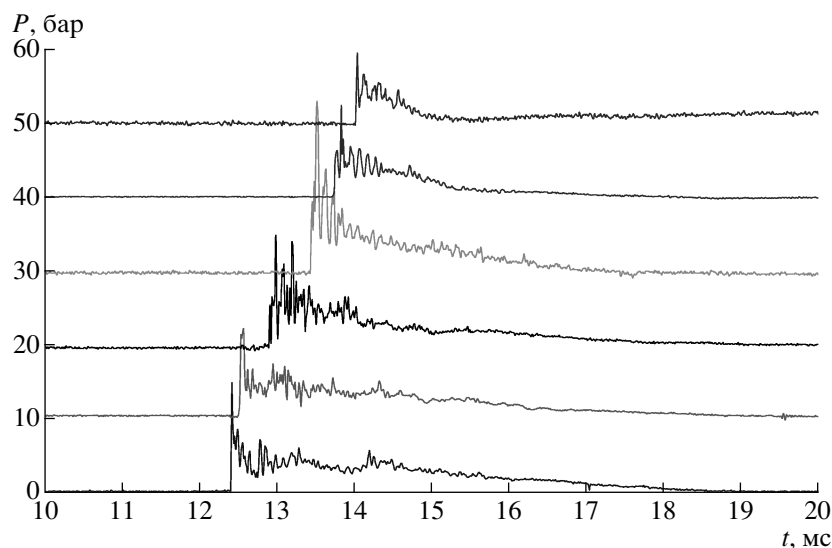


Рис. 4. Записи давления в трубе с регулярными препятствиями в виде комбинации парабол в стехиометрической пропиленовоздушной смеси. Начальная скорость ударной волны – (1070 ± 30) м/с.

метры УВ измеряли с помощью шести высокочастотных тензорезистивных датчиков давления типа ДДЗ-026М, установленных на расстояниях 0.57, 0.695, 1.095, 1.605, 1.925 и 2.255 м от мембранного узла. Все датчики были снабжены повторителями сигналов с индивидуальным питанием и соединялись с персональным компьютером через аналого-цифровой преобразователь. Погрешность измерения скорости УВ – не более 3%. Для проведения скоростной видеосъемки (5000 кадров в секунду) на одной стенке рабочего участка смонтировали два оптических окна размером 350×110 мм, выполненные из плексигласового стекла толщиной 40 мм.

На рис. 4 представлены записи давления в опыте с быстрым ПГД в канале с параболическими препятствиями. В таблице приведены результаты двух экспериментов с одинаковой (в рамках погрешности измерений) начальной интенсивностью УВ для препятствий разной формы. Видно, что при использовании препятствий в виде комбинации парабол на последней измерительной базе (1925–2255 мм) зарегистрирована детонация, распространяющаяся со скоростью (1590 ± 50) м/с, тогда как при использовании препятствий в виде прямоугольных выступов измеренная скорость УВ на той же базе равна (970 ± 30) м/с (детонации нет).

Полученные результаты подтверждают возможность быстрого ПГД в трубе с регулярными препятствиями специальной формы. И в расчетах, и в опытах быстрый ПГД произошел на стадии, когда в участок с препятствиями вошла УВ с числом Маха $M \sim 3.0$. В таких же условиях и в расчетах, и в опытах с препятствиями в виде прямоугольных выступов быстрый ПГД не реализован.

ВИТОК

Как показано в предыдущем разделе, криволинейные поверхности способствуют быстрому ПГД вследствие образования очагов самовоспламенения в ядре течения за бегущей УВ. В связи с этим можно ожидать, что быстрый ПГД более вероятен в изогнутых трубах, чем в прямых, так как витки и повороты труб – элементы, которые должны способствовать быстрому ПГД. Экспериментальные и расчетные данные, представленные в данном разделе, действительно показывают, что расположение витка трубы на пути бегущей УВ может приводить к быстрому ПГД.

На рис. 5 представлена схема проточной трубы диаметром 36 мм с пневматической форсункой А, высоковольтным электрическим разрядником ЕД, спиралью Щелкина и съемным участком – витком [22, 23]. В опытах также использовали трубу диаметром 28 мм такой же конструкции. Форсунка обеспечивала полный расход тонкораспыленной капельной н-гексановоздушной смеси

Сравнение измеренных скоростей УВ в трубах с регулярными препятствиями в виде прямоугольных выступов и в виде комбинации парабол

Измерительная база, мм	Скорость ударной волны, м/с	
	параболы	выступы
670–795	1070 ± 30	1070 ± 30
795–1195	1061 ± 30	714 ± 20
1195–1705	836 ± 25	637 ± 20
1705–2025	1025 ± 30	1000 ± 30
2025–2355	1590 ± 50	970 ± 30

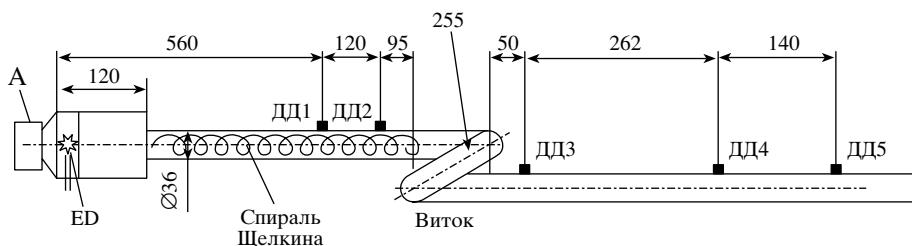


Рис. 5. Схема трубы диаметром 36 мм со спиралью Щелкина и витком [22].

