
**ФИЗИЧЕСКАЯ
ХИМИЯ**

УДК 534.222.2

**ИНИЦИИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В ТРУБЕ
С ПРОФИЛИРОВАННЫМ ПРЕПЯТСТВИЕМ**

© 2009 г. С. М. Фролов, В. С. Аксенов

Представлено академиком А.А. Берлиным 29.12.2008 г.

Поступило 16.02.2009 г.

В данной работе впервые экспериментально показано, что установка в трубе осесимметричного препятствия специальной формы (сопла) позволяет обеспечить переход ударной волны (УВ) в детонацию в стехиометрической пропановоздушной смеси при нормальных условиях при очень низкой минимальной скорости УВ на входе в сопло – 680 ± 20 м/с, что приблизительно соответствует числу Маха, равному 2. Полученный результат важен для новых систем реактивного движения с детонационным сжиганием топлива.

Обеспечение быстрого перехода горения в детонацию (ПГД) в углеводородовоздушных 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, 2]. В 2003–2008 гг. в ИХФ РАН выполнен цикл экспериментальных и теоретических исследований по сокращению длины труб и времени ПГД в них для смесей газообразных и жидких углеводородных горючих с воздухом [3]. Одно из наиболее простых и многообещающих решений – использование набора регулярных препятствий специальной формы, установленных внутри детонационной трубы [4].

Цель данной работы – экспериментальное исследование быстрого перехода слабой УВ в детонацию при дифракции на одном препятствии специальной формы (суживающе-расширяющееся сопло).

Эксперименты проводили в прямой круглой трубе длиной 4500 мм диаметром 52 мм (рис. 1) со стехиометрической пропановоздушной смесью. Перед каждым опытом трубу вакуумировали, а затем заполняли смесью до нормальных начальных условий (температура 293 ± 2 К, давление 1 атм). В качестве генератора ударной волны

(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). На расстоянии 2100 мм от среза выходного отверстия ГУВ устанавливали профилированное препятствие – сопло, состоящее из суживающейся конической секции длиной 30 мм и расширяющейся конической секции длиной 450 мм. Диаметр минимального сечения сопла 27 мм. Профиль суживающейся конической секции соответствовал расчетному параболическому профилю № 5 в [5]. Расширяющаяся коническая секция представляла собой прямой конус и была значительно длиннее, чем в расчетах [5], 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. Расстояния (мм) от среза отверстия мембранного узла ГУВ до датчиков давления приведены ниже:

ДД2 – 877		ДД6 – 3066
ДД3 – 1691		ДД7 – 3366
ДД4 – 1991		ДД8 – 3774
ДД5 – 2776		ДД9 – 4174

Сигналы всех датчиков регистрировали персональным компьютером с помощью повторителей и аналогово-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 [6, 7]. 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. Продолжительность горения пороха составляла около 10 мс, максимальное давление в камере ГУВ изменяли в диапазоне от 500 до 1500 атм. Применение поро-

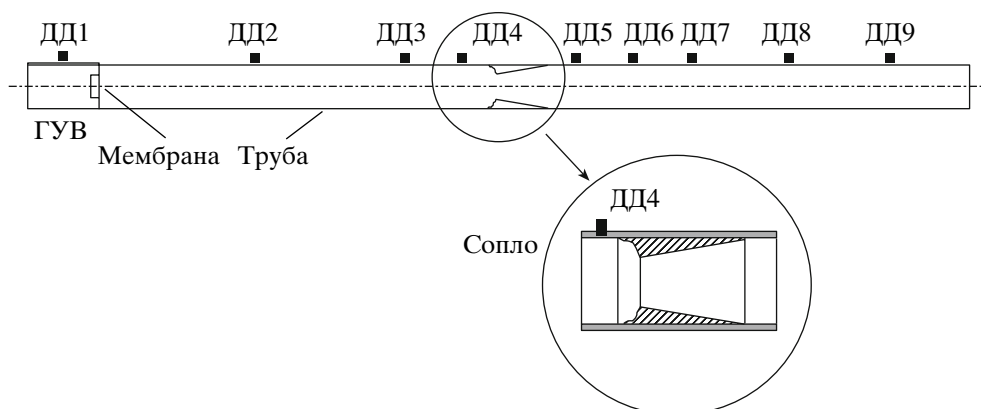


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

хового газогенератора позволяло получать УВ с продолжительной фазой сжатия: продолжительность истечения пороховых газов превышала 1 мс. Использование мембран разной толщины из различного материала позволяло изменять максимальное давление в газогенераторе и, следовательно, начальную скорость первичной УВ.

