

ИНИЦИИРОВАНИЕ ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В ТРУБАХ  
С КРУТЫМИ U-ОБРАЗНЫМИ ПОВОРОТАМИ

© 2007 г. С. М. Фролов, В. С. Аксенов, И. О. Шамшин

Представлено академиком Ал. Ал. Берлиным 05.03.2007 г.

Поступило 05.03.2007 г.

Впервые проведены экспериментальные и расчетные исследования распространения ударных и детонационных волн в трубах с двумя крутыми U-образными поворотами. Показано, что повороты существенно облегчают инициирование газовой детонации. Минимальная скорость ударной волны, требуемая для возбуждения детонации в стехиометрической пропановоздушной смеси при нормальных начальных условиях, оказалась близкой к 800 м/с. Полученные результаты важны для проектирования воздушно-реактивного импульсного детонационного двигателя (ИДД) с компактной компоновкой камеры сгорания.

Экспериментальные и расчетные исследования инициирования и распространения газовой и гетерогенной детонации до сих пор проводились в прямых трубах или трубах с поворотами малой кривизны [1, 2]. Однако недавно выяснилось [3–7], что крутые повороты и витки труб – элементы, которые значительно ускоряют переход горения в детонацию (ПГД). Ввиду важности этого вопроса для ИДД авторы предложили идею использовать компактные компоновки детонационных труб с несколькими U-образными поворотами [3]. С одной стороны, такие компоновки позволяют обеспечить ПГД за счет увеличения длины трубы и многократных отражений волн сжатия, образованных ускоряющимся пламенем, при их дифракции в U-образных поворотах. Однако, с другой стороны, U-образные повороты увеличивают гидравлическое сопротивление и осложняют циклическое заполнение трубы свежей горючей смесью. Следовательно, для применения таких компоновок в ИДД необходимо искать компромиссное решение, которое заключается в обеспечении ПГД на кратчайшем расстоянии. Известно, что длина ПГД сокращается с уменьшением диаметра трубы. Однако существует минимальный (предельный) диаметр трубы  $d_{\min}$ , при котором еще возможно распространение детонации. По дан-

ным разных авторов,  $d_{\min}$  находится в пределах от  $\frac{\lambda}{\pi}$  до  $\lambda$  [8], где  $\lambda$  – ширина ячейки многофронтной детонации (например, для стехиометрической пропановоздушной смеси при нормальных начальных условиях  $\lambda \approx 50$  мм).

Цель данной работы – экспериментальное и расчетное исследование распространения ударных и детонационных волн в стехиометрической пропановоздушной смеси в трубах околопредельного диаметра с двумя U-образными поворотами. Выбор пропана в качестве углеводородного горючего вызван тем, что по своей детонационной способности он близок к парам авиационного керосина [8].

На рис. 1 показана схема экспериментальной установки. Основные элементы установки – генератор первичной ударной волны (УВ) и детонационная труба с двумя U-образными поворотами. Генератор первичной УВ (пороховой газогенератор или электроразрядная камера) устанавливали на одном конце трубы. Другой конец трубы был закрыт. В экспериментах использовали гладкие трубы с внутренним диаметром 51 и 41 мм с U-образными поворотами предельной кривизны, обеспечивающими наиболее компактную компоновку трубы. Повороты были изготовлены с помощью электросварки из четырех сегментов, вырезанных из стандартного изогнутого элемента трубы. Внутренний радиус кривизны U-образных поворотов  $R = 11 \pm 2$  мм. Перед каждым опытом

