

4. Smith P.J., Smoot L.D. // *Combust. and Flame*. — 1981. — 42. — P. 277.
5. Lockwood F.C., Salooja A.P., Syed S.A. // *Ibid.* — 1980. — 38. — P. 1.
6. Celic I. // *Particulate Sci. Techn.* — 1988. — 6. — P. 53.
7. Blake T.R., Herline W.E., Schneyer G.P. // 87th National Meeting of the AIChE. — Boston, MA, 1979.
8. Launder B.E., Spalding D.B. *Mathematical models of turbulence*. — London: Academic Press, 1972.
9. Асланян Г.С., Майков И.Л. — М., 1993. — (Препр./ ИВТАН; № 2-364).
10. Bailey G.H., Slater I.W., Eisenblam P. // *British Chem. Eng.* — 1970. — 15. — P. 912.
11. Hinze J.O. // *Progr. Heat Mass Transfer*. — 1971. — 6. — P. 943.
12. Melville E.K., Bray N.C. // *Numerical Heat Transfer*. — 1979. — 22. — P. 647.
13. Badzioch S., Hawksley P.B.W. // *Industrial and Eng. Chem. Process Dev.* — 1970. — 9. — P. 521.
14. Field M.A., Gill D.W., Morgan B.B. et al. // *Combustion of Pulverized Coal*, BCURDA, Leatherhead, 1969.
15. Канторович В.В. *Основы теории горения и газификации твердого топлива*. — М.: Изд-во АН СССР, 1968.
16. Chu C.M., Churchill S.W. // *J. Phys. Chem.* — 1955. — 59. — P. 955.
17. Habib M.A., Whitelaw I.H. // *J. of Fluids Engineering*. — 1979. — 101. — P. 521.
18. Thurgood J.R., Smoot L.D., Hedman P.O. // *Combust. Sci. Technol.* — 1980. — 21. — P. 213.

127412, г. Москва,  
ИВТАН

Поступила в редакцию 6/VIII 1993,  
после доработки — 20/XII 1993

УДК 534.222.2 + 536.46

А. В. Пинаев

## О РЕЖИМАХ СГОРАНИЯ И КРИТЕРИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПЛАМЕНИ В ЗАГРОМОЖДЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Выполнен анализ проблемы. Проведены эксперименты с топливовоздушными смесями в пористой среде. Определены скорости, давления в волнах детонации и горения, критические начальные параметры и границы критерия Пекле. В оптических съемках обнаружено снижение средней скорости детонации и замедленное воспламенение в пористой среде при прохождении волны через свободный зазор.

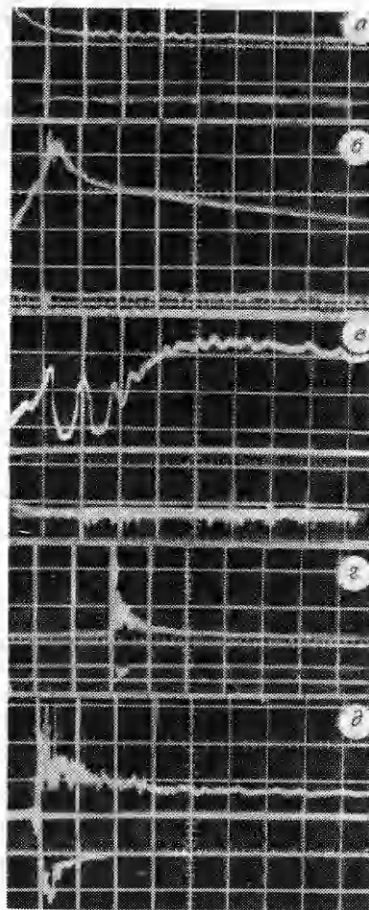
1. Часто на практике возникает опасность воспламенения и взрыва газовых смесей в условиях загроможденного пространства. В [1—4] выполнены исследования в ударных трубах с периодическими препятствиями в виде спиралей, колец, цилиндров и перегородок. Установлено, что взрывной процесс распространяется в виде квазистационарных волн сжатия с  $\approx 2-8$ -кратным перепадом давления во фронте, скорость волн в зависимости от активности газовых смесей меняется в диапазоне от 20—200 до 300—1800 м/с. В [1—4], как и в работе [5], где рассмотрены каналы переменного сечения, не ставилась цель определить пределы горения или детонации. Для обоснованного получения критерия взрывобезопасности авторам этих работ необходимо было бы перебирать большое количество вариантов взаимного расположения препятствий, отверстий (промежутков) и их размеров. Более приемлема для исследований, на наш взгляд, сыпучая пористая среда (ПС), обладающая геометрическим подобием при изменении размера частиц — с переходом к более мелкой или крупной фракции.