через трубу. Зажигание взрывчатой смеси с коэффициентом избытка горючего около 1.3 производили разрядником ED, расположенным на расстоянии 60 мм от сопла форсунки, где средний размер капель в струе составлял 5–6 мкм. Спираль Щелкина длиной 600 мм, свитую из стальной проволоки диаметром 4 мм с шагом витков 18 мм, использовали для увеличения интенсивности турбулентности в струе капельной смеси, поступающей из форсунки. Для проверки возможности реализации быстрого ПГД за секцией со спиралью Щелкина установили новый элемент – виток трубы. Пьезоэлектрические датчики давления ДД1–ДД5 использовались для регистрации профилей волн давления в трубе и для определения скорости распространения этих волн. Ожидалось, что наличие криволинейных отражающих поверхностей в витке может привести к газодинамической “фокусировке” УВ и быстрому ПГД. Отметим, что фокусирующее действие витков взрывных

труб в реагирующих средах до наших работ [22, 23] не исследовалось.

В опытах в прямой трубе диаметром 36 мм со спиралью Щелкина, но без витка, скорость УВ на выходе из спирали достигала 900–1000 м/с, но ПГД не наблюдался. Изменение диаметра проволоки спирали, а также шага и длины спирали не привело к каким-либо значительным изменениям характеристик получаемых УВ при энергиях зажигания до 240 Дж. Аналогичные опыты провели и в прямой трубе диаметром 28 мм со спиралью Щелкина. Как и в трубе диаметром 36 мм, в трубе меньшего диаметра ПГД не наблюдался, а скорость УВ на выходе из спирали достигала 800–900 м/с.

На рис. 6 приведены записи давления, зарегистрированные датчиками ДД1–ДД5 в опыте в 36-миллиметровой трубе со спиралью и с витком при энергии зажигания $E = 60$ Дж. В этом опыте на выходе из витка (датчик ДД3) зарегистрирована ДВ. Детонация возникает внутри витка на расстоянии около 1 м от разрядника (что равно ≈ 28 калибров трубы). Детонационная волна распространяется до конца трубы со скоростью (1750 ± 20) м/с.

Этот эффект можно объяснить многократными отражениями УВ, вышедшей из спирали, внутри витка, которые способствовали возникновению детонации. Такие отражения напоминают отражения, возникающие при распространении УВ в прямом канале с регулярными препятствиями специальной формы.

В расчетных исследованиях [24] для разрешения пространственных эффектов, присущих распространению УВ в витке трубы, использовали трехмерные уравнения Эйлера для сжимаемого газа и уравнения одноступенчатой реакции окисления горючего, откалиброванной под стехиометрическую пропановоздушную смесь. Для решения системы определяющих уравнений использовали алгоритм параллельных вычислений. Неструктурированные расчетные сетки витка содержали до 1400000 ячеек с минимальным и максимальным размерами сетки в 0.25 и 0.7 мм соответственно. Шаг интегрирования по времени не превышал 50 нс. Расчеты проводились на 32 процессорах комплекса MVS-15000BM в Межведомственном суперкомпьютерном центре РАН.

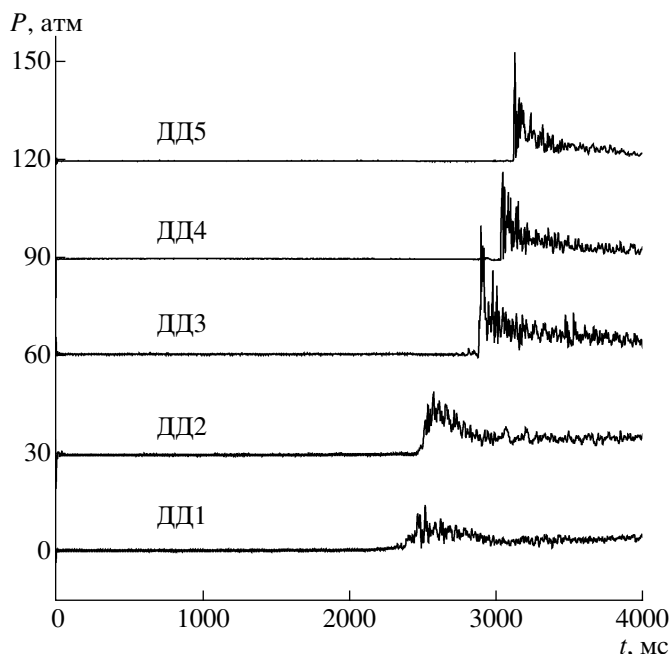


Рис. 6. Записи давления в опыте с энергией зажигания в 60 Дж [22].

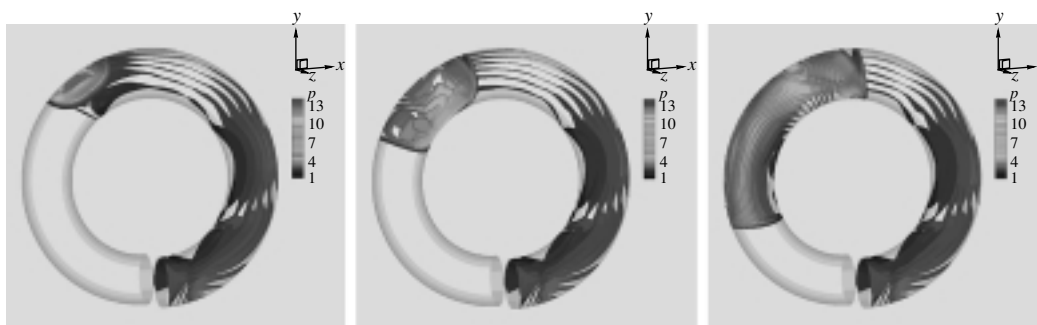


Рис. 7. Расчетная динамика изоповерхностей статического давления (в МПа) при ПГД в витке трубы диаметром 28 мм (первая конфигурация) при числе Маха первичной УВ $M = 3.9$.