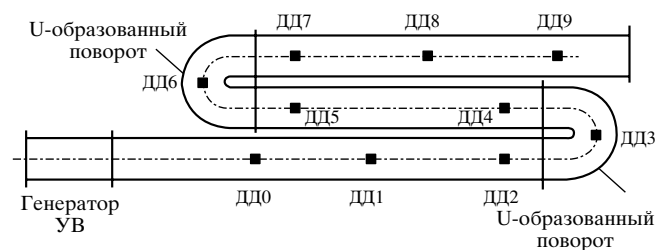
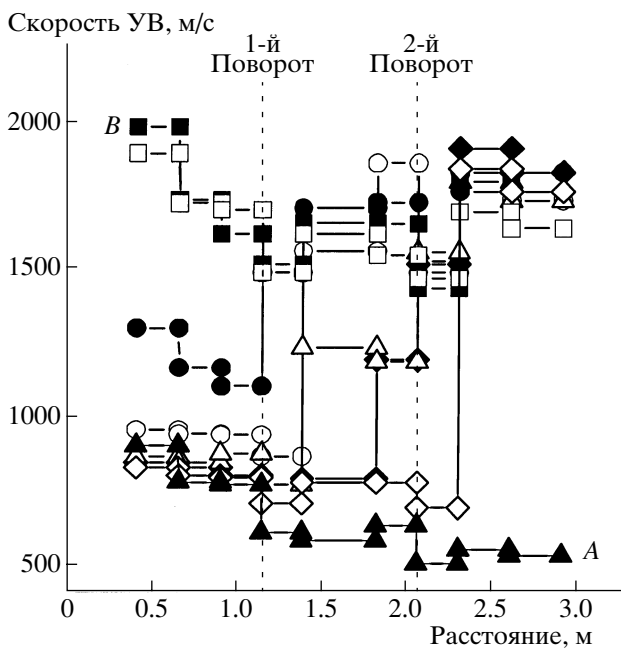


Рис. 1. Труба с двумя U-образными поворотами, генератором УВ и датчиками давления ДД0–ДД9, где ДД0 – запускающий датчик.

**Таблица 1.** Положение датчиков давления в трубах диаметром 51 и 41 мм

Датчики давления	Расстояние (мм) между датчиками для труб	
	$d = 51$ мм	$d = 41$ мм
ДД0	400	450
ДД1	650	750
ДД2	900	1050
ДД3	1140	1335
ДД4	1380	1590
ДД5	1816	1953
ДД6	2056	2241
ДД7	2296	2494
ДД8	2596	2794
ДД9	2896	3294

трубу вакуумировали, а затем заполняли стехиометрической пропановоздушной смесью при нормальных начальных условиях (температура  $293 \pm 2$  К, давление 0.1 МПа). Для регистрации профилей УВ в трубах и для определения скорости распространения этих волн использовали пьезоэлектрические датчики давления ДД0–ДД9 типа ЛХ600 (табл. 1). Погрешность определения



**Рис. 2.** Средняя скорость УВ на разных измерительных базах в трубе диаметром 51 мм с двумя U-образными поворотами. Символы использованы для упрощения идентификации кривых. Вертикальные штриховые линии соответствуют местоположениям датчиков давления ДД3 и ДД6 в U-образных поворотах.