В табл. 1 и на рис. 2 приведены результаты десяти 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 мембранного узла ГУВ до датчика ДД2 (877 мм). Момент разрыва мембраны определяли по записи датчика ДД1.

На рис. 2 вертикальной штриховой линией (отметка 2130 мм) показано расположение минимального сечения сопла. Штриховая горизонтальная линия соответствует скорости детонации Чепмена–Жуге (ЧЖ), приблизительно 1804 м/с.

Среднюю скорость УВ на каждой измерительной базе определяли по расстоянию между соседними датчиками давления, а также по интервалу времени между приходом фронта УВ на соответствующие датчики давления по осциллограмме. Погрешность определения средней скорости УВ не превышала 3%. Из рис. 2 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 пропановоздушной смеси при нормальных условиях эта скорость соответствует числу Маха, $M \approx 2$.

При средней скорости УВ на входе в сопло ниже указанного критического значения детонация не возникала (опыт № 1, табл. 1). При средней скорости УВ на входе в сопло выше указанного

Таблица 1. Средняя скорость УВ (в км/с) на разных измерительных базах в 10 представительных опытах

№ п/п	0–ДД2	ДД2–ДД3	ДД3–ДД4	ДД4–ДД5	ДД5–ДД6	ДД6–ДД7	ДД7–ДД8	ДД8–ДД9
1	0.8002	0.7216	0.6667	0.6076	0.5009	0.5319	0.4964	0.4825
2	0.9164	0.9065	0.9934	1.5096	1.7365	1.7647	1.6790	1.6736
3	0.9193	0.7622	0.6993	0.7003	0.6017	0.6667	1.2107	1.6667
4	0.9410	0.7687	0.7500	0.8423	0.9206	1.2048	1.3645	1.9802
5	0.9533	0.9271	0.8197	0.8450	0.9295	1.2048	1.6190	1.8692
6	0.9606	0.8965	0.8287	0.8561	0.9416	1.1583	1.4891	1.9608
7	0.9659	0.8706	0.8065	0.7666	0.8951	0.9709	1.2326	1.9608
8	1.0057	0.9903	0.9524	1.4564	1.7683	1.7647	1.6585	1.7167
9	1.0198	0.9432	0.8902	0.9334	1.0247	1.3393	1.9336	1.8100
10	1.0465	1.0503	1.0033	1.2520	1.7683	1.7341	1.7739	1.6461

Примечание. Полужирным выделены скорости, по которым определяли преддетонационное расстояние (рис. 4).