Рис. 8. Расчетная динамика изоповерхностей статического давления (в МПа) при ПГД в витке трубы диаметром 36 мм (вторая конфигурация) при числе Маха первичной УВ $M = 3.8$.

Рассматривали ПГД в витках двух конфигураций, заполненных стехиометрической пропановоздушной смесью при нормальных начальных условиях. Первая конфигурация – виток трубы диаметром 28 мм и длиной 365 мм (вдоль оси трубы). Вторая конфигурация – виток трубы диаметром 36 мм и длиной 255 мм (вдоль оси трубы). Входное и выходное сечение витков располагались в одной плоскости и находились в контакте друг с другом. Параметры первичной УВ на входе в виток моделировали с помощью соотношений Ренкина–Гюгонно.

Расчеты позволили понять особенности явления быстрого ПГД и в качественном отношении соответствовали экспериментальным наблюдениям. Минимальное (критическое) значение числа Маха первичной УВ, необходимое для ПГД в витках первой и второй конфигураций, оказалось равным 3.9 и 3.6 соответственно. В расчетах наблюдали несколько дискретных местоположений “взрыва во взрыве”, дающего начало детонации: все они находились в окрестности точек отражения бегущей УВ от стенок витка. В околокритических условиях быстрый ПГД происходил во второй половине витка ближе к выходному сечению (рис. 7). С увеличением числа Маха первичной УВ выше критического значения область возникновения ПГД перемещалась в первую по-

ловину витка ближе к входному сечению (рис. 8). Трехмерные эффекты больше проявлялись в витке второй конфигурации с меньшим радиусом кривизны: форма фронта первичной УВ значительно отклонялась от плоской.

U-ОБРАЗНЫЕ ПОВОРОТЫ

Повороты труб – элементы, которые широко используются в разных промышленных приложениях. Удивительно, но в литературе оказалось очень мало работ по дифракции УВ и ДВ в таких элементах [25]. В наших недавних работах по ПГД в изогнутых трубах [26–29] однозначно продемонстрировано, что кривизна трубы эффективно ускоряет ПГД.

В [26–29] опубликованы результаты экспериментальных и расчетных исследований ПГД в стехиометрической пропановоздушной смеси в трубе с одним U-образным поворотом, радиус кривизны которого равен диаметру трубы (51 мм). В этих работах обнаружено влияние U-образного поворота на инициирование и распространение детонации. С одной стороны, U-образный поворот трубы способствовал ПГД: УВ, входящая в поворот со скоростью выше 1100 м/с, всегда переходила в детонацию. С другой стороны, ДВ, вошедшая в U-образный поворот со скоростью 1700–1800 м/с,

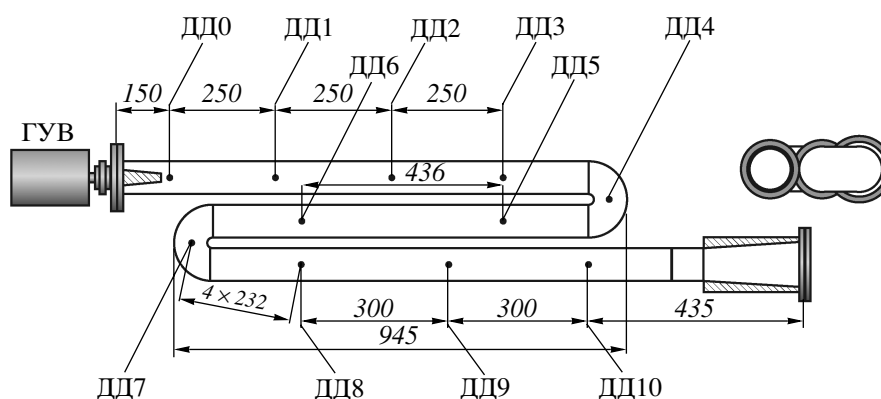


Рис. 9. Схема трубы диаметром 51 мм с генератором УВ и двумя U-образными поворотами. Размеры указаны в миллиметрах. Точки соответствуют положениям датчиков давления.

сначала подвергалась временному ослаблению со снижением скорости распространения приблизительно на 250 м/с (15%), а затем восстанавливала эту скорость на прямом участке за поворотом.

Двумерные численные расчеты распространения ДВ в таких поворотах выявили интересные особенности в возникающих переходных процессах. Показано, что разные участки головного фронта волны ведут себя по-разному ввиду временного и пространственного сдвигов при взаимодействии волн сжатия и разрежения и вследствие конечной скорости химических превращений. Вблизи внутренней стенки поворота в расчетах зарегистрированы и разрушение детонации, и повторное ее инициирование. Кроме того, показано, что в переходном процессе далеко за лидирующим фронтом образуются большие объемы несгоревшего газа. После выхода из поворота детонация восстанавливалась на расстоянии от 8 до 10 диаметров трубы и приобретала характерную ячеистую структуру.

