

К СТРУКТУРЕ ГАЗОПЛЕНОЧНОЙ И ГАЗОВОЙ ДЕТОНАЦИИ В ИНЕРТНОЙ ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

Приведены данные о структуре детонационных волн в пористой среде, частицы которой покрыты жидкой или твердой пленкой горючего, а объем пор заполнен кислородом. Результаты сопоставляются с аналогичными исследованиями для газовой детонации. По светящимся трекам на фоторазвертках построены профили массовой скорости за фронтом детонации