

СОКРАЩЕНИЕ ДЛИНЫ И ВРЕМЕНИ ПЕРЕХОДА ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ В ТРУБЕ С ПРОФИЛИРОВАННЫМИ РЕГУЛЯРНЫМИ ПРЕПЯТСТВИЯМИ

© 2007 г. С. М. Фролов, И. В. Семенов, П. В. Комиссаров, П. С. Уткин, В. В. Марков

Представлено академиком Ал. Ал. Берлиным 19.02.2007 г.

Поступило 20.02.2007 г.

Для ускорения перехода горения в детонацию (ПГД) в газах впервые предложено использовать регулярные препятствия специальной формы. На основе расчетов и экспериментов показано, что такие препятствия позволяют значительно сократить длину и время ПГД по сравнению с регулярными препятствиями в виде прямоугольных выступов. Новый метод ускорения ПГД можно использовать для создания компактных камер сгорания воздушно-реактивных импульсных детонационных двигателей (ИДД).

Детонация – явление, которое до недавнего времени рассматривалось лишь как крайне нежелательный сценарий развития аварийного взрыва, недопустимый режим горения в поршневом двигателе или как мощный источник разрушения в военном деле. Однако в последние годы появилось и стремительно развивается новое направление исследований, связанное с созданием систем реактивного движения с управляемым детонационным сжиганием топлива – ИДД [1]. Ключевые требования к рабочему процессу ИДД – иницирование детонации на кратчайшем расстоянии, за кратчайшее время и при минимальной энергии источника зажигания. Классический способ – прямое иницирование детонации [2] – обеспечивает детонацию на коротких расстояниях в результате концентрированного кратковременного выделения такого количества энергии, которое неприемлемо для применения в ИДД. Другой классический способ – ПГД [3] – обеспечивает детонацию при слабом источнике зажигания, но на расстоянии и за время, которые неприемлемо велики для ИДД даже при использовании искус-

ственных турбулизаторов типа спирали Щелкина или регулярных кольцевых препятствий.

В [4, 5] экспериментально реализован еще один способ иницирования детонации в трубе с газовой или капельной взрывчатой смесью – с помощью бегущего импульса зажигания. В этом случае зажигание смеси производили не одним источником, а серией электрических разрядников, установленных вдоль трубы. При тщательной синхронизации электрического разряда с приходом ударной волны (УВ) в сечение каждого разрядника удалось получить детонацию в гладкой трубе на очень коротких расстояниях при суммарной энергии зажигания, значительно меньшей энергии прямого иницирования детонации одним разрядником. В [6] на основе анализа экспериментов [4, 5] сделан важный вывод: классические опыты по ПГД в трубах с регулярными препятствиями можно также рассматривать как иницирование детонации с помощью бегущего импульса зажигания, по крайней мере на заключительных стадиях процесса, когда в трубе сформировалась УВ. В этом случае вместо принудительного зажигания смеси вблизи фронта УВ происходит самовоспламенение смеси, вызванное отражением УВ от препятствий. Задержка самовоспламенения, определяемая интенсивностью УВ и длительностью фазы сжатия в ней, играет ту же роль, что и задержка принудительного зажигания в опытах [4, 5]. Таким образом, чем ближе к фронту УВ область, охваченная самовоспламенением (“синхронизация” самовоспламенения с приходом УВ), и чем больше эта область, тем более благоприятны условия для быстрого ПГД в трубе с регулярными препятствиями. При такой трактовке классических опытов по ПГД открываются новые возможности сокращения преддетонационного расстояния и времени. Одна из таких возможностей впервые рассмотрена в [7]. В данной работе описаны результаты расчетов ПГД в каналах с регулярными препятствиями и проведено их сравнение с результатами опытов.

*Институт химической физики им. Н.Н. Семенова
Российской Академии наук, Москва*

*Институт автоматизации проектирования
Российской Академии наук, Москва*

*Математический институт им. В.А. Стеклова
Российской Академии наук, Москва*

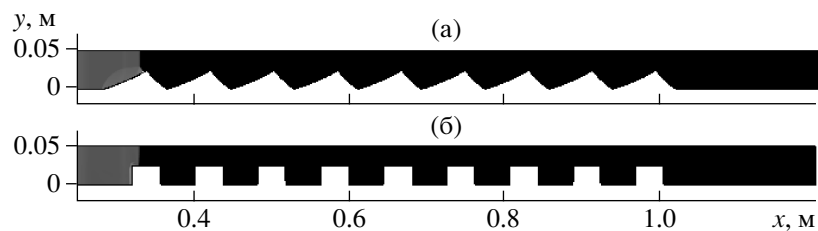


Рис. 1. Геометрия плоского канала с регулярными препятствиями в виде комбинации парабол (а) и прямоугольных выступов (б). Показана только нижняя часть канала. Ударная волна распространяется слева направо (светлая область).