Кривизна U-образного поворота, диаметр трубы, а также длительность фазы сжатия в первичной УВ являются, по-видимому, наиболее важными параметрами задачи, которые определяют эволюцию инициирующей УВ или развитой ДВ в такой системе [26–29]. В этом разделе представлены некоторые экспериментальные и расчетные данные по распространению УВ в трубах с U-образными поворотами предельной кривизны, заполненных газовой взрывчатой смесью.

На рис. 9 показана экспериментальная установка, состоящая из детонационной трубы круглого сечения с двумя U-образными поворотами. Трубу установили на экспериментальном стенде, оборудованном для работы с газовыми взрывчатыми смесями. В экспериментах использовали стехиометрическую пропановоздушную смесь. Смесь приготавливали в смесителе. С одной стороны трубы устанавливали генератор ударной волны (ГУВ). В опытах использовали два типа ГУВ: по-

роховой газогенератор и электроразрядный ГУВ, подробно описанные в [26–29].

Труба с внутренним диаметром 51 мм состояла из трех прямых участков и двух U-образных поворотов, которые размещались в одной плоскости. Внутренний радиус поворотов был равен 11 мм.

Повороты были изготовлены с помощью электросварки из четырех стандартных сегментов. Внутренняя поверхность поворота была гладкой. Вдоль трубы устанавливали до 10 пьезоэлектрических датчиков давления ДД1–ДД10. Погрешность измерения скорости УВ оценили в 4%. Система регистрации запускалась датчиком давления ДД1.

На рис. 10а показано изменение средней скорости УВ вдоль трубы при разной начальной средней скорости УВ на первой измерительной базе (от 850 до 1300 м/с). В этой серии экспериментов УВ переходила в детонацию после прохождения либо первого, либо второго поворота. Наименьшая средняя скорость УВ на входе в первый поворот, необходимая для получения детонации за вторым поворотом, оказалась близкой к 800 м/с. Это значение скорости УВ следует рассматривать как критическое условие для конфигурации, показанной на рис. 9. Напомним, что в экспериментах с поворотами большего радиуса кривизны [26–29] критическая скорость УВ составила около 1100 м/с. Из рис. 10а видно, что чем выше скорость первичной УВ, тем быстрее происходит ПГД. Записи давления на рис. 10б соответствуют одному из опытов на рис. 10а. На записях датчиков ДД4 и ДД5 хорошо виден вторичный взрыв. Детонация возникает, когда вторичная взрывная волна догоняет первичную УВ.

Математическая модель была основана на двумерных уравнениях Эйлера, уравнении сохранения энергии с химическим источником и

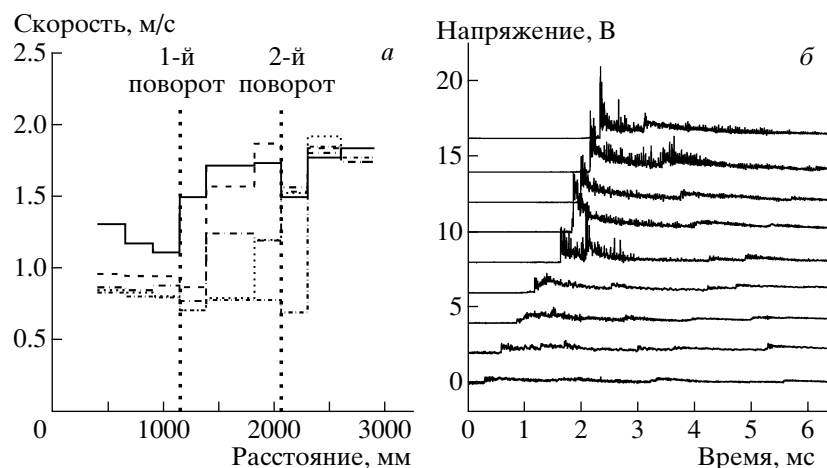


Рис. 10. Средняя скорость УВ на разных измерительных базах трубы с двумя U-образными поворотами (показаны вертикальными прямыми) в нескольких типичных опытах: *а* – проход УВ через повороты с возникновением детонации, *б* – записи давления в одном из опытов.

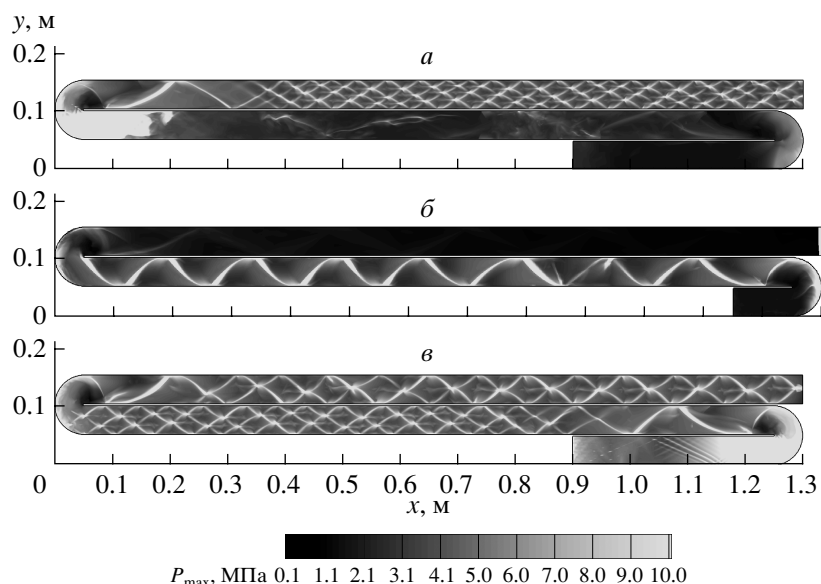


Рис. 11. Записи максимального давления в канале шириной 51 мм с двумя U-образными поворотами предельной критичности. Начальная скорость и длительность фазы сжатия УВ на входе в первый поворот: *а* – $D = 0.62D_0$ и $\tau_+ = 310$ мкс, *б* – $D = 0.64D_0$ и $\tau_+ = 60$ мкс, *в* – $D = 0.64D_0$ и $\tau_+ = 600$ мкс.

