

## ИНИЦИИРОВАНИЕ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ МНОГОСТРУЙНЫМ ПОТОКОМ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ

С. В. Хомик, С. П. Медведев, Б. Е. Гельфанд

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, khomik2000@yahoo.com

Экспериментально исследованы режимы взрывного превращения, инициируемые после взаимодействия детонационной волны с проницаемой перегородкой. Установлено, что за перегородкой могут реализовываться такие режимы взрывного превращения, как детонация, переход горения в детонацию, квазистационарный комплекс «ударная волна — фронт пламени» и затухающая ударная волна с отстающим от нее пламенем. Определено влияние чувствительности смеси и параметров перегородки на возможность реализации того или иного режима взрывного превращения, прослежена динамика их развития вблизи перегородки. Показано, что взаимодействие с перегородкой комплекса «ударная волна — фронт пламени» может приводить к инициированию детонации за ней.

Ключевые слова: детонация, инициирование детонации, переход горения в детонацию, проницаемая перегородка.

Как известно [1], перфорированная перегородка, расположенная на пути распространения газовой детонации, может приводить к разрушению ее структуры. В качестве условия разрушения ячеистой структуры детонационной волны принято соотношение  $d < \lambda$ , где  $d$  — диаметр отверстия в перегородке,  $\lambda$  — размер ячейки детонационной волны. В этом случае за перегородку проникают горячие струи продуктов реакции, которые следуют за сложной газодинамической структурой, формирующейся при взаимодействии ударных волн, генерируемых одиночными отверстиями. При определенных условиях [2] возможно инициирование детонации непосредственно за перегородкой на расстоянии 1–2 диаметров трубы. Этот случай идентифицируется как струйное инициирование детонации [1, 2]. К моменту возникновения детонации за перфорированной перегородкой формируется течение с неоднородным распределением давления и температуры, а в некоторых областях — и состава смеси за счет перемешивания с продуктами реакции. Масштаб и интенсивность неоднородностей при этом определяются геометрией перегородки и газодинамическими параметрами смеси. Механизм инициирования детонации в этом случае неизвестен, потому необходимо проведение дополни-

тельных исследований.

В работах [1–4] описаны также и другие режимы взрывного взаимодействия — переход горения в детонацию на некотором расстоянии от перегородки и образование комплекса из ударной волны и следующего за ней фронта реакции. Подобные комплексы могут образовываться и при взаимодействии детонационной волны с пористой преградой [5]. Общим для всех перечисленных случаев является формирование потока, состоящего из множества струй продуктов детонации. Этот высокоскоростной поток инициирует тот или иной режим взрывного превращения газовой смеси за проницаемой перегородкой.

Цель настоящей работы — исследование условий реализации недетонационных взрывных режимов, инициируемых за проницаемыми перегородками в смесях водород — кислород — азот. Помимо научного интереса, такие режимы взрывного превращения представляют и большой практический интерес, так как могут создавать в аварийных ситуациях большие, чем детонация, нагрузки [6, 7].

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились в детонационных трубах диаметром 54 и 141 мм, состоящих из двух секций, разделенных проницаемой перегородкой. Схема детонационной трубы и

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-03-00960-а).

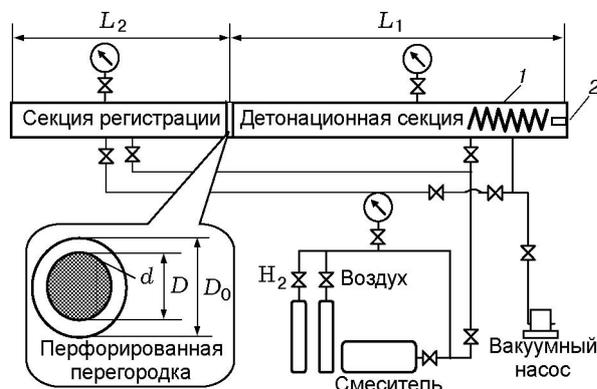


Рис. 1. Схема установки:

