

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В ТРУБЕ С ПРОФИЛИРОВАННЫМ ПЕРЕСЖАТИЕМ СЕЧЕНИЯ

С. М. Фролов, В. С. Аксёнов

ИХФ РАН
г. Москва, Россия

Экспериментально показано, что установка в трубе осесимметричного препятствия специальной формы (сопла) позволяет обеспечить переход ударной волны (УВ) в детонацию в стехиометрической пропано-воздушной смеси при нормальных условиях при скорости УВ на входе в сопло выше 680 ± 20 м/с, что приблизительно соответствует числу Маха 2. Полученный результат важен для новых систем реактивного движения с детонационным сжиганием топлива.

Обеспечение быстрого перехода горения в детонацию (ПГД) в углеводородо-воздушных смесях при минимальной энергии зажигания — важнейшая фундаментальная проблема, решение которой открывает пути практического использования детонационного взрыва в перспективных силовых установках летательных аппаратов — импульсных детонационных двигателях (ИДД) [1]. В 2003–2008 гг. в ИХФ РАН выполнен цикл экспериментальных и теоретических исследований по сокращению длины и времени ПГД в трубах для смесей газообразных и жидких углеводородных горючих с воздухом [2]. Одно из наиболее простых и многообещающих решений — использование набора регулярных препятствий специальной формы, установленных внутри детонационной трубы [3]. Цель данной работы — экспериментальное исследование быстрого перехода слабой УВ в детонацию при дифракции на одном препятствии специальной формы — суживающе-расширяющемся сопле.

Эксперименты проводились в прямой круглой трубе длиной 4500 мм диаметром 52 мм (рис. 1, *a*) со стехиометрической пропано-воздушной смесью. Перед каждым опытом трубу вакуумировали, а

затем заполняли смесью до нормальных начальных условий (температура 293 ± 2 К, давление 1 атм). В качестве генератора УВ (ГУВ) использовали пороховой газогенератор, который представлял собой цилиндрическую камеру сгорания объемом 22 см^3 , оборудованную мембранным узлом с диаметром выходного отверстия 6 мм и пьезоэлектрическим датчиком давления Т6000 (датчик ДД1 на рис. 1, а). На расстоянии 2100 мм от среза выходного отверстия ГУВ устанавливали профилированное препятствие — сопло, состоящее из суживающейся конической секции длиной 17 мм и расширяющейся конической секции длиной 450 мм. Диаметр минимального сечения сопла — 27 мм. Профиль суживающейся конической секции соответствовал расчетному параболическому профилю № 5 в [4]. Расширяющаяся коническая секция представляла собой прямой конус и была значительно длиннее, чем в расчетах [4], для предотвращения быстрого затухания вторичных взрывных волн, возникающих в окрестности минимального сечения сопла. Для регистрации профилей давления и скорости УВ в трубе размещали пьезоэлектрические датчики давления ДД2–ДД9 типа ЛХ600. Сигналы всех датчиков регистрировались персональным компьютером с помощью повторителей и аналогового-цифрового преобразователя L-Card L-783. Система регистрации во всех опытах запускалась по достижении некоторого заданного напряжения на датчике ДД1.

Методика опытов заключалась в следующем. В газогенераторе размещали заряд пироксилинового пороха 12/7 СА массой от 2 до 3 г. Для зажигания заряда использовали навеску пористого пироксилинового пороха 0,3 г. Время горения пороха составляло около 10 мс, а максимальное давление в камере ГУВ изменялось в диапазоне от 500 до 1500 атм. Применение порохового газогенератора позволяло получать УВ с продолжительной фазой сжатия: время истечения пороховых газов превышало 1 мс. Использование мембран разной толщины из разного материала позволяло изменять максимальное давление в газогенераторе и, следовательно, начальную скорость первичной УВ.

На рис. 1, б приведены результаты 10 представительных опытов в виде значений средней скорости лидирующего фронта УВ на восьми измерительных базах 0–ДД2, ДД2–ДД3, ДД3–ДД4, ДД4–ДД5, ДД5–ДД6, ДД6–ДД7, ДД7–ДД8 и ДД8–ДД9. Измерительная база 0–ДД2 соответствовала расстоянию от среза отверстия

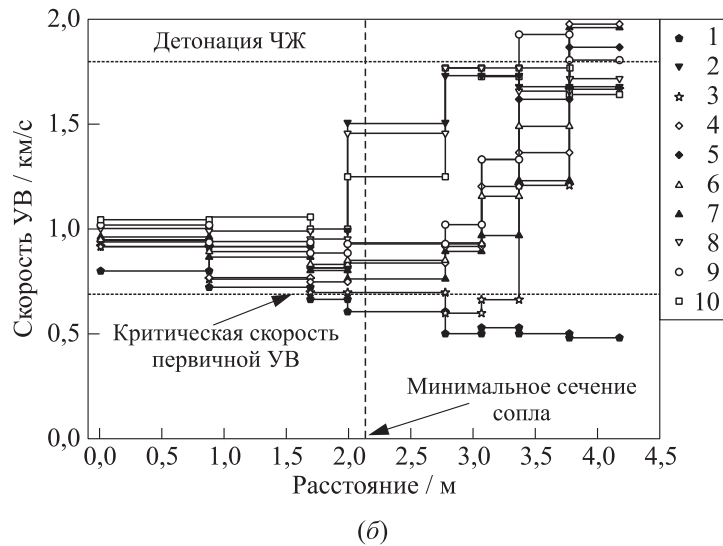
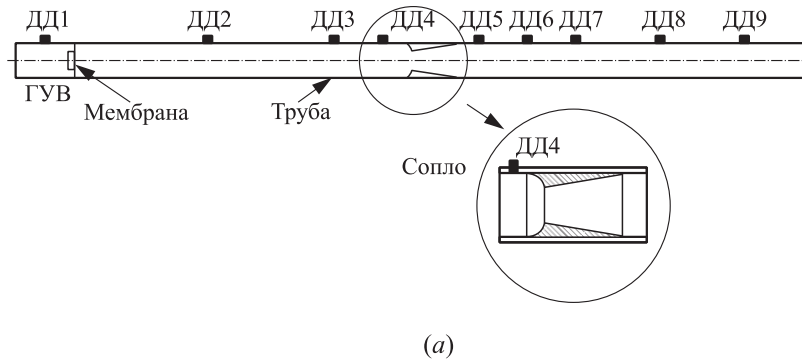