уравнении химической кинетики. Кинетику окисления пропана моделировали либо одноступенчатой реакцией, либо с помощью полуэмпирического 5-ступенчатого механизма. Более подробное описание процедуры расчетов приведено в [26–29].

В расчетах проявилась важная роль длительности фазы сжатия в первичной УВ в процессе ПГД и в структуре детонации. На рис. 11*а* и *б* показана ситуация, когда первичная УВ с более длительной фазой сжатия, но меньшей скоростью переходит в детонацию после второго U-образного поворота (рис. 11*а*), тогда как первичная УВ с

более короткой начальной фазой сжатия, но с большей начальной скоростью не переходит в детонацию за вторым поворотом (рис. 11*б*). Интересно, что одноголовая детонация, возникающая за первым поворотом на рис. 11*б*, внезапно разрушается при входе волны во второй поворот, что связано с сильной волной разрежения, возникающей на внутренней стенке поворота. Динамическая ячеистая структура детонации на рис. 11*а* и *в*, по-видимому, неустойчива: с течением времени она стремится к структуре с двумя поперечными волнами.



Рис. 12. Схема экспериментальной установки с предиспарителем керосина (а), спиралью Щелкина (б) и змеевиком (в). Описание схемы см. в тексте.

БЫСТРЫЙ ПГД В КЕРОСИНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

В данном разделе приведены результаты экспериментальных исследований [30, 31], направленных на получение детонации воздушной смеси авиационного керосина ТС-1 в трубах на кратчайших расстояниях при минимальных энергиях зажигания. Для этой цели использовали регулярные препятствия и многократные отражения УВ в специальном фокусирующем устройстве – змеевике.

На рис. 12 показана схема экспериментальной установки, состоящей из пневматической топливной форсунки непрерывного действия 1, обогреваемой детонационной трубы 2, источника зажигания 3, датчиков давления 4, огнепреградителя 5, воздушного баллона 6, топливного клапана 7, воздушного компрессора 8, топливного бака 9, топливного фильтра 10, цифрового управляющего устройства 11, блока питания 12, персонального компьютера 13 с 16-канальным аналого-цифровым преобразователем, реле 14, предиспарителя горючего 15, термостата 16, электрических нагревателей 17, 18 и термопар 19. Системы питания горючего и воздуха обеспечивали постоянное соотношение между массовыми расходами компонентов смеси – жидкого керосина ТС-1 и воздуха – в форсунке благодаря поддержанию одинакового давления их подачи (от 6 до 4.8 атм). Смешение горючего с воздухом начиналось в форсунке и заканчивалось в детонационной трубе внутренним диаметром 52 мм и длиной 3 м. Пневматическая форсунка обеспечивала очень тонкое распыление керосина на капли диаметром от 5 до 10 мкм. Распределение капель по размерам измеряли методом сажевых отпечатков [32]. Воздух подавали из баллона 6, соединенного с воздушным компрессором 8. Двухфазную керосиновоздушную смесь подавали непрерывно в предиспаритель 15. Предиспаритель использовали для повышения детонационной способности капельной топливно-воздушной смеси, следуя выводам [15]. Проходя через предиспаритель, керосин частично испарялся на горячих стенках. Таким образом, в предиспарителе образовывалась гетерогенная смесь воздуха, паров керосина, капель керосина от пневматической форсунки и тумана – конденсата испа-

ренного керосина (см. фотографию а на рис. 12), которая поступала через выходное сопло в прямой участок детонационной трубы со спиралью Щелкина (см. фотографию б на рис. 12), затем либо в прямой участок гладкой трубы, либо в трубу-змеевик с гладкой внутренней поверхностью (см. фотографию в на рис. 12). К концу детонационной трубы присоединяли огнепреградитель, сообщаемый с атмосферой, – участок трубы диаметром 80 мм, плотно упакованный гофрированной металлической лентой. Для диагностики взрывных процессов в детонационной трубе устанавливали охлаждаемые водой высокочастотные пьезоэлектрические датчики давления ДД1–ДД7 и ионизационные зонды.

Система обогрева трубы включала два термостата: термостат предиспарителя 15 и термостат детонационной трубы 16. В термостате предиспарителя устанавливали электронагреватель 17 мощностью 0.6 кВт, а в термостате детонационной трубы размещали трехсекционный электронагреватель 18 мощностью 2.5 кВт и термопары 19. Режимом термостатирования управляли с помощью реле 14. Типичная продолжительность одного опыта в предварительно нагретой трубе – около 1 с.

Температура стенки предиспарителя в опытах составляла $(190 \pm 10)^\circ\text{C}$. Температура прямого участка трубы со спиралью Щелкина составляла $(120\text{--}130)^\circ\text{C}$, а температура примыкающего к нему участка трубы до датчика давления ДД6 – $(110\text{--}120)^\circ\text{C}$. Участок трубы между датчиком ДД6 и огнепреградителем не термостатировался и имел температуру $20\text{--}30^\circ\text{C}$.