Применительно к проблеме огнепреградителей наиболее примечательные опытные данные о гашении или проскоке пламени через насадки с пористой средой получены в [6—8]. Подробная библиография по этому вопросу содержится в [7, 8]. В отличие от других работ в [6—8] установлено, что гашение пламени в пористой среде, узких каналах, зазорах, между сетками удовлетворительно описывается критерием Пекле [9]  $Pe \approx \text{const}$ . Здесь  $Pe = u_n c \rho d_k / \lambda$ ;  $u_n$  — нормальная скорость пламени;  $d_k$  — максимальный диаметр гасящего канала;  $c, \rho, \lambda$  — соответственно удельная теплоем-

© А.В. Пинаев, 1994

Рис. 1. Осциллограммы давления (верхний луч) и свечения (нижний луч) в волнах горения (а—в) и детонации (г, д) в пористой среде.

$\delta$ , мм: а — 5, б — 11,5, в — 5, г — 2,5, д — 11,5;  $\alpha$ , %: а—в — 15, г, д — 35;  $p_0$ , атм: а — 1,5, б — 0,8, в — 2, г, д — 1,0;  $D$ , м/с: а — 2,4, б — 85, в — 9,6, г — 575, д — 833;  $c_0$ , м/с: а—в — 370, г, д — 418;  $x$ , мкс/дел: а, б — 5000, в — 2000, г, д — 100;  $y$ , атм/дел: а—в — 0,53, г, д — 5,3.



кость, плотность и теплопроводность исходной смеси;  $\text{const} \approx 65$ . Физический смысл этого критерия состоит в том, что возможность проникновения пламени через канал зависит от свойств газовой смеси и ее химического состава, определяющего  $u_n$ , начального давления  $p_0$  и размера канала. Материал стенок среды практически не оказывает влияния, так как отвод тепла в стенки лимитируется теплопроводностью газа. В опытах [6] постоянно  $Re$  проверено при изменении  $u_n$  и  $d_k$  в 10—13 раз, разброс значений  $Re^*$  на пределе не превышал  $\pm 100\%$ .

В [10] установлена возможность применимости критерия Пекле для гашения детонации, переходящей из свободного объема в пористую насадку, что гипотетически объяснено вырождением волны детонации в дефлаграцию. В работах по проблемам взрывобезопасности и огнепреградителей изучены лишь условия гашения пламени в насадках, но не режимы сгорания. Для низкоскоростной детонации газов в трубах постоянного малого сечения выполнены эксперименты и предложена модель [11], описывающая структуру и пределы детонации. Однако для практической оценки пределов детонации в ПС, где механизм детонации и структура волны иные, такой точный подход будет малополезным и сложным.

2. Исследованию режимов распространения горения и детонации в пористой среде посвящены работы [12—23]. Ламинарные и турбулентные пламена со скоростями  $D \leq 5$  м/с изучались в [12—14], сверхзвуковые (детонационные) режимы на более активных смесях — в [15—17]. Весь диапазон скоростей процесса  $0,1-1 \leq D \leq D_{CJ} \approx (2-3) \cdot 10^3$  м/с ( $D_{CJ}$  — скорость детонации Чепмена — Жуге в свободном пространстве), включая режимы дефлаграционного, быстрого и детонационного горения, впервые реализован на ряде смесей в [18—23], где опыты выполнены при изменении начальных давлений  $p_0$  и размеров частиц  $\delta$  на 3 порядка. В ПС вблизи предела детонация для всех смесей распространяется со скоростью  $\approx 400-600$  м/с [18—23] без наличия поперечных волн, поэтому широко известная методика измерения размера ячеек неприменима для оценки взрывобезопасности смесей в загроможденном пространстве. По результатам измерения пределов детонации и горения в ПС рекомендован критерий существования режимов [20—23], в данной работе более подробные исследования выполнены для топливоздушных смесей (ТВС).

3. Для получения критерия взрывобезопасности газовых смесей в загроможденном пространстве определялись пределы детонации или горения по начальному давлению.

Эксперименты выполнены в ударных толстостенных трубах из стали и оргстекла длиной 700 мм и диаметрами соответственно 20 и 25 мм, размеры труб достаточны, чтобы результаты опытов не зависели от них. По длине труб расположены пьезодатчики [24] и световоды, в верхней части —

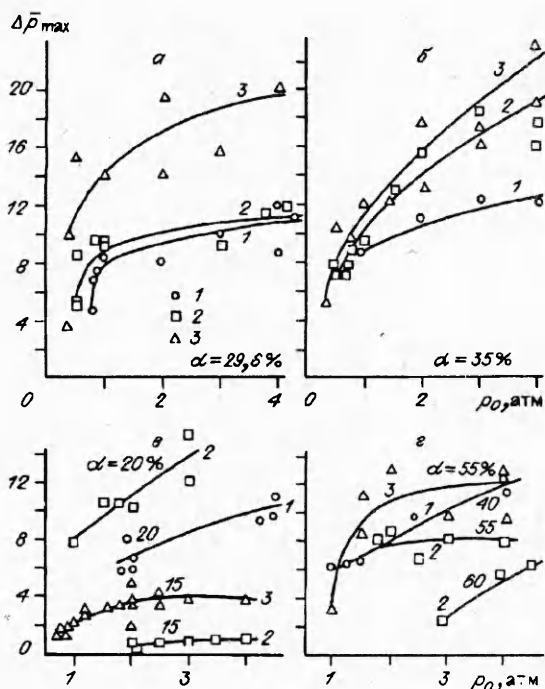


Рис. 2. Значения максимального относительного перепада давления  $\Delta p_{\max}$  в волнах быстрого горения и детонации в ПС для водородовоздушных смесей.  
 $\delta$ , мм: 1 - 2,5, 2 - 5,0, 3 - 11,5.