Рис. 1 Схема экспериментальной установки (а) и зависимость средней скорости лидирующего ударного фронта от пройденного расстояния на разных измерительных базах в 10 представительных опытах

мембранного узла ГУВ до датчика ДД2 (877 мм). Момент разрыва мембраны определяли по записи датчика ДД1. Вертикальной штриховой линией (отметка 2130 мм) показано расположение минимального сечения сопла. Штриховая горизонтальная линия соответствует скорости детонации Чепмена–Жуге (ЧЖ), ≈ 1804 м/с. Среднюю скорость УВ на каждой измерительной базе определяли по расстоянию между датчиками давления и интервалу времени между приходом фронта УВ на соответствующий датчик давления по осциллограмме. Погрешность определения средней скорости УВ не превышала 3%. Из рис. 1, б видно, что существует некоторое минимальное (критическое) значение средней скорости первичной УВ на входе в сопло, при котором в трубе происходит инициирование детонации, т. е. явление перехода УВ в детонацию носит пороговый характер. Полученное значение критической скорости для трубы длиной 4500 мм и диаметром 52 мм равно 680 ± 20 м/с. Для стехиометрической пропано-воздушной смеси при нормальных условиях эта скорость соответствует числу Маха УВ $M \approx 2$.

При средней скорости УВ на входе в сопло ниже указанного критического значения детонация не возникала (опыт № 1 на рис. 1, б). При средней скорости УВ на входе в сопло выше указанного критического значения происходил переход УВ в детонацию (опыты №№ 2–10 на рис. 1, б).

На рис. 2 показана зависимость преддетонационного расстояния от средней скорости первичной УВ на входе в сопло. При построении рис. 2 условно считали, что преддетонационное расстояние — это расстояние до точки, где скорость лидирующего фронта УВ достигает, по крайней мере, значения 1500 ± 45 м/с. Видно, что с увеличением скорости первичной УВ преддетонационное расстояние уменьшается. При скорости УВ выше 950–1000 м/с детонация возникает внутри сопла. Последнее представляется важным для организации рабочего процесса в ИДД. В отличие от традиционных представлений о том, что сопло предназначено для управления истечением продуктов детонации и, следовательно, удельным импульсом реактивной тяги ИДД, в данном случае сопло предназначено и для инициирования детонации, и для управления процессом истечения продуктов взрыва.

Таким образом, в работе экспериментально показано, что для инициирования детонации ударной волной в стехиометрической

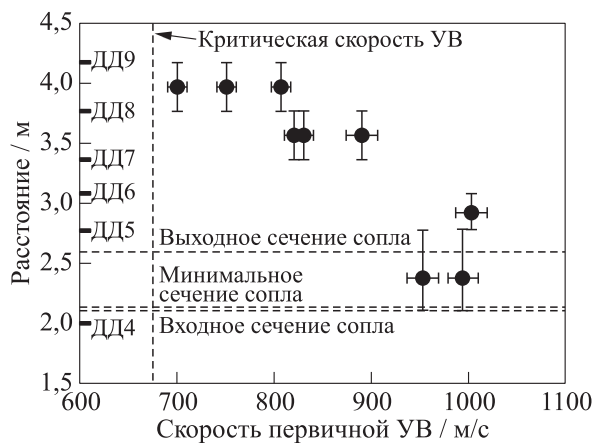


Рис. 2 Зависимость преддетонационного расстояния от средней скорости первичной УВ на входе в сопло

пропано-воздушной смеси в 52-миллиметровой трубе с препятствием специальной формы скорость УВ должна превышать 680 ± 20 м/с.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 08-08-00068) и Президиума РАН (Программа фундаментальных исследований № 11).

Литература

1. Импульсные детонационные двигатели // Под ред. С. М. Фролова. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2006.
2. Фролов С. М. Быстрый переход горения в детонацию // Химическая физика, 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.
3. Фролов С. М., Семенов И. В., Комиссаров П. В., Уткин П. С., Марков В. В. Сокращение длины и времени перехода горения в детонацию в трубе с профилированными регулярными препятствиями // Доклады Академии наук, 2007. Т. 415. № 4. С. 509–513.
4. Semenov, I. V., P. S. Utkin, and V. V. Markov. 2008. Numerical study of the influence of tube wall profile on shock-to-detonation transition. *7th ISHPMIE Proceedings*. 2:16–24.