Провели две серии опытов. В первой серии к участку со спиралью Щелкина присоединяли прямую гладкую детонационную трубу, а во второй – трубу-змеевик, показанную на фотографии в рис. 12.

Спираль Щелкина использовали для ускорения пламени и получения ударной волны, распространяющейся со скоростью выше $800\text{--}900$ м/с. Спираль свили из стальной проволоки диаметром 7 мм с шагом 22 мм. Длина спирали в обеих сериях была равна 800 мм. Спираль размещали на расстоянии 70 мм от выходного сопла предиспарителя. Топливо-воздушную смесь зажигали в предиспа-

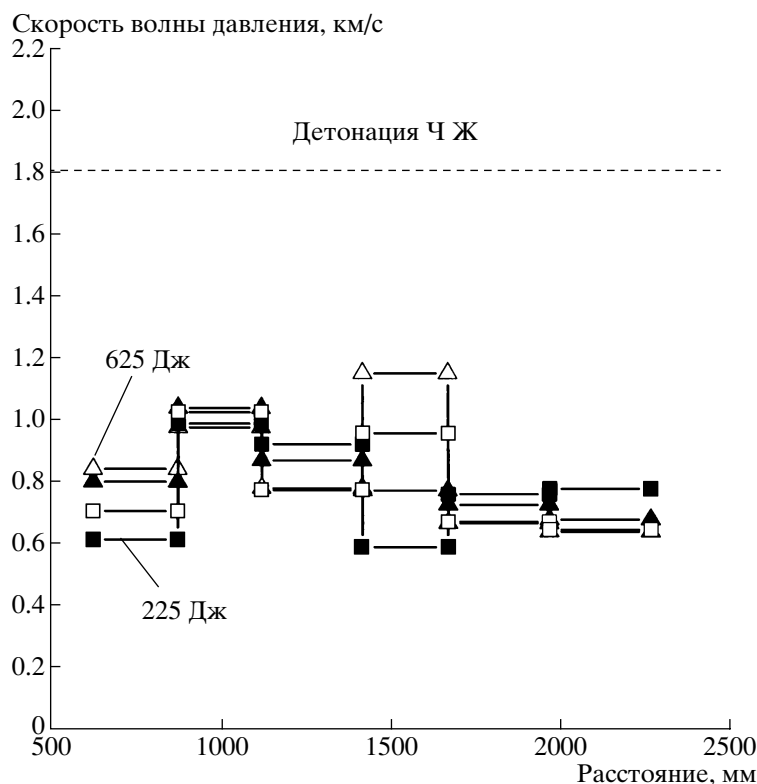


Рис. 13. Изменение скорости волны давления в потоке керосиновоздушной смеси в четырех опытах в прямой детонационной трубе при изменении энергии зажигания от 225 до 625 Дж.

рителе либо модернизированной автомобильной свечой с медным центральным электродом, либо трехэлектродным электрическим разрядником [14].

В первой серии опытов энергию зажигания изменяли в пределах от 5 до 700 Дж. Энергию зажигания рассчитывали по емкости разрядного конденсатора и напряжению. На рис. 13 приведены результаты измерений скорости волны давления вдоль детонационной трубы в четырех типичных опытах первой серии. Символы на кривых использованы для идентификации данных каждого опыта. Видно, что в прямой трубе даже при высокой энергии зажигания ПГД не происходил: скорость волны давления на выходе из участка со спиралью Щелкина не превышала 1200 м/с.

Во второй серии опытов за участком со спиралью Щелкина размещали трубу-змеевик. Идея использования комбинации спирали Щелкина со змеевиком основана на результатах экспериментов [22, 23], где впервые продемонстрировано эффективное действие витков труб на ПГД в потоке двухфазных смесей н-гексана и н-гептана с воздухом. Змеевик представлял собой два полных оборота трубы с внешним диаметром 60 мм (внутренний диаметр – 52 мм) с шагом 255 мм, навитой во-

круг прямого стержня диаметром 28 мм. Энергию зажигания во второй серии опытов изменяли в пределах от 5 до 180 Дж.

В отличие от первой серии во второй серии опытов устойчиво регистрировали ПГД в потоке смеси керосина ТС-1 с воздухом. На рис. 14 приведены результаты измерений скорости волны давления вдоль детонационной трубы в двенадцати опытах второй серии с энергией зажигания от 5 до 100 Дж. Как и на рис. 13, символы на кривых использованы лишь для идентификации данных каждого опыта. Видно, что в трубе со змеевиком ПГД происходил даже при энергии зажигания в 5 Дж: скорость волны давления на выходе из змеевика (на расстоянии около 2 м от источника зажигания) составила 1600–1800 м/с, т.е. была на уровне скорости детонации ЧЖ для углеводородно-воздушных смесей. Образованная в змеевике детонационная волна распространялась с постоянной скоростью на двух последних измерительных базах между датчиками ДД5 и ДД6, а также ДД6 и ДД7. Импульсы тока, зарегистрированные ионизационными зондами в сечениях, где расположены датчики ДД5: ДД6 и ДД7, совпадали с моментами прихода ударной волны в соответствующие сечения, что подтверждало существование детонации.