нихромовая спираль (или искровой промежуток) для поджигания смеси. Трубу с пористой средой предварительно откачивали, затем заполняли газовой смесью из отдельного баллона до необходимого давления.

В опытах проводили фоторегистрацию процесса с момента инициирования, измеряли скорость по длине трубы, давление и свечение в волне. Сигналы с пьезодатчиков подавали на вход осциллографа С8-14 через истоковый повторитель с входным сопротивлением

$\approx 10^9$  Ом. Вблизи предела  $p_0^*$  в опытах с бедными водородовоздушными смесями, где практически полностью отсутствовали свечение и перепад давлений в волнах горения, регистрация волн была возможна лишь с помощью высокочувствительных ионизационных датчиков на полевых транзисторах.

4. Исследовались смеси  $\alpha\text{H}_2 + (1 - \alpha)$  воздух,  $\beta\text{C}_2\text{H}_2 + (1 - \beta)$  воздух в ПС с шариками  $\delta = 2, 2,5, 4, 5$  и  $11,5$  мм,  $\alpha = 10, 15, 20$  и  $29,6$  (стехиометрическая смесь),  $35, 40, 50, 55$  и  $60$  %,  $\beta = 4, 5, 6, 7, 7,5$  (стехиометрическая смесь) и  $11$  %.

Измерения показали, что для ТВС скорость волн устанавливается на коротком участке ( $\approx 5 + 10\delta$ ). Дальнейшее постоянство скорости волны обеспечивается регулярностью структуры среды по длине потока.

Свечение в волнах медленного ( $D \leq 2 + 3$  м/с) горения для водородовоздушных смесей гораздо слабее, чем при детонации, и не регистрируется фотоумножителем, скачок давления в волне отсутствует и во времени слабо меняется (рис. 1, а). В промежуточном между медленным и быстрым (рис. 1, б) диапазоне скоростей ( $D \approx 5 + 10$  м/с) в волне на начальном участке регистрируется подъем давления  $\Delta p = \Delta p / p_0 \approx 0,3 + 1,5$  и профиль давления неустановившийся — наблюдается выделение убегающих вперед и затухающих более высокочастотных гармоник (рис. 1, в). Установившимся профилям давления и свечения в волне быстрого горения соответствует рис. 1, б.

Передний фронт давления в волнах детонации (рис. 1, г, д) круче, чем при быстром горении (см. рис. 1, б), с увеличением скорости крутизна фронта возрастает. При фиксированном  $p_0$  в крупной фракции (см. рис. 1, д), а также с ростом  $p_0$  свечение и последующее остывание продуктов реакции становятся более длительными, что задерживает спад давления в волне. В одной и той же смеси при фиксированных  $p_0$  и  $\delta$  результаты опытов воспроизводимы. В волнах детонации (условно  $D > c_0$ ,  $c_0$  — скорость звука в свободном объеме) на переднем фронте регистрируется короткий ( $\leq 20-40$  мкс) ударный предвестник с величиной давления в 2—4 раза меньше максимального.

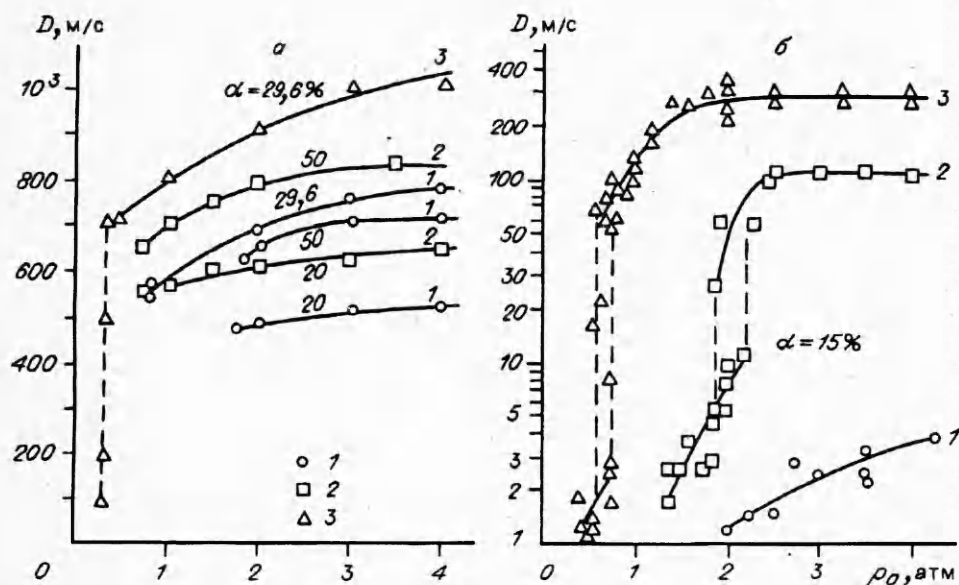


Рис. 3. Экспериментальные зависимости  $D(p_0)$  для смесей  $\alpha\text{H}_2 + (1 - \alpha)$  воздух.  
 $\delta$ , мм: 1 - 2,5, 2 - 5,0, 3 - 11,5.