1 — препятствия в виде колец, 2 — взрывающаяся проволочка

система приготовления и напуска смеси показаны на рис. 1. Распространяющаяся к перегородке детонационная волна создавалась при помощи системы кольцевых препятствий (1) после поджигания смеси взрывающейся проволочкой (2). Скорость распространения детонации контролировалась на оснащенной двумя датчиками давления измерительной базе, расположенной непосредственно перед перегородкой. В ряде опытов проникаемая перегородка представляла собой перфорированный диск с равномерно расположенными отверстиями. В качестве параметра, описывающего свойства перфорированной перегородки, использовалось отношение  $Nd^2/D^2$ , где  $N$  — число сквозных отверстий диаметром  $d$ , расположенных внутри окружности диаметром  $D$ . Отношение этого диаметра к диаметру трубы  $D_0$  варьировалось в диапазоне  $D/D_0 = 0.14 \div 1$ . Размер отверстий  $d$  выбирался таким, чтобы выполнялось условие  $d < \lambda$  при заданных в эксперименте начальных условиях. В качестве проникаемой перегородки также использовались набор слоев сеток суммарной толщиной 16 мм с размером ячейки  $3 \times 5$  мм и слой металловаты (объемная плотность  $0.2 \text{ г/см}^3$ ) и металлорезины (объемная плотность  $2 \text{ г/см}^3$ ) с размерами пор, много меньшими размера детонационной ячейки. За перегородкой располагалась регистрационная секция, оснащенная датчиками давления и ионизационными датчиками. Соотношение длин секций  $L_1$  и  $L_2$  составляло  $L_1/L_2 = 1.5$  и  $2.5$  для труб диаметрами 54 и 141 мм соответственно.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Условия инициирования возможных режимов взрывного превращения при взаимодействии детонационной волны с различными проникаемыми перегородками исследовались в трубе диаметром 141 мм. В качестве проникаемых перегородок использовались как перфорированные, так и пористые преграды. На рис. 2 приведены результаты регистрации различных взрывных процессов за перегородкой в смеси 30%  $\text{H}_2 + 70\%$  воздуха для различного набора значений  $Nd^2/D^2$  и  $D/D_0$  при различном начальном давлении смеси. Штриховыми линиями на рисунке представлены  $x-t$ -диаграммы распространения фронта пламени вдоль секции регистрации, полученные при помощи ионизационных датчиков. Из рис. 2 видно, что существует ситуация, когда расстояние между ли-

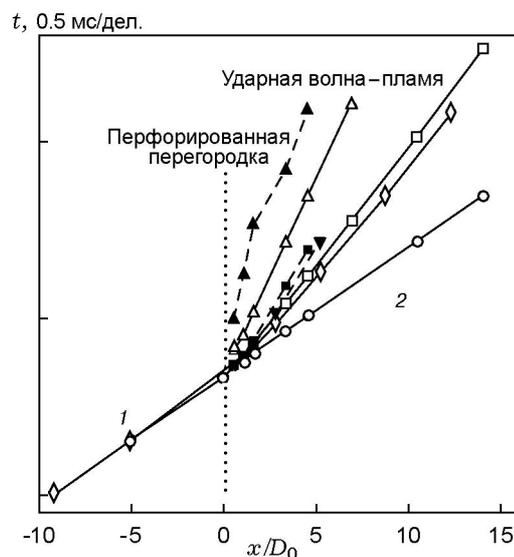


Рис. 2. Взрывные режимы в смеси 30%  $\text{H}_2 + 70\%$  воздуха в трубе диаметром 141 мм, инициируемые потоком продуктов реакции после распада детонационной волны на различных перфорированных перегородках:

сплошные линии — траектории ударной волны или детонации, штриховые — траектории фронта пламени, 1 — подходящая к перегородке детонационная волна, 2 — детонация после перегородки; кружки — детонация,  $p_0 = 1$  бар,  $d = 3.3$  мм,  $D = 110$  мм,  $Nd^2/D^2 = 0.58$ ; светлые значки — ударная волна, темные — пламя: квадраты —  $p_0 = 1$  бар,  $d = 3.6$  мм,  $D = 110$  мм,  $Nd^2/D^2 = 0.43$ ; треугольники —  $p_0 = 1$  бар,  $d = 3$  мм,  $D = 20$  мм,  $Nd^2/D^2 = 0.5$ ; ромбы —  $p_0 = 0.24$  бар,  $d = 6$  мм,  $D = D_0 = 141$  мм,  $Nd^2/D^2 = 0.33$