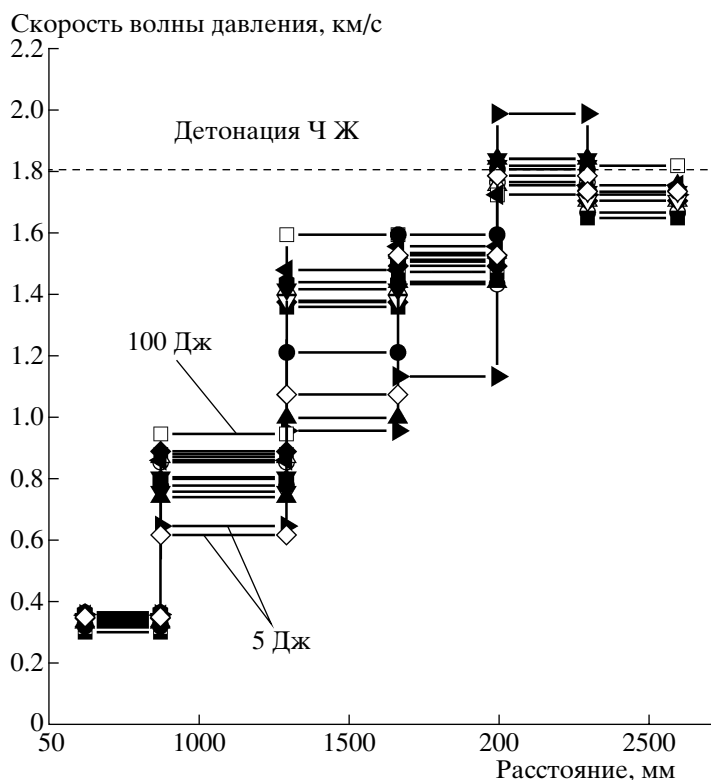


Рис. 14. Изменение скорости волны давления в потоке керосиновоздушной смеси в двенадцати опытах в детонационной трубе со спиралью Щелкина и змеевиком при изменении энергии зажигания от 5 до 100 Дж.

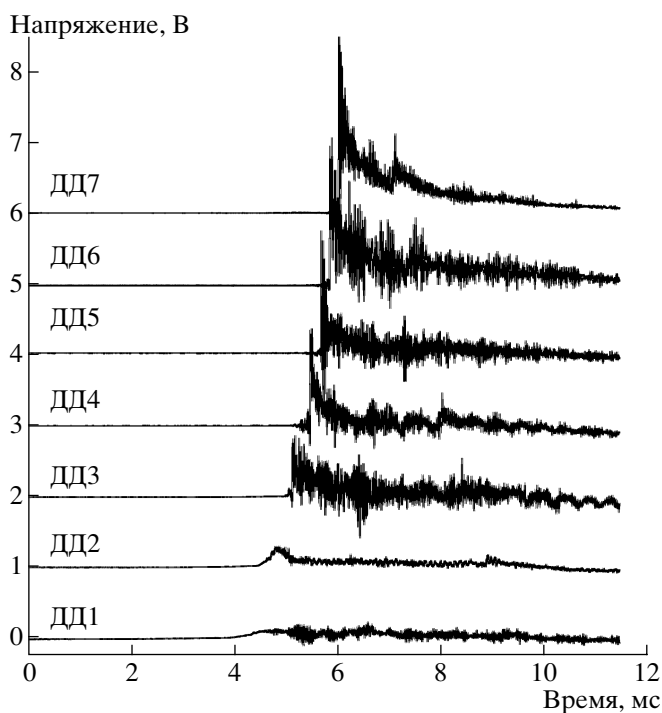


Рис. 15. Записи давления датчиками РТ1–РТ7 при ПГД в опыте с энергией зажигания в 5 Дж.

На рис. 15 в качестве примера приведены записи давления датчиками ДД1–ДД7 в опыте с энергией зажигания в 5 Дж. В этом опыте детонация возникла на участке трубы между датчиками ДД5 и ДД6 приблизительно через 5–6 мс после зажигания. Очевидно, что ПГД во второй серии опытов полностью обусловлен использованием змеевика, в котором происходили многократные отражения ударных волн и волн давления, генерируемых ускоряющимся пламенем.

Таким образом, в [30, 31] впервые продемонстрирована возможность ПГД в непрерывном потоке воздушной смеси частично предиспаренного авиационного керосина ТС-1 при атмосферном давлении и температуре стенок трубы, равной 110–130°C. Показано, что в термостатированной трубе диаметром 52 мм, состоящей из предиспарителя керосина, прямого участка со спиралью Щелкина и гладкого участка-змеевика, ПГД происходил на длине около 2 м за время 5–6 мс при низкой энергии зажигания на уровне 5 Дж. Полученные результаты открывают возможности практической работы по созданию новых систем реактивного движения с детонационным сжиганием топлива – импульсных детонационных двигателей (ИДД) [33].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлено несколько примеров, иллюстрирующих существование быстрого ПГД, возможность которого обсуждалась в [12]. Быстрый ПГД может произойти в условиях, когда в потоке взрывчатой смеси за относительно слабой УВ возникают (синхронно с бегущей волной) очаги самовоспламенения вследствие отражений волны от профилированных препятствий или криволинейных поверхностей в витках, поворотах труб и т.п. Экспериментально и расчетным путем показано, что критическая скорость, требуемая для быстрого ПГД, может быть достаточно низкой – на уровне 800 м/с. Такие УВ могут возникать в прямых трубах с шероховатой внутренней поверхностью, с регулярными препятствиями в виде спирали Щелкина или в виде кольцевых вставок при достаточно низкой энергии зажигания. Таким образом, с одной стороны, разные комбинации элементов труб (и источников зажигания), приводящие к возникновению ударных волн, распространяющихся со скоростью выше 800 м/с, с витками, поворотами, локальными профилированными перегородками и др. следует рассматривать как потенциально опасные. При проектировании взрывобезопасных производств таких комбинаций следует избегать. В связи с этим возможность быстрого ПГД ставит фундаментальные вопросы об условиях его реализации и о мерах предосторожности, требуемых для его предотвращения. С другой стороны, рассмотренные комбинации весьма перспективны для быстрого инициирования детонационного взрыва, например, в ИДД [33]. Для лучшего понимания сопутствующих явлений требуются дальнейшие исследования.