В расчетах рассматривали конечную стадию ПГД в плоском канале высотой H с регулярными препятствиями, когда в канале уже сформирована относительно слабая УВ с числом Маха M_0 и длительностью фазы сжатия τ , способная вызвать самовоспламенение смеси при отражении от препятствий. Идея работы состояла в поиске формы регулярных препятствий, обеспечивающей быстрый переход УВ в детонацию (ПУВД) по механизму [6]. Для определенности считали, что форма препятствия – комбинация двух парабол $x_1 = a_1y^2 + b_1y + c_1$ ($a_1 > 0$) и $x_2 = a_2y^2 + b_2y + c_2$ ($a_2 < 0$) с фокусами, лежащими в плоскости симметрии канала. Точки пересечения парабол соответствовали вершинам препятствий высотой h , расположенных на противоположных стенках канала. В канале на длине L (рабочий участок) устанавливали несколько одинаковых препятствий с шагом $\delta = c_1 - c_2$ (рис. 1а). Перед и за рабочим участком размещали участки без препятствий длиной L_- и L_+ . Для сравнения рассматривали канал с рабочим участком с препятствиями в виде прямоугольных выступов с теми же значениями H , L , δ , h , L_- , L_+ , M_0 и τ (рис. 1б). Во всех случаях считали, что в начальный момент времени канал был заполнен неподвижной газовой взрывчатой смесью при температуре T_0 и давлении p_0 .

Численное моделирование распространения УВ в канале с препятствиями проводили на основе двумерных уравнений Навье – Стокса для вязкого сжимаемого газа, дополненных уравнениями энергии и химической кинетики, а также уравнением состояния идеального газа. Химическое превращение описывали одностадийной реакцией с аррениусовской зависимостью константы скорости K от температуры T : $K = kp^n \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$,

где R – газовая постоянная. Кинетические параметры константы скорости – энергию активации E , предэкспоненциальный множитель k и показатель степени n при давлении p (в атм) – предварительно калибровали по известным экспериментальным данным по задержкам самовоспламенения для выбранной топливно-воздушной смеси. Для интегрирования системы уравнений использовали метод конечных объемов с аппроксимаци-

ей потоков по Годунову [7]. Расчеты проводили на структурированных сетках с количеством ячеек до 200000, с максимальным размером ячейки 500 мкм и максимальным шагом интегрирования по времени 10 нс.

Расчеты проводили для стехиометрической пропано-воздушной смеси при следующих значениях определяющих параметров: $E = 190.3$ кДж/моль, $k = 7 \times 10^{14}$ см³/(моль · с), $n = -0.2264$, $L_- = 0.25$ м, $L = 0.76$ м, $L_+ = 0.19$ м, $H = 0.1$ м, $h = 0.025$ м, $p_0 = 298$ К, $T_0 = 0.1$ МПа, $M_0 = 3$ (начальная скорость УВ $D \approx 1020$ м/с) и $\tau \approx 800$ мкс. Ударную волну генерировали, предусматривая в начальный момент времени на участке L_- область высокого давления, заполненную воздухом с температурой $T_- = 1159$ К и давлением $p_- = 6.06$ МПа. В расчетах изменяли только параметры, определяющие форму препятствий. Отметим, что в прямом гладком канале без препятствий за время прохождения УВ всей длины канала смесь не самовоспламенялась.

При заданных определяющих параметрах наименьшее преддетонационное расстояние достигалось при использовании параболических препятствий, показанных на рис. 1а, с координатами общего фокуса $x_1 = x_2 = 0.065$ м, $y = 0.05$ м, и коэффициентами $c_1 = 0.08$ м и $c_2 = 0$. Самовоспламенение смеси происходило над пятым препятствием (на расстоянии около 0.4 м) приблизительно через 590 мкс после входа УВ в рабочий участок канала (рис. 2а). Из рис. 2 видно, что детонация образовалась перед седьмым препятствием приблизительно через 100 мкс после первого акта самовоспламенения: произошло слияние фронтов реакции и УВ. В дальнейшем полученная детонационная волна распространялась как по участку с препятствиями, так и по гладкому участку канала с постоянной средней скоростью, близкой к скорости Чепмена – Жуге. При использовании параболических препятствий другой формы детонация либо возникала на большем расстоянии, либо вовсе не возникала.