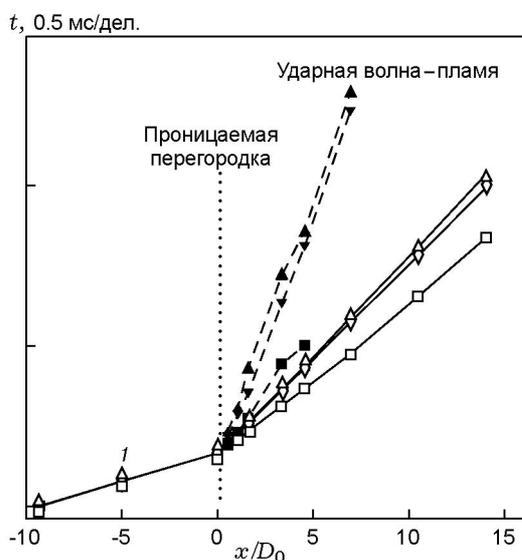


Рис. 3. Взрывные режимы в смеси 30 %  $\text{H}_2$  + 70 % воздуха в трубе диаметром 141 мм при  $p_0 = 1$  бар, инициируемые потоком продуктов реакции после распада детонационной волны на различных проницаемых перегородках:

сплошные линии — траектории ударной волны, штриховые — траектории фронта пламени, 1 — подходящая к перегородке детонационная волна; светлые значки — ударная волна, темные — пламя: квадраты — набор сеток,  $D = 110$  мм, ромбы — металлорезина,  $\rho = 2$  г/см<sup>3</sup>,  $D = 110$  мм, треугольники —  $p_0 = 1$  бар, металлота,  $\rho = 0.2$  г/см<sup>3</sup>,  $D = 110$  мм

дирующей ударной волной и фронтом пламени остается постоянным, т.е. имеется своего рода стационарный комплекс. В соответствии с рисунком это расстояние составляет примерно  $2D_0$  при  $D/D_0 = 0.14$  и  $Nd^2/D^2 = 0.5$ . Как показано на рис. 3, подобные режимы с квазистационарным комплексом могут реализовываться и в экспериментах с набором слоев сеток в качестве проницаемой перегородки. При использовании относительно плотных слоев металлота и металлорезины расстояние между фронтом ударной волны и фронтом пламени увеличивается по мере распространения процесса вниз по течению от перегородки.

Зависимость размера детонационной ячейки, которая может характеризовать чувствительность газовой смеси, от начального давления позволяет варьировать чувствительность смеси в широких пределах за счет изменения начального давления. Состав продуктов детонации при этом остается неизменным.

На рис. 4 представлены результаты инициирования взрывных режимов в смеси 30 %  $\text{H}_2$  + 70 % воздуха за перфорированной перегородкой в трубе диаметром 54 мм. Диаметр перфорированной части перегородки равнялся диаметру трубы, т.е.  $D/D_0 = 1$ . Как следует из представленной на рис. 4  $x-t$ -диаграммы, после разрушения подходящей к перегородке детонационной волны (линия 1) в зависимости от начального давления смеси за перегородкой могут реализовываться режимы детонации (линия 2), перехода горения в детонацию (линия 3) и формирования ударно-волнового комплекса (линия 4), распространяющегося по трубе примерно с постоянной скоростью  $\approx 1100$  м/с. Из рисунка видно, что до расстояний от перегородки  $x/D_0 \approx 2$  скорости всех наблюдаемых режимов примерно одинаковы и меньше, чем скорость детонации. После этого происходит инициирование детонации (кривая 2) или же на расстояниях  $x/D_0 \lesssim 6$