В ПС зона реакции расположена вблизи переднего фронта, максимумы давления и свечения практически совпадают. Задержка свечения  $\tau_c$  (запаздывание пламени относительно переднего фронта детонации) незначительно возрастает с уменьшением интенсивности волны. Величина  $\tau_c$  имеет другую природу и не совпадает с задержкой воспламенения  $\tau_b$  для детонации в свободном пространстве — вблизи предела  $\tau_c$  на несколько порядков меньше  $\tau_b$ . Причина этого в наличии многочисленных препятствий, способствующих формированию принципиально иного, чем при ударном сжатии (струйного или турбулентным пламенем), механизма распространения зоны реакции. Механизм «переноса» зоны реакции, несмотря на значительное сопротивление среды и понижение скорости, обеспечивает существование детонации и нового режима — быстрого горения ( $D < c_0$ ) [22].

Результаты измерения максимального перепада давления  $\overline{\Delta p}_{\max} = (p_{\max} - p_0)/p_0$  в волнах реакции для водородовоздушных смесей приведены на рис. 2. Для режимов быстрого горения давление в пике ( $\overline{\Delta p}_{\max} \approx 1 \div 4$ ) заметно ниже, чем при детонации, где  $\overline{\Delta p}_{\max} \approx 3 \div 10$  вблизи предела и с удалением от него до  $p_0 = 4 \div 5$  атм  $\overline{\Delta p}_{\max}$  достигает 8—20 (см. рис. 2). Давление в волнах детонации и быстрого горения с ростом  $p_0$  и  $D$  увеличивается.

Поскольку в области максимума давления свечение наиболее яркое, зона реакции при детонации в газах сравнительно короткая, а спад давления и светимости обусловлен остыванием продуктов реакции, то, как и в свободном пространстве,  $\overline{\Delta p}_{\max}$  в ПС должно соответствовать давлению Жуге. Для стехиометрической водородовоздушной смеси (условия нормальные) по расчету  $D_0 = 1966$  м/с,  $\Delta p_{CJ} = 14,6$  [25]. В ПС, несмотря на значительно меньшую величину скорости детонации (400—1000 м/с),  $\overline{\Delta p}_{\max}$  сравнима и даже превышает  $\Delta p_{CJ}$  (при  $D_0 = 1966$  м/с) и относительный перепад давления в ударной волне для свободного пространства  $\Delta p_{yB} \approx 1,5 \div 10$  при  $D_{yB} = 400 \div 1000$  м/с. Этот факт можно объяснить подъемом давления за счет отражений волн от частиц и торможения потока газа в ПС.

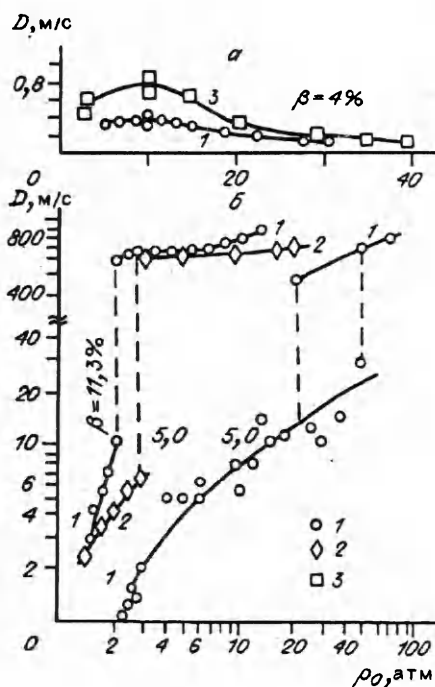


Рис. 4. Экспериментальные зависимости  $D(\rho_0)$  для смесей  $\beta\text{C}_2\text{H}_2 + (1 - \beta)$  воздух.  
 $\delta$ , мм: 1 - 2,0, 2 - 4,0, 3 - 5,0.

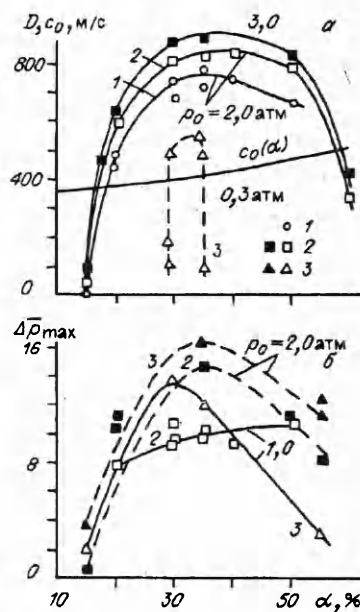


Рис. 5. Зависимости  $D(\alpha)$  (а) и  $\overline{\Delta p}_{\max}(\alpha)$  (б) в пористой среде для различных  $\delta$  и  $\rho_0$ .  
 $\delta$ , мм: 1 - 2,5, 2 - 5,0, 3 - 11,5.