В канале с регулярными препятствиями в виде прямоугольных выступов детонацию в расчетах не наблюдали, хотя очаговое самовоспламенение газа на препятствиях возникало раньше (на втором препятствии). Дополнительные расчеты по-

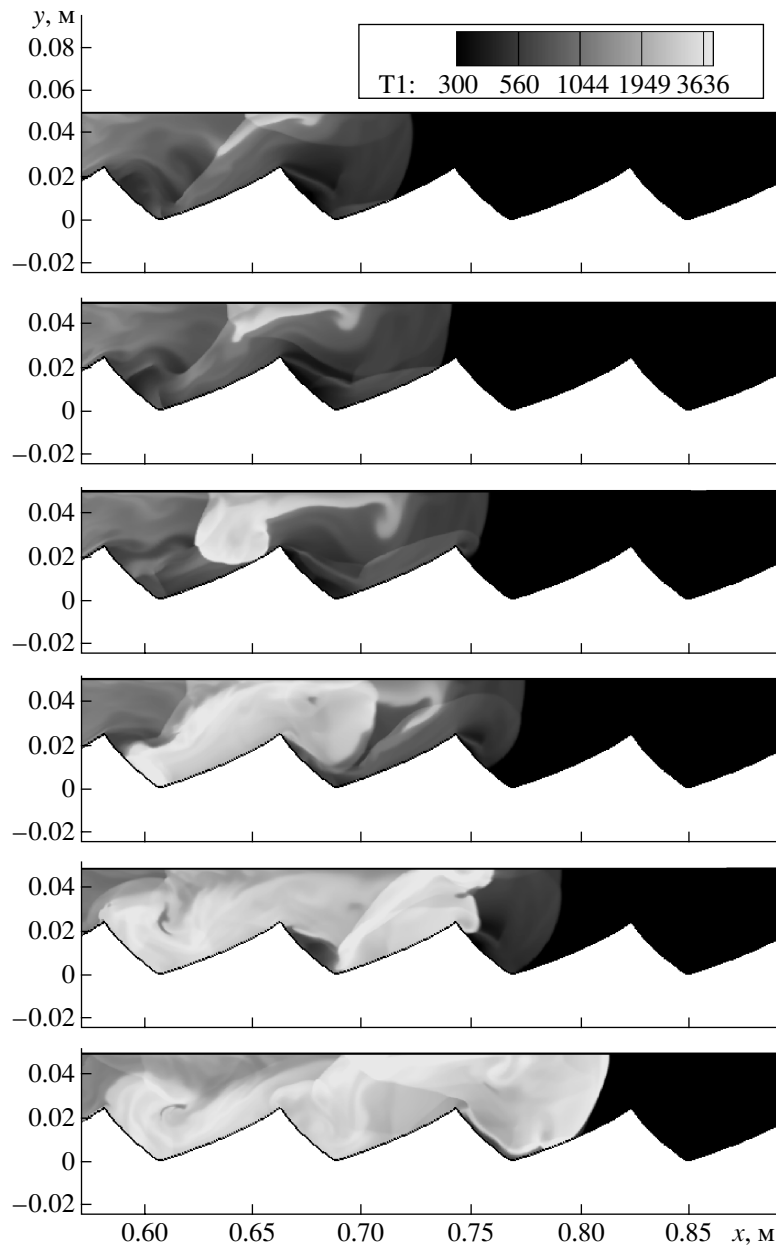


Рис. 2. Расчетные поля температуры в канале с регулярными параболическими препятствиями после самовоспламенения над пятым препятствием (верхнее поле) приблизительно через 590 мкс после входа УВ в рабочий участок с препятствиями. Последующие поля построены с шагом 20 мкс.

казали, что детонация в канале с препятствиями в виде прямоугольных выступов возникала лишь при числе Маха УВ, близком к 4.5, то есть при значительно большей интенсивности инициирующей УВ.