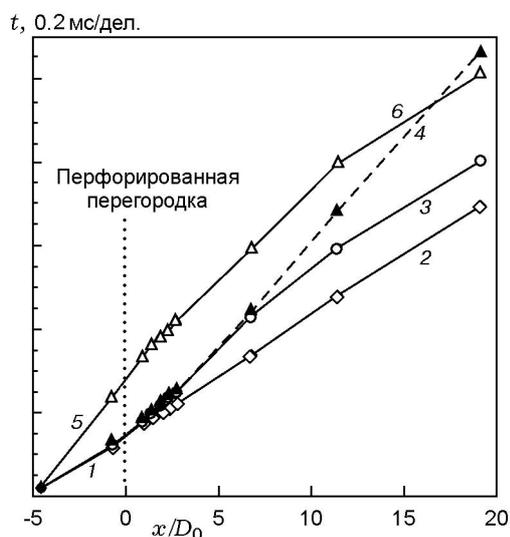


Рис. 4. Взрывные режимы в смеси 30 %  $\text{H}_2$  + 70 % воздуха в трубе диаметром 54 мм при различном начальном давлении, инициируемые потоком продуктов реакции после распада детонационной волны на перфорированной перегородке при  $D = D_0$  и  $Nd^2/D^2 = 0.33$ :

1 — детонация в смеси перед перегородкой, 2 — детонация за перегородкой при  $p_0 = 0.9$  бар, 3 — переход горения в детонацию при  $p_0 = 0.82$  бар, 4 — квазистационарный комплекс «ударная волна — фронт пламени» при  $p_0 = 0.7$  бар, 5 — комплекс «ударная волна — фронт пламени», подходящий к перегородке со скоростью 970 м/с при  $p_0 = 0.6$  бар, 6 — детонация вследствие перехода горения в детонацию

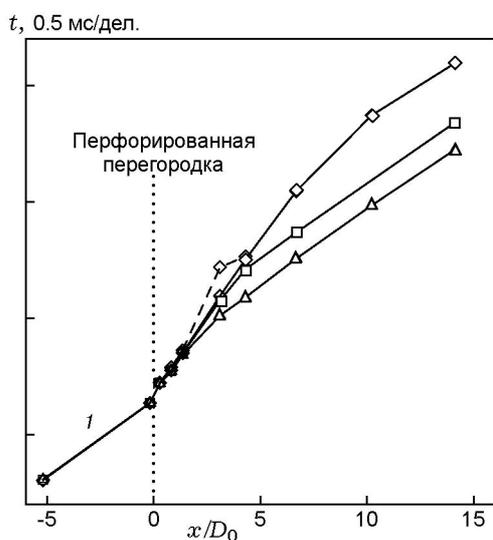


Рис. 5. Переход горения в детонацию в смеси  $2.1 \text{H}_2 + \text{O}_2 + 2.2\text{N}_2$  при  $d = 3.3$  мм,  $D = 52$  мм и  $Nd^2/D^2 = 0.44$  в трубе диаметром 141 мм в случае взаимодействия продуктов детонации с исходной смесью при различном начальном давлении:

1 — подходящая к перегородке детонационная волна, треугольники —  $p_0 = 1.65$  бар, квадраты —  $p_0 = 1.45$  бар, ромбы —  $p_0 = 1$  бар

(линии 3, 4) реализуются режимы со скоростями  $\approx 1100 \div 1200$  м/с. Далее в зависимости от чувствительности смеси возможен либо переход горения в детонацию (линия 3), либо иногда на расстоянии вплоть до  $x/D_0 \approx 20$  может распространяться квазистационарный комплекс из ударной волны со следующим за ней фронтом пламени (линия 4).

Использование кольцевых препятствий в детонационной секции трубы позволило исследовать взаимодействие комплекса «ударная волна — фронт пламени» с перфорированной перегородкой. Как показано в [8], после участка трубы с препятствиями в виде колец или спирали возможен широкий спектр различных взрывных режимов. Линия 5 на рис. 4 соответствует сформированному в заполненной кольцевыми препятствиями части трубы комплексу «ударная волна — фронт пламени», подходящему к перегородке со скоростью 970 м/с. После взаимодействия комплекса с перегородкой горение переходит в детонацию (линия 6) на расстоянии  $x/D_0 \approx 10$ , так же как и в случае подхода к перегородке детонации, но в более чувствительных смесях. Это обусловлено тем, что при отражении комплекса «ударная