При фиксированных  $\rho_0$  и составе смеси  $\overline{\Delta p}_{\max}$  выше в более крупной фракции частиц, что объясняется уменьшением доли теплотерь (см. рис. 2) и увеличением интенсивности волны.

Из экспериментальных зависимостей  $D(\rho_0)$  для водородовоздушных (рис. 3) и ацетиленовоздушных смесей (рис. 4) следует, что с удалением от стехиометрии расширяется область  $\rho_0$ , в которой реализуются разные режимы, а также диапазоны  $\rho_0$ , в которых могут осуществляться два режима (см. штриховые линии на рис. 4, б, г). Как правило, при турбулентных режимах горения с растущей зависимостью  $D(\rho_0)$  происходит скачкообразный переход при некотором  $\rho_0$  на режим детонации или быстрого горения. Этого нет при ламинарном горении ( $D \leq 1$  м/с), где с давлением скорость плавно падает (см. рис. 3, в).

Часть экспериментальных данных приведена на рис. 5 в виде зависимостей  $D(\alpha)$  и  $\overline{\Delta p}_{\max}(\alpha)$ . Выше кривой  $c_0(\alpha)$  лежит область детонации (рис. 5, а); ниже — детонационно-подобный режим (быстрого горения) и режим медленного горения. С уменьшением  $\rho_0$  и  $\delta$  область, охватываемая кривыми, сужается по вертикали и горизонтали. Для каждого  $\delta$  существует такое  $\rho_0^*$ , ниже которого режимы сгорания отсутствуют. На рис. 2—4 крайние левые точки для каждой кривой — это предельно возможные (критические) параметры  $D^*$ ,  $\overline{\Delta p}_{\max}^*$ ,  $\rho_0^*$ , определяемые в опытах с погрешностью 25—50 %.

Значения  $\rho_0^*$ ,  $D^*$  приведены в табл. 1, 2. Начальную плотность смеси рассчитывали по зависимости  $\rho_0 = \alpha\rho_1 + (1 - \alpha)\rho_2$ ;  $c_{p_0} = \alpha c_{p_1} + (1 - \alpha)c_{p_2}$  — удельная молярная теплоемкость, отнесенная к молекулярной массе  $\mu_0 = \alpha\mu_1 + (1 - \alpha)\mu_2$ ;  $\lambda_0 = \frac{\alpha\lambda_1 + (1 - \alpha)\lambda_2}{\mu_0}$  — теплопроводность водородовоздушных смесей;  $\lambda_0 = \beta\lambda_1 + (1 - \beta)\lambda_2$  — для ацетиленовоздушных. С учетом соотношений  $u_n = u_{n0}(\rho_0/\rho_{00})^g$  [7, 8] (где  $g = 0,09$  для водородовоздушных,  $g = 0$

Т а б л и ц а 1

$\alpha, \%$	$\kappa_0 \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$u_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ м/с}$	$\delta, \text{ мм}$	$d_{\text{п}}, \text{ мм}$	$p_0^*, \text{ атм}$	$D^*, \text{ м/с}$	$Re^*$
10	25,88	0,203	5	1,8	2,3	—	35
			11,5	4,14	0,85	—	27,2
15	28,51	0,381	2,5	0,9	1,8	1,15	22,8
			5	1,8	1,25	2	30,7
			11,5	4,14	0,35	1,25	17,6
20	31,24	0,737	2,5	0,9	1,75	470	39,1
			5	1,8	0,75	550	31
29,6	37,68	2,153	2,5	0,9	0,85	510	47,9
			5	1,8	0,45	575	43,1
			11,5	4,14	0,3	500	63,7
35	41,8	2,63	2,5	0,9	0,9	540	50,5
			5	1,8	0,48	580	50,9
			11,5	4,14	0,35	720	83
40	46,32	2,76	2,5	0,9	0,95	590	50,7
			5	1,8	0,55	700	55,9
50	55,93	2,5	2,5	0,9	1,6	610	67,1
			5	1,8	0,75	650	58,8
55	61,91	2,2	2,5	0,9	3,5		125,3
			5	1,8	1,75	720	117,7
			11,5	4,14	0,70	250	99,7
60	68,3	1,7	5	1,8	1,75	140	82,5

Примечание.  $a_{\text{п}} = \delta/2,777$  — максимальные размеры пор,  $u_{\text{H}_2\text{O}}$  — для  $p_0 = 1$  атм [7, 8, 26],  $\kappa_0 = \lambda_0/c_p \rho_0$  — температуропроводность при начальных условиях (для воздуха и водорода соответственно  $\kappa_0 = 21,3 \cdot 10^{-6}$  и  $14,79 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ ; при  $\alpha = 10 \%$  не удалось зарегистрировать датчиками волну и определить  $D^*$ ).