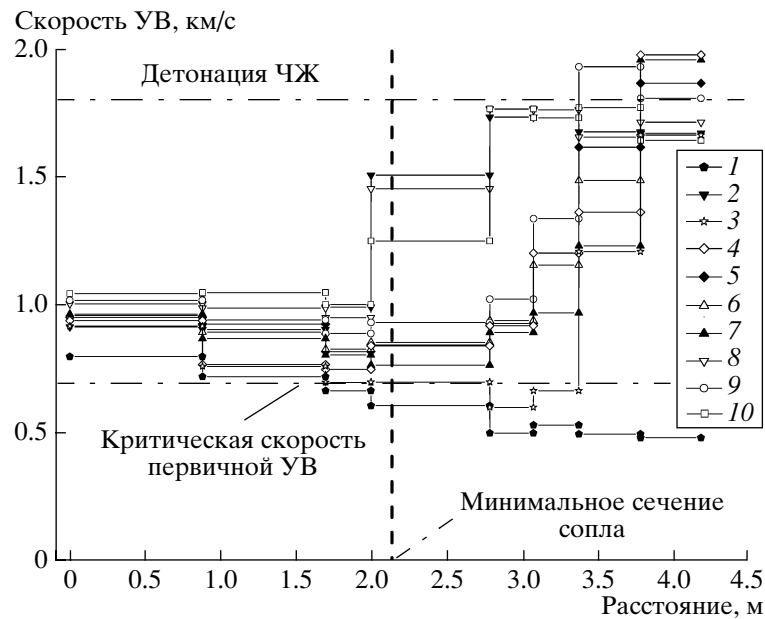


Рис. 2. Зависимость средней скорости лидирующего ударного фронта от пройденного расстояния на разных измерительных базах в 10 представительных опытах.

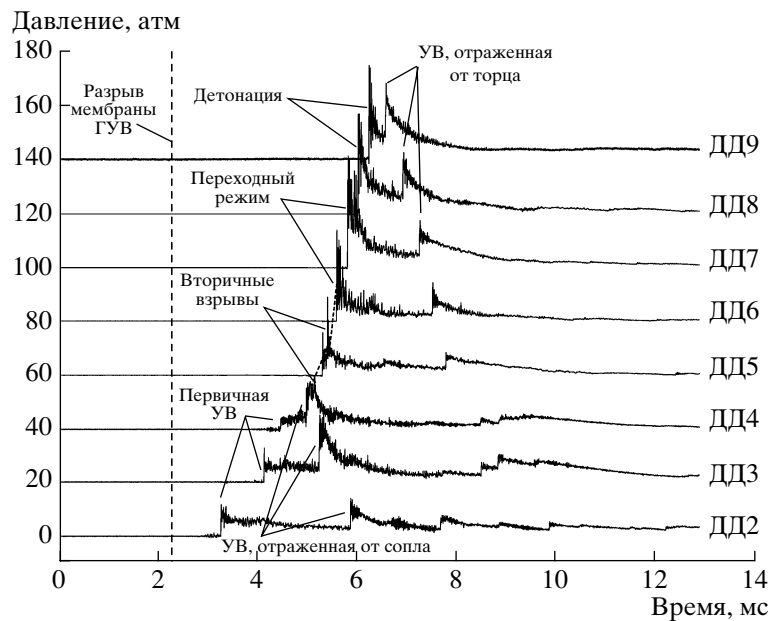


Рис. 3. Записи давления на датчиках ДД2–ДД9 в опыте № 9 с расшифровкой волновых явлений.

критического значения происходил переход УВ в детонацию (опыты № 2–10, табл. 1).

На рис. 3 показаны записи давления на датчиках ДД2–ДД9 с расшифровкой волновых явлений в одном из опытов с инициированием детонации (опыт № 9, табл. 1). Погрешность измерения давления оценивается как 30%. Вертикальная штриховая линия показывает момент разрыва мембраны в ГУВ. Из записи датчика ДД2 видно, что из-

быточное давление в первичной УВ постоянно в течение времени около 1 мс, а затем начинает медленно спадать в волне разрежения. Интенсивность первичной УВ по мере ее распространения вдоль трубы уменьшается, что следует из снижения ее амплитуды (записи ДД2–ДД4) и скорости (табл. 1). Средняя скорость УВ на входе в сопло в опыте № 9 составила 890 ± 30 м/с. После приблизительно 5 мс датчик ДД4, расположенный в 139 мм