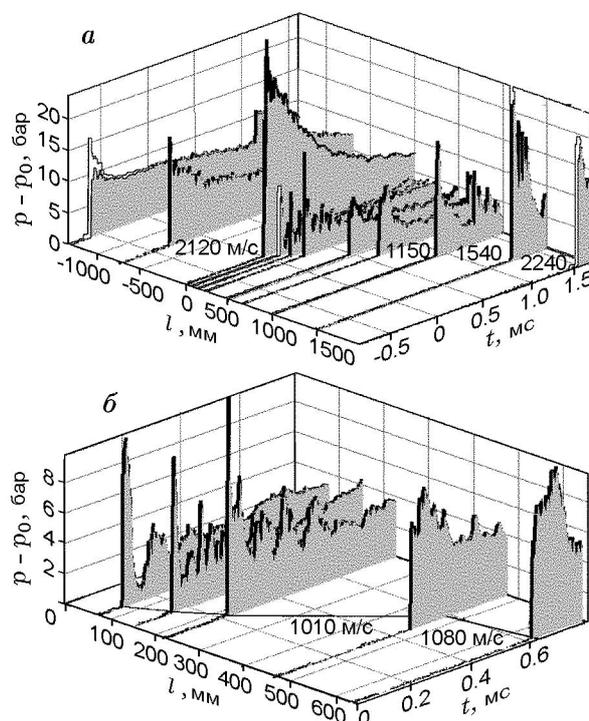


Рис. 6. Профили давления при переходе горения в детонацию (а) в смеси  $2.1 \text{H}_2 + \text{O}_2 + 2.2\text{N}_2$  при  $d = 3.3$  мм,  $D = 52$  мм и  $Nd^2/D^2 = 0.44$  в трубе диаметром 141 мм при взаимодействии продуктов детонации с исходной смесью при  $p_0 = 1$  бар:

б — начальный участок в увеличенном масштабе; сплошной линией показана траектория фронта пламени, цифры между профилями соответствуют скорости ударной волны на данной базе,  $l$  — расстояние от перегородки

волна — фронт пламени» от перфорированной перегородки возможно достижение уровня местного давления, существенно превышающего давление в отраженной детонационной волне. Аналогичное явление зафиксировано в работах [8, 9] в случае отражения от непроницаемой стенки. Таким образом, наличие проницаемой перегородки на пути распространения комплекса «ударная волна — фронт пламени» повышает опасность развития аварии, поскольку способствует переходу горения в детонацию. Несмотря на то, что проницаемая перегородка может служить локальным средством подавления детонации, формирование данного комплекса не исключает возможности перехода горения в детонацию с реализацией высоких значений местного давления.

Процесс перехода горения в детонацию по-

дробно исследован на примере смеси  $2.1\text{H}_2 + \text{O}_2 + 2.2\text{N}_2$  при различном начальном давлении и при  $D/D_0 = 0.37$  в трубе диаметром 141 мм, оснащенной датчиками давления и ионизационными датчиками. Соответствующие  $x-t$ -диаграммы приведены на рис. 5. Видно, что по мере увеличения чувствительности смеси при росте начального давления сокращается расстояние от перегородки до места возникновения детонации. Штриховая линия на рис. 5 соответствует фронту пламени. Только в смеси с наибольшим размером ячейки (наименьшее начальное давление  $p_0 = 1$  бар) фронт пламени отстает от ударной волны на расстояние до одного диаметра трубы. Представленные на рис. 6 профили давления, зарегистрированные в различных сечениях трубы и сопоставленные с траекторией фронта пламени, демонстрируют некоторые детали процесса перехода горения в детонацию. Характерной особенностью является возникновение за фронтом лидирующей ударной волны возмущения с большей амплитудой и дальнейшая эволюция к стационарной детонационной волне на расстоянии  $x/D_0 \approx 10$  от перегородки.