Т а б л и ц а 2

$\beta, \%$	$\kappa_0 \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$	$u_{\text{H}_2\text{O}}, \text{ м/с}$	$\delta, \text{ мм}$	$d_{\text{п}}, \text{ мм}$	$p_0^*, \text{ атм}$	$D^*, \text{ м/с}$	$Re^*$
4	20	0,35	2	0,72	6	0,4	75,6
			4	1,44	3	0,5	75,6
5	19,85	0,72	2	0,72	2,3	1	60
			4	1,44	1,4	2	73,1
6	19,7	1,1	2	0,72	1,8	1,5	72,4
			4	1,44	0,7	2	56,3
7,75	19,4	1,35	2	0,72	1,3	2	65,1
			4	1,44	0,6	5	60,1
11.	19	1,55	2	0,72	1,4	3	82,2

для ацетиленовоздушных смесей) приведенное выше соотношение для  $Re^*$  можно переписать в виде  $Re^* = (u_{\text{H}_2\text{O}} d_{\text{п}} / \kappa_0) (p_0 / p_{00})^{1+\beta}$  (здесь  $p_{00} = 1$  атм).

Установленные в работе значения  $Re^*$  для ТВС в пределах ошибки измерений  $p_0^*$  удовлетворительно совпадают с границами  $Re^* = 65 \pm 45$ , определенными ранее в [21—23]. При нормальных начальных условиях критическое расстояние между препятствиями (когда невозможно распространение пламени или детонации)  $d_n^* \leq Re^* \kappa_0 / u_{\text{H}_2\text{O}}$ . Оценка величины этого зазора для различных смесей показывает, что значение  $d_n^* \leq 10^{-4} \div 10^{-1}$  м достаточно мало, и на практике опасность воспламенения газов может быть обеспечена лишь мелкодисперсной пористой средой.

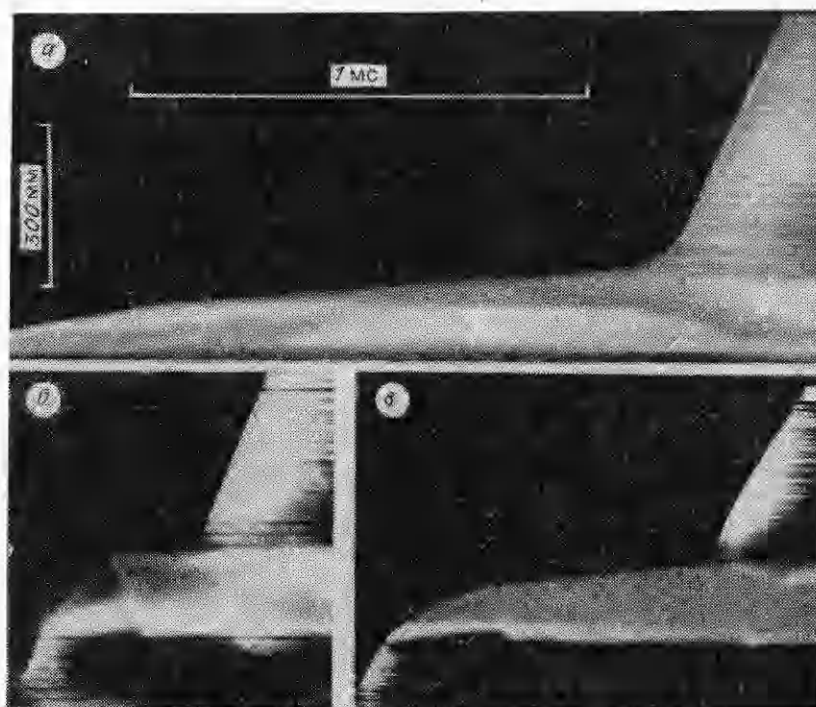


Рис. 6. Фоторазвертки детонации в пористой среде со свободными зазорами сверху (а) и в средней части (б, в), смесь 7,75 %  $C_2H_2$  + 92,25 % воздух.  
 а)  $p_0 = 1,5$  атм,  $\delta = 11,5$  мм; б)  $p_0 = 1,5$  атм,  $\delta = 11,5$  мм; в)  $p_0 = 1,5$  атм,  $\delta = 5$  мм.

В оптических исследованиях часть закрытой с торцов трубы была свободна от пористой среды (сверху, снизу или в центре) и заполнена той же газовой смесью. В двух последних случаях пористая среда подвешивалась с помощью металлической сетки с ячейкой  $\leq \delta$ . Опыты выполнены с ярко светящейся стехиометрической смесью ацетилена с воздухом, инициирование осуществлялось маломощной высоковольтной искрой. На рис. 6 приведены типичные фоторазвертки процесса с зазорами соответственно 150 и 160 мм сверху (а) и в средней части ПС (б, в). После инициирования искрой распространению и проникновению пламени в ПС препятствуют бегущие впереди него волны сжатия, отраженные от поверхности ПС (рис. 6, а). Затем с поверхности ПС волна быстро (за 0,2 мс) разгоняется на длине  $\approx 9\delta$  до стационарной скорости 1760 м/с.