Отличительная особенность распространения УВ в канале с регулярными параболическими препятствиями найденной оптимальной формы – периодическая газодинамическая фокусировка отраженных волн давления в центральную часть фронта УВ в свободном ядре течения. В связи с этим в центральной части фронта УВ наблюдалось сту-

пенчатое локальное повышение температуры – своего рода “накачка” – вплоть до самовоспламенения достаточно большого объема газа в ядре течения над пятым препятствием. Расчеты показали, что в момент самовоспламенения в центральной части канала образовалась область ударно сжатой свежей смеси размером 10×3 мм и с температурой выше 2000 К. Самовоспламенение в этой области привело к образованию вторичной взрывной волны, отражению этой волны от препятствия и дальнейшему ускоренному ее распространению по свежей смеси, подготовленной к самовоспла-

Таблица 1. Сравнение измеренных скоростей УВ в трубе с регулярными препятствиями параболической и прямоугольной формы

Измерительная база, мм	Скорость УВ, м/с	
	параболич.	прямоуг.
570–695	1070 ± 30	1070 ± 30
695–1095	1061 ± 30	714 ± 20
1095–1605	836 ± 25	637 ± 20
1605–1925	1025 ± 30	1000 ± 30
1925–2255	1590 ± 50	970 ± 30

менению. Взаимодействие этой волны с аналогичным вторичным взрывом в фокальной области над шестым препятствием привело к возникновению детонации. При “неоптимальной” форме параболического препятствия 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 такой конфигурации канала с препятствиями детонация не возникала.

Для проверки результатов расчетов провели две серии экспериментов с препятствиями параболической и прямоугольной формы. Экспериментальная установка представляла собой лабораторную ударную трубу мембранного типа длиной 2,5 м с камерой высокого давления (КВД), предназначенной для генерации инициирующей УВ, и камерой низкого давления (КНД) с рабочим участком, оборудованным регулярными препятствиями. Камеру высокого давления диаметром 70 мм и длиной 0,1 м, отделенную от КНД разрывной мембраной, заполняли стехиометрической пропилено-кислородной 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 пропилено-воздушной смесью. Буферный участок отделяли от рабочего участка тонкой пленкой. Все опыты проводили в бронеканере при нормальном начальном давлении рабочей смеси (0,1 МПа) и температуре 290 ± 2 К. В опытах использовали регулярные препятствия той же формы и размеров, что и в расчетах, соответствующих рис. 1а и 1б. Препятствия изготавливали по шаблону из фанерного листа толщиной 7 мм, стягивали шпиль-

ками в пакет толщиной 100 мм и устанавливали на верхней и нижней стенках рабочего участка. Ударную волну инициировали, пережигая проводочку в КВД, что приводило к быстрому сгоранию пропилено-кислородной смеси и разрыву мембраны. Параметры 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.

В табл. 1 приведены результаты двух экспериментов с одинаковой (в рамках погрешности измерений) начальной интенсивностью УВ для препятствий разной формы. Видно, что при использовании препятствий параболической формы 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). Этот факт подтверждает результаты численного моделирования: профилированные препятствия более эффективны для ПУВД, чем препятствия прямоугольной формы.

На рис. 3 показаны осциллограммы давления, полученные в опытах с параболическими препятствиями при начальной скорости УВ 1070 ± 30 м/с (рис. 3а и табл. 1) и 920 ± 30 м/с (рис. 3б). В обоих случаях в опытах зарегистрирован ПУВД. На рис. 3б датчик давления, расположенный на выходе из рабочего участка (на расстоянии 1,605 м от мембранного узла) зарегистрировал сильную вторичную взрывную волну, которая быстро догоняла первичный ударный фронт, явление, наблюдаемое при численном моделировании ПУВД.

Таким образом, в работе предложен и подтвержден экспериментально новый способ сокращения расстояния и времени ПГД. Он заключается в использовании регулярных препятствий специальной формы, обеспечивающих самовоспламенение ударно сжатого газа в свободном ядре течения вблизи центральной части фронта инициирующей УВ с последующим быстрым ПУВД благодаря серии вторичных взрывов. Механизм ПУВД напоминает механизм инициирования детонации бегущим импульсом принудительного зажигания, когда вторичные взрывы за фронтом УВ возбуждаются внешним источником энергии. Подчерк-