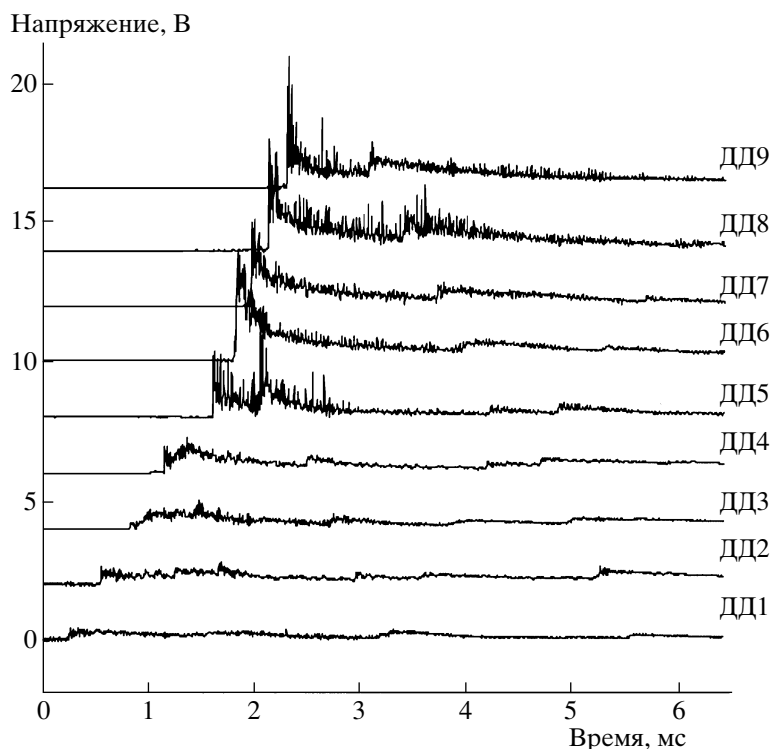
средней скорости УВ составляет не более 3%. Чтобы идентифицировать детонацию, в некоторых измерительных сечениях наряду с датчиком давления устанавливали фотодиод, который регистрировал свечение продуктов горения. Сигналы датчиков и фотодиодов направлялись в аналого-цифровой преобразователь (АЦП L-Card L-783) на базе персонального компьютера. Перед опытом в выходном прямом участке трубы размещали тонкую закопченную пластину, что позволяло дополнительно идентифицировать детонацию по следовым отпечаткам.

Пороховой газогенератор – цилиндрическая камера сгорания, оборудованная сменным расходным соплом и мембранным узлом. В газогенераторе размещали заряд пироксилинового пороха 12/7 ВА массой 1.5–2.5 г. Для зажигания заряда использовали таблетку пористого пироксилинового пороха массой 0.3 г с нихромовой проволочкой. Применение порохового газогенератора позволяло получать УВ с длительной фазой сжатия: время истечения пороховых газов составляло 1–2 мс. Использование мембран разной толщины из меди и стали, а также расходного сопла диаметром от 5 до 14 мм позволяло изменять начальную скорость первичной УВ.

Электроразрядный генератор создавал УВ треугольного профиля с короткой фазой сжатия: характерное время выделения энергии в электрическом разряде составляло 20–40 мкс. Начальную скорость первичной УВ изменяли, варьируя напряжение зарядки высоковольтного конденсатора емкостью 800 мкФ от 1.0 до 2.5 кВ. Таким образом, в экспериментах изменяли диаметр трубы, а также начальную скорость и длительность фазы сжатия первичной УВ.

Экспериментально обнаружено существование некоторой минимальной скорости УВ  $D_{\min}$  на входе в первый U-образный поворот, при которой на прямом участке трубы за вторым U-образным поворотом всегда регистрировали детонацию. В проведенных опытах эта минимальная скорость не зависела от диаметра трубы и используемого генератора УВ и была приблизительно равна 800 м/с (на измерительной базе ДД2–ДД3). При  $800 < D < 950$  м/с детонация возникала за вторым U-образным поворотом, а при  $D > 950$  м/с – за первым (рис. 2). Для сравнения укажем, что в трубе диаметром 51 мм с одним U-образным поворотом большего внутреннего радиуса кривизны ( $R = 51$  мм) детонация возникала за поворотом при скорости первичной УВ, превышающей 1100 м/с [3]. Отметим также, что для инициирования детонации в прямых трубах диаметром 51 и 41 мм требовались первичные УВ со скоростью 1700–1800 м/с.

На рис. 3 показаны характерные записи давления при возникновении детонации в трубе диа-



**Рис. 3.** Осциллограмма давления в опыте с инициированием детонации за вторым U-образным поворотом в трубе диаметром 51 мм.

метром 51 мм за вторым U-образным поворотом. В этом опыте скорость УВ на измерительных базах ДД0-ДД1, ДД1-ДД2, ДД2-ДД3, ДД3-ДД4, ДД4-ДД5, ДД5-ДД6, ДД6-ДД7, ДД7-ДД8 и ДД8-ДД9 соответственно составила  $D = 865, 844, 876, 769, 1237, 1188, 1558, 1796$  и  $1734$  м/с, т.е. на измерительных базах ДД7-ДД8 и ДД8-ДД9 зарегистрированы скорости, близкие к скорости детонации. В сечениях, где были расположены датчики ДД7 и ДД8, сигналы фотодиодов резко отклонялись от нулевой линии одновременно с сигналами датчиков давления – характерная особенность волны детонации, состоящей из ударного фронта и примыкающего к нему фронта реакции. На следующем сажевом отпечатке отчетливо отображались траектории тройных точек, образующих ячеистую структуру с шириной ячейки, близкой к диаметру трубы. Все отмеченные признаки указывают на то, что в данном опыте зарегистрирована детонация. Отметим, что расчетная термодинамическая скорость детонации Чепмена–Жуге в стехиометрической пропановоздушной смеси  $D_0 = 1804$  м/с. Тот факт, что измеренная скорость детонации оказалась несколько меньше термодинамической скорости, связан с потерями количества движения и энергии в трубе околопредельного диаметра.

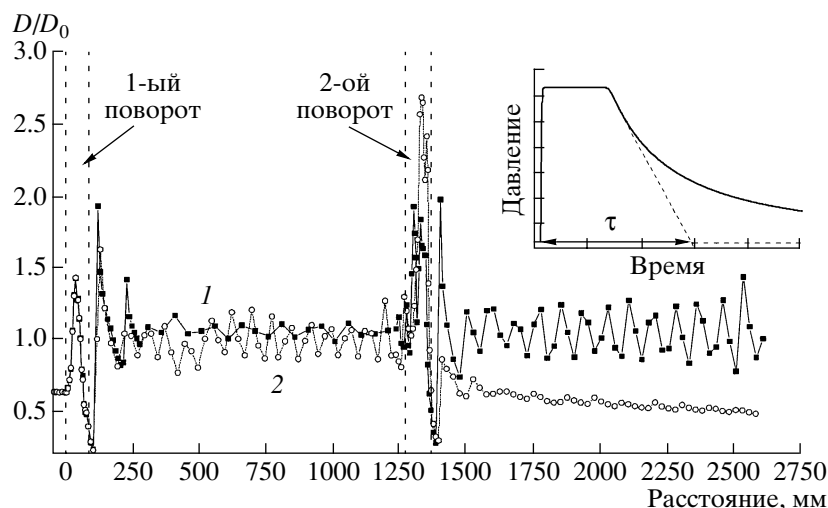
При  $D < 800$  м/с детонация в трубе не возникает (кривая А, обозначенная темными треугольни-

ками на рис. 2), хотя датчики давления регистрировали вторичные взрывы в области за первичной УВ.

При прямом инициировании детонации генератором первичной УВ ( $D = 1700–1800$  м/с) детонационная волна проходила через оба U-образных поворота с временным снижением скорости распространения на 15–20% и последующим ее восстановлением (кривые В, обозначенные темными и светлыми квадратами, рис. 2).

Для понимания изучаемых явлений провели двумерные газодинамические расчеты, основанные на численном решении уравнений Эйлера, дополненных одно- или многостадийным кинетическим механизмом окисления пропана [6]. Рассмотрели течения в плоских каналах высотой 41 и 51 мм с двумя U-образными поворотами предельной кривизны. Расчеты подтвердили основные закономерности наблюдаемых явлений и прояснили их механизмы. Кроме того, расчеты позволили выяснить влияние длительности фазы сжатия в первичной УВ на эволюцию волн разной интенсивности – эффект, который не был зарегистрирован экспериментально.

На рис. 4 показано расчетное изменение скорости УВ по мере распространения вдоль трубы для волн с одинаковой начальной скоростью  $\frac{D}{D_0} =$



**Рис. 4.** Расчетное изменение скорости УВ вдоль линии симметрии плоского канала высотой 51 мм с двумя крутыми U-образными поворотами. Начало координат соответствует входному сечению в первый поворот. Вертикальные линии соответствуют местоположениям входных и выходных сечений U-образных поворотов; кривая 1 – “длинная” УВ с длительностью фазы сжатия  $\tau = 600$  мкс, кривая 2 – “короткая” УВ с длительностью фазы сжатия  $\tau = 60$  мкс. На вставке – определение  $\tau$  по профилю давления в первичной УВ.

= 0.64, но с разной начальной длительностью фазы сжатия  $\tau$ : “короткой” волны ( $\tau \approx 60$  мкс) и “длинной” ( $\tau \approx 600$  мкс). На вставке рис. 4 показано определение  $\tau$  по профилю давления в первичной УВ. Видно, что в первом U-образном повороте скорость обеих УВ изменяется одинаково: сначала увеличивается приблизительно до  $\frac{D}{D_0} = 1.5$  в центре поворота, а затем снижается до  $\frac{D}{D_0} = 0.2$  на выходе из поворота. Резкое последующее увеличение скорости УВ до  $\frac{D}{D_0} = 1.65-1.95$  вызвано сильными вторичными взрывами у внешней стенки поворота и слиянием вторичных волн с первичной УВ. На прямом участке канала за первым U-образным поворотом обе УВ распространялись приблизительно с одинаковой средней скоростью, равной скорости детонации ( $\frac{D}{D_0} \approx 1$ ). Однако структура “длинной” волны состояла из трех поперечных волн (вызванных несколькими вторичными взрывами), а “короткой” – из одной. Это обстоятельство проявилось при дифракции волн во втором U-образном повороте: “короткая” волна не смогла преодолеть охлаждающее действие центрированной волны разрежения, возникшей на внутренней стенке поворота, а “длинная” преодолена. При этом во втором U-образном повороте отмечено очень высокое пересечение детонации (до  $\frac{D}{D_0} = 2-2.7$ ).

Таким образом, экспериментальные и расчетные исследования распространения ударных и детонационных волн в трубах с двумя крутыми U-образными поворотами показали, что повороты существенно облегчают инициирование газовой детонации. Минимальная скорость УВ, требуемая для возбуждения детонации в трубах внутренним диаметром 51 и 41 мм в стехиометрической пропановоздушной смеси при нормальных начальных условиях, оказалась близкой к 800 м/с (вместо 1700–1800 м/с в прямых трубах). Такие волны легко генерировать в прямой трубе со спиралью Щелкина с помощью слабого источника зажигания [4–6]. Механизм инициирования детонации в этом случае связан с многократными отражениями УВ при прохождении поворотов и вторичными взрывами. Полученные результаты важны для проектирования воздушно-реактивного импульсного детонационного двигателя для летательных аппаратов с компактной компоновкой камеры сгорания.

Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (проект 2740).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nettleton M.A.* Gaseous Detonations: Their Nature, Effects and Control. L.; N.Y.: Chapman and Hall, 1987.

2. Митрофанов В.В. Детонация гомогенных и гетерогенных систем. Новосибирск: Ин-та гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2003.
3. Frolov S.M., Aksenov V.S., Shamshin I.O. In: Nonequilibrium Processes. Vol. 1. Combustion and Detonation. Moscow: Torus Press, 2005. P. 348–364.
4. Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я. // ДАН. 2005. Т. 401. № 2. С. 201–204.
5. Фролов С.М., Аксенов В.С., Басевич В.Я. // ТВТ. 2006. Т. 44. № 2. С. 285–292.
6. Frolov S.M., Aksenov V.S., Shamshin I.O. In: Pulsed and Continuous Detonations. Moscow: Torus Press, 2006. P. 146–158.
7. Frolov S.M., Aksenov V.S., Shamshin I.O. // Proc. Combust. Inst. 2007. V. 31. P. 2421–2428.
8. Фролов С.М. Импульсные детонационные двигатели. М.: Торус Пресс, 2006.