В опытах с центральным зазором после выхода детонации из ПС происходит ослабление волны из-за резкого увеличения поперечного сечения и изменения механизма ее распространения, скорость фронта для  $\delta = 11,5$  мм падает до 1140 м/с (на 35 %), а для  $\delta = 5$  мм — до 600 м/с (на 55 %). Затем пламя (свечение) отстает от ударного фронта, и после отражения ударной волны от верхней границы ПС, когда часть потока у стенки останавливается, скорость светящихся продуктов, осуществляющих поджигание, замедляется до  $\approx 10-10^2$  м/с (см. рис. 6, б, в). Детонация в верхней части ПС возбуждается после одного или нескольких отражений ударной волны в зазоре, когда горячие продукты вступят в непосредственный контакт с ПС. Для зазора  $l_3 = 160$  мм задержка инициирования в нижней части ПС достигает 1—2 мс при 1—1,5 атм, а для  $l_3 = 320$  мм — 2—4 мс. Такие снимки не приводятся из-за их значительной протяженности. Возможно, что в менее активных смесях наблюдались бы и случаи отказов, когда пламя затухает и не доходит до поверхности ПС.

Аналогично, с таким же замедлением, происходит и сгорание газа в нижней части трубы (зазоре) после выхода детонации из ПС. Серия отражений ударной волны в зазоре приводит к тому, что светящиеся продукты

движутся неравномерно, иногда поворачивая назад, но постепенно (через 1—2 мс) газ загорается и у торца трубы.

Результаты оптических исследований в какой-то степени неожиданны, поскольку, несмотря на создание в ПС крупных пустот, уменьшающих общее сопротивление потоку газа, происходит снижение средней скорости волны детонации и замедление воспламенения на участках ПС за пустотами. Изменение механизма распространения детонации после выхода ее из ПС в свободный объем приводит к ослаблению волны. Эти свойства могут быть использованы для создания замедлителей поджигания. Исследования в такой постановке полезны для выяснения причины отказов при возбуждении горения в ПС с малоактивными смесями (см. [20, 23]).

На основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы. Показано, что в пористой среде, заполненной топливовоздушными (как и кислородными) смесями, возможны режимы медленного, быстрого и детонационного горения. Обнаружен достаточно высокий относительный перепад давления во фронте детонации ( $\approx 10-20$ ), который может быть объяснен влиянием отражений ударной волны от частиц ПС и торможением потока о ПС. Критерий Пекле  $Pe^* = 65 \pm 45$  позволяет оценивать для режимов горения и детонации в кислородных и ТВС безопасное критическое давление либо величину критического зазора. Оптические исследования позволили обнаружить ослабление волны детонации после ее выхода из пористой среды в свободный объем и значительное (до нескольких миллсекунд) замедление воспламенения топливовоздушной смеси газа в пористой среде за пустотами из-за тормозящего действия на зону реакции отраженных волн — в целом эти эффекты приводят к снижению средней скорости распространения волны детонации в ПС.

Работа выполнялась по гранту ИГиЛ СО РАН и гранту Российского фонда фундаментальных исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Lee J.H.S., Knystautas R., Freiman A. High speed turbulent deflagrations and transition to detonation in  $H_2$ -air mixtures // Comb. Flame. — 1984. — 56, N 2.
2. Moen I.O., Donato M. et al. Flame acceleration due to turbulence produced by obstacles // Ibid. — 1980. — 39, N 1.
3. Moen I.O., Lee J.H.S. et al. Pressure development due to turbulent flame propagation in large-scale methane — air explosions // Ibid. — 1982. — 47, N 1.
4. Chan C., Moen I.O., Lee J.H.S. Influence of confinement on flame acceleration due to repeated obstacles // Ibid. — 1983. — 49, N 1.
5. Субботин В.А., Кузнецова А.Я. Режимы сгорания взрывчатых газовых смесей в каналах переменного сечения // Динамика сплошной среды. — Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1984. — Вып. 68.
6. Шаулов Ю.Х. Распространение пламени через пористые среды. — Баку: Изд-во АН АзССР, 1954.
7. Стрижевский И.И., Заказнов В.Ф. Промышленные огнепреградители. — М.: Химия, 1966.
8. Розловский А.И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. — М.: Химия, 1980.
9. Зельдович Я.Б. Теория предела распространения тихого пламени // ЖЭТФ. — 1941. — 11, № 1.
10. Заказнов В.Ф., Розловский А.И., Стрижевский И.И. Гашение детонации и особенности ее распространения в узких каналах // ФГВ. — 1967. — 3, № 2.
11. Манжалей В.И. Физическая модель низкоскоростной детонации в газе: Тез. докл. на Всесоюз. симп. "Газодинамика взрывных и ударных волн, детонационного и сверхзвукового горения". — Алма-Ата, 1991.
12. Бабкин В.С., Бунев В.А., Коржавин А.А. Распространение пламени в пористых инертных средах // Горение газов и натуральных топлив. — Черногловка, 1980.
13. Коржавин А.А., Бунев В.А. и др. О зоне пламени при горении газа в инертной пористой среде // ФГВ. — 1982. — 18, № 6.
14. Бабкин В.С., Бунев В.А. и др. Горение газа в закрытом сосуде с инертной высокопористой средой // Там же. — 1985. — 21, № 5.
15. Попов О.Е., Когарко С.М., Фотеенков В.А. О быстром горении газовой смеси в средах с высокой пористостью // Докл. АН СССР. — 1974. — 219, № 3.
16. Мамонтов Г.М., Митрофанов В.В., Субботин В.А. Режимы детонации газовой смеси в жесткой пористой среде // Детонация. — Черногловка, 1980.
17. Kaufman C.W., Yan Chuajan, Nicholls J.A. Gaseous detonations in porous media // 19th Symp. (Intern.) on Comb., Haifa, 1982. — Pittsburgh, 1982.



18. Лямин Г.А., Пинаев А.В. Исследование неидеальной газовой детонации и ее пределов в плотной пористой среде // Динамика сплошной среды. — Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1984. — Вып. 68.
19. Лямин Г.А., Пинаев А.В. Сверхзвуковое (детонационное) горение газов в инертных пористых средах // Докл. АН СССР. — 1985. — 283, № 6.
20. Лямин Г.А., Пинаев А.В. О режимах сгорания газов в инертной пористой среде // ФГВ. — 1986. — 22, № 5.
21. Лямин Г.А., Митрофанов В.В. и др. Газовая и гетерогенная детонация в пористых средах // Детонация и ударные волны. — Черноголовка, 1986.
22. Лямин Г.А., Пинаев А.В. О режиме быстрого дозвукового горения газов в инертной пористой среде с плавным подъемом давления в волне // ФГВ. — 1987. — 23, № 4.
23. Пинаев А.В., Лямин Г.А. Основные закономерности дозвукового и детонационного горения газов в инертных пористых средах // Там же. — 1989. — 25, № 4.
24. Пинаев А.В., Лямин Г.А. Пьезоэлектрические датчики давления, методы их тарировки // ПТЭ. — 1992. — № 2.
25. Николаев Ю.А., Топчий М.Е. Расчет равновесных течений в детонационных волнах в газах // ФГВ. — 1977. — 13, № 3.
26. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. — М.: Мир, 1968.

630090, г. Новосибирск,  
ИГиЛ СО РАН

Поступила в редакцию 19/VIII 1993,  
после доработки — 24/I 1994

УДК 543.874; 542.91

М.В. Кузнецов, А.Г. Пересада, М.Д. Нерсесян

### ГОРЕНИЕ В СИСТЕМЕ $Y_2O_3$ — $BaO_2$ — $\alpha Cu$ С ГАЗИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

Исучен процесс горения в системе  $0,5Y_2O_3 + (2 - \beta)BaO_2 + \beta BaCO_3 + \alpha Cu \xrightarrow{O_2}$  при различном давлении кислорода. Установлено, что в зависимости от  $\alpha$  наблюдаются как интенсификация, так и затухание процесса. Предложено объяснение полученным закономерностям. Выяснено, что введение  $BaCO_3$  в качестве газифицирующей добавки позволяет избежать обширного плавления и понизить максимальную температуру процесса. Идентифицированы основные продукты реакции. С помощью процесса СВС с газифицирующей добавкой удалось синтезировать фазу *tetra* высокотемпературного сверхпроводника  $Y_{1,23}$  с температурой перехода в сверхпроводящее состояние  $T_c$ , зависящей от количества вводимой добавки.

Один из способов получения ВТСП — самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС) с использованием в качестве исходных реагентов смеси типа металл — оксид — пероксид — кислород в стехиометрических соотношениях. В работах [1—3] исследованы системы с содержанием меди  $\alpha = 3$ . Изучены закономерности горения, механизм взаимодействия компонентов и свойства получаемых ВТСП. В данной работе приводятся результаты исследований процесса горения в системе  $Y_2O_3$ — $BaO_2$ — $BaCO_3$ — $Cu$ — $O$ , где карбонат бария использован как газифицирующая добавка.

Эксперименты проводились для смесей состава:



где  $\beta = 0 + 1,0$ ;  $\alpha = 3 + 4$ . В качестве исходных компонентов применялись: медь (порошок) ПМС-1, пероксид бария ТУ 6-09-03-462-78, карбонат бария ЧДА, оксид иттрия ИтО-В. Компоненты в стехиометрических соотношениях смешивали в планетарной мельнице FRITSH 05-102. Готовую смесь прессовали в таблетки диаметром 14—20 и высотой 35—40 мм. Синтез проводился в бомбе постоянного давления в атмосфере кислорода в диапазоне давлений 0,1—1,6 МПа. Горение инициировали кратковременной подачей электрического тока на нихромовую спираль с верхней торцевой поверхности образца.

© М.В. Кузнецов, А.Г. Пересада, М.Д. Нерсесян, 1994.