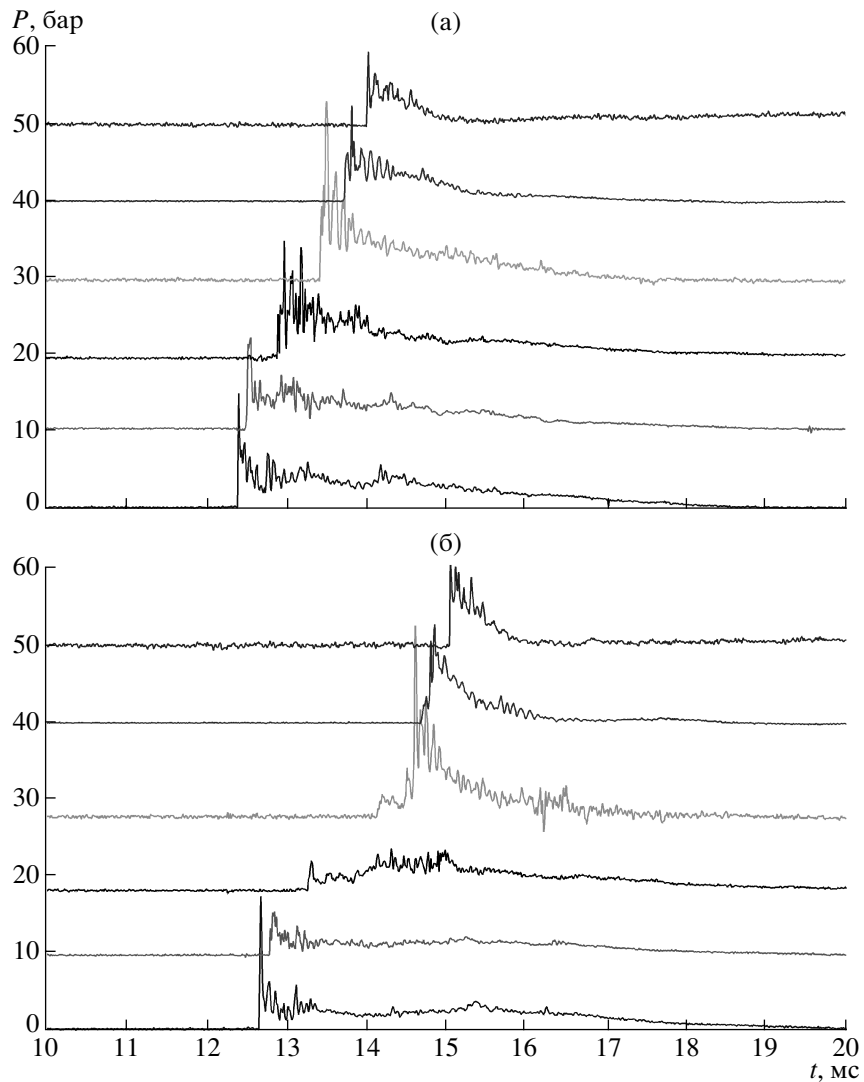


Рис. 3. Запись давления в опыте с ПУВД в канале с регулярными препятствиями параболической формы при скорости инициирующей УВ 1070 ± 30 м/с (а) и 920 ± 30 м/с (б).

нем, что для ПГД в круглых трубах кольцевые препятствия по своей эффективности аналогичны спирали Щелкина [1]. Следовательно, нами фактически показано, что профилированные регулярные препятствия более эффективны для ПУВД, чем препятствия прямоугольной формы и классическая спираль Щелкина.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (проект № 2740) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 05-08-50115).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С.М. Импульсные детонационные двигатели. М.: Торус Пресс, 2006.
2. Зельдович Я.Б., Когарко С.М., Симонов Н.Н. // ЖТФ. 1956. Т. 26. № 8. С. 1744–1752.
3. Щелкин К.И. Быстрое горение и спиновая детонация газов. М.: Воениздат, 1949.
4. Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А. // ДАН. 2004. Т. 394. № 2. С. 222–224.
5. Фролов С.М., Басевич В.Я., Аксенов В.С., Полихов С.А. // ДАН. 2004. Т. 394. № 4. С. 503–505.
6. Frolov S.M. // J. Loss Prevention. 2005. V. 19. № 2/3. P. 238–244.
7. Semenov I.V., Frolov S.M., Markov V.V., Utkin P.S. In: Pulsed and Continuous Detonations. Moscow: Torus Press, 2006. P. 159–169.