от минимального сечения сопла, регистрирует ударный фронт большой интенсивности, соответствующий УВ, отраженной от стенок суживающейся секции сопла. За отраженной волной наблюдается пик давления, вызванный локальными взрывами ударно-сжатой смеси в сопле. Запись датчика ДД5, расположенного на расстоянии 196 мм от выходного сечения сопла, показывает, что вторичные взрывы приводят к возникновению интенсивного ударного фронта, распространяющегося в расширяющейся секции сопла, хотя измеренная средняя скорость лидирующей УВ внутри сопла повышается всего на 50 м/с. За этим ударным фронтом происходят дополнительные вторичные взрывы. Взрывные волны, догоняя друг друга, практически сливаются на записи датчика ДД6, приводя к резкому возрастанию амплитуды и скорости лидирующего ударного фронта. На измерительной базе ДД6–ДД7 переходный период еще продолжается (средняя скорость УВ равна 1340 ± 40 м/с). Наконец, датчики ДД8 и ДД9 регистрируют детонацию, распространяющуюся со скоростью 1930 ± 60 и 1810 ± 50 м/с на измерительных базах ДД7–ДД8 и ДД8–ДД9 соответственно. Средняя скорость детонационной волны на измерительной базе ДД8–ДД9 очень близка к скорости детонации ЧЖ. В дальнейшем детонационная волна, отразившись от закрытого конца трубы, распространяется по продуктам горения вверх по течению в виде затухающей УВ. Таким образом, в рассматриваемом опыте переход УВ в детонацию произошел на расстоянии около 3570 ± 204 мм от среза отверстия ГУВ. По отношению к соплу это расстояние составило приблизительно 1440 ± 204 мм от минимального сечения сопла и 990 ± 204 мм от выходного сечения сопла.

На рис. 4 показана зависимость преддетонационного расстояния от средней скорости первичной УВ на входе в сопло, построенная по данным табл.1. При построении рис. 4 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 увеличения длительности истечения продуктов детонации и, следовательно, повышения удельного импульса 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

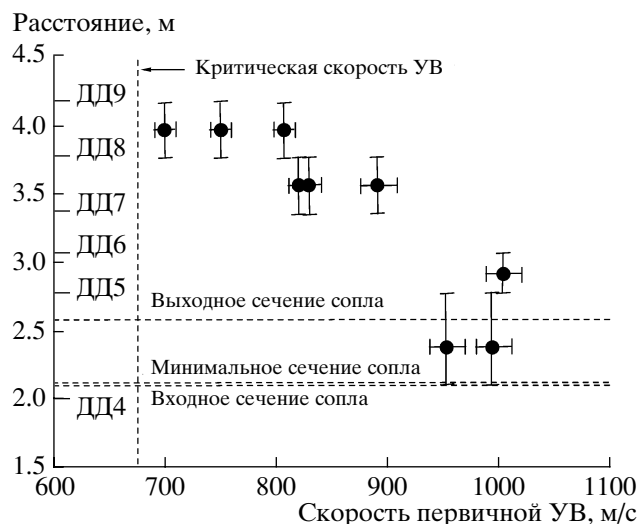


Рис. 4. Зависимость преддетонационного расстояния от средней скорости первичной УВ на входе в сопло.

ударной волной в стехиометрической пропановоздушной смеси в трубе с препятствием специальной формы скорость УВ должна превышать 680 ± 20 м/с. Такую УВ легко получить, например, заменив в используемой экспериментальной установке пороховой ГУВ и участок трубы перед соплом на секцию трубы со спиралью Щелкина. После зажигания взрывчатой смеси слабым источником ускорение пламени в секции со спиралью Щелкина приводит к образованию УВ, распространяющейся со скоростью на уровне 900–1000 м/с [8].

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фролов С.М. Импульсные детонационные двигатели. М.: Торус Пресс, 2006. 592 с.
2. Roy G.D., Frolov S.M., Borisov A.A., Netzer D.W. // Progress Energy and Combust. Sci. 2004. V. 30. № 6. P. 545–672.
3. Фролов С.М. // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 6. С. 31–44.
4. Фролов С.М., Семенов И.В., Комиссаров П.В. и др. // ДАН. 2007. Т. 415. № 4. С. 509–513.
5. Semenov I.V., Utkin P.S., Markov V.V. In: Proc. VII Intern. Symp. Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions. St. Petersburg, 2008. V. 2. P. 16–24.
6. Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я. // ДАН. 2006. Т. 410. № 1. С. 70–74.
7. Фролов С.М., Аксенов В.С., Шамшин И.О. // ДАН. 2008. Т. 418. № 5. С. 642–645.
8. Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я. // ДАН. 2005. Т. 401. № 2. С. 201–204.