Автор с благодарностью отмечает ценный вклад своих коллег по работе Аксенова В.С., Ахмедьянова И.Ф., Басевича В.Я., Комиссарова П.В., Маркова В.В., Семенова И.В., Уткина А.С. и Шамшина И.О. в проведенные исследования.

Работа проводилась при поддержке Российским фондом (гранты № 05-08-18200 и № 05-08-5011) и Международным научно-техническим центром (проект № 2740).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bone W.A., Fraser R.P. // Phil. Trans. Roy. Soc. 1929. V. A228. P. 197.
2. Зельдович Я.Б. Теория горения и детонации газов. М.: Изд-во АН СССР, 1944.
3. Щелкин К.И. Быстрое горение и спиновая детонация газов. М.: Воениздат, 1949. С. 44.
4. Oppenheim A.K. Introduction to Gasdynamics of Explosions. Wien–N.Y.: Springer, 1972.

5. Lee J.H.S., Moen I. // Progr. Energy Combust. Sci. 1980. V. 6. P. 359.
6. Хиггинс А.Дж., Пинар П., Йошинака А.К., Ли Дж.Х.С. // Импульсные детонационные двигатели / Под ред. Фролова С.М. М.: Торус Пресс, 2006. С. 65.
7. Frolov S.M., Basevich V.Ya., Aksekov V.S., Polikhov S.A. // J. Propulsion and Power. 2003. V. 19. № 4. P. 573.
8. Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А. // Докл. АН. 2004. Т. 394. № 2. С.222.
9. Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А. // Хим. физика. 2004. Т. 23. № 4. С. 61.
10. Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А. // Докл. АН. 2004. Т. 394. № 4. С. 503.
11. Frolov S.M., Basevich V.Ya., Aksekov V.S., Polikhov S.A. // J. Propulsion and Power. 2005. V. 21. № 1. P. 54.
12. Frolov S.M. // J. Loss Prevention. 2005. V. 19/2-3. P. 138.
13. Frolov S.M. // J. Propulsion and Power. 2006. № 6. P. 1162.
14. Frolov S.M., Basevich V.Ya., Aksekov V.S. // Shock Waves. 2005. V. 14. № 3. P. 175.
15. Басевич В.Я., Фролов С.М., Посвянский В.С. // Хим. физика. 2005. Т. 24. № 7. С. 58.
16. Peraldi O., Knystautas R., Lee J.H.S. // Proc. Combust. Institute. 1986. V. 21. P. 1629.
17. Басевич В.Я., Веденеев В.И., Фролов С.М., Романович Л.Б. // Хим. физика. 2006. Т. 25. № 11. С. 87.
18. Semenov I., Frolov S., Markov V., Utkin P. // Pulsed and Continuous Detonations / Eds. Roy G., Frolov S., Sini-baldi J. Moscow: Torus Press, 2006. P. 159.
19. Фролов С.М., Семенов И.В., Комиссаров П.В., Уткин П.С., Марков В.В. // Докл. АН. 2007. Т. 415. № 4. С. 509.
20. Struvert B., Kulkarny V.A. // J. Fluid Mechanics. 1976. V. 73. P. 651.
21. Zel'dovich Ya.B., Gelfand B.E., Tsyganov S.A., Frolov S.M., Polenov A.N. // Progr. Astr. Aeron., Dynamics of Explosions / Eds. Kuhl A., Bowen J.R., Leyer J.-C., Borisov A.A. Washington, DC: AIAA Inc., 1988. V. 114. P. 99.
22. Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я. // Докл. АН. 2005. Т. 401. № 2. С. 201.
23. Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я. // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44. № 2. С. 285.
24. Frolov S.M., Semenov I.V., Ahmedyanov I.F., Markov V.V. // Proc. 26th Sympos. (Intern.) on Shock Waves. Goettingen, Germany, 2007. Paper 3480.
25. Nettleton M.A. Gaseous Detonations. London – N.Y.: Chapman and Hall, 1987.
26. Frolov S.M., Aksekov V.S., Shamshin I.O. // Nonequilibrium processes. V. 1. Combustion and Detonation / Eds.

- Roy G., Frolov S., Starik A. Moscow: Torus Press, 2005. P. 348.
27. *Frolov S.M., Aksenov V.S., Shamshin I.O.* // Proc. Combust. Institute. 2007. V. 31. P. 2421.
28. *Фролов С.М., Аксенов В.С., Шамишин И.О.* // Докл. АН. 2007. Т. 416. № 3. С.
29. *Frolov S.M., Aksenov V.S., Shamshin I.O.* // J. Loss Prevention. 2007. V. 20. № 4–6. P. 501.
30. *Фролов С.М., Аксенов В.С.* // Докл. АН. 2007. Т. 416. № 3. С. 356.
31. *Frolov S.M., Aksenov V.S.* // Proc. 21st Poitiers: Ensma, ICDERS. 2007. Paper № 253.
32. *Elkoth M.M.* // Progress in Energy and Combust. Sci. 1982. V. 8. № 1. P. 61.
33. *Фролов С.М.* Импульсные детонационные двигатели. М.: Торус Пресс, 2006.