При  $p_0 > 1$  бар дистанция между фронтом ударной волны и фронтом пламени не превышает  $(0.1 \div 0.2)D_0$  при скоростях ударной волны в диапазоне  $1000 \div 1300$  м/с до расстояния  $x/D_0 \approx 4$ . Как видно из рис. 5, существует корреляция между начальным давлением смеси и расстоянием от перегородки до места возник-

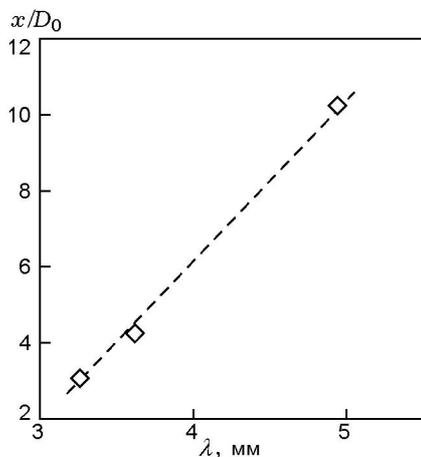


Рис. 7. Зависимость длины преддетонационного участка  $x/D_0$  от размера детонационной ячейки  $\lambda$  для смесей  $2.1\text{H}_2 + \text{O}_2 + 2.2\text{N}_2$  при различном начальном давлении

новения детонации. На рис. 7 в координатах  $\lambda-x/D_0$  представлена полученная зависимость. Размер ячейки рассчитывался по [9]. Заметим, что  $x/D_0 \rightarrow 0$  при размере ячейки  $\lambda \approx 2.5$  мм, что меньше, чем диаметр отверстия в перфорированной перегородке  $d = 3.3$  мм.

Как следует из проведенных опытов, после распада детонации на проницаемой перегородке за ней могут реализоваться в соответствии с уменьшением чувствительности смеси следующие режимы взрывного превращения газовой смеси: а) детонация, б) переход горения в детонацию, в) квазистационарный комплекс «ударная волна — пламя», г) затухающая ударная волна с отстающим от нее пламенем. Определена зависимость длины преддетонационного участка от чувствительности смеси и показана ее линейная связь с размером ячейки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Chao J., Lee J. H. S.** Detonation initiation at a turbulent interface // Proc. of 2002 Spring Technical Meeting. — The Combustion Institute Canadian Section, University of Windsor. — 2002. — P. 42.1.
2. **Medvedev S. P., Khomik S. V., Olivier H., Polenov A. N., Bartenev A. M., Gelfand B. E.** Hydrogen detonation and fast deflagration triggered by a turbulent jet of combustion products // Shock Waves. — 2005. — V. 14, N 3. — P. 193–203.
3. **Zhu Y. J., Chao J., Lee J. H. S.** An experimental investigation of the propagation mechanism of critical deflagration waves that lead to the onset of detonation // Proc. Combust Inst. — 2007. — V. 31, pt 1. — P. 2455–2462.
4. **Chao J., Yatsufusa T., Lee J. H. S.** Metastable Deflagration Waves // Proc. 21st ICDERS on CD. — Poitiers. — 2007. — Paper N 0240.
5. **Higgins A., Knystautas R., Lee J. H. S., Yoshinaka A.** Re-initiation of a detonation wave downstream of a packed bed // Proc. 16th ICDERS. — Poland. — 1997. — P. 543–545.
6. **Корарко С. М.** Исследование давления в торце трубы при нестационарном быстром горении // Журн. техн. физики. — 1958. — Т. XXVIII, № 9. — С. 2041–2045.
7. **Chan C. K., Dewit W. A.** Deflagration-to-detonation transition in end gases // Proc. 26th Symp. (Intern.) on Combustion. — 1996. — P. 2679–2684.
8. **Lee J. H. S., Knystautas R., Freiman A.** High speed turbulent deflagration and transition to detonation in  $\text{H}_2 + \text{air}$  mixtures // Combust. Flame. — 1984. — V. 56. — P. 227–239.

9. **Gavrikov A. I., Efimenko A. A., Dorofeev S. B.** A model for detonation cell size prediction from chemical kinetics // *Combust. Flame.* — 2000. — V. 120, N 1. — P. 19–33.

*Поступила в редакцию 8/VIII 2008 г.,  
в окончательном варианте — 13/X 2009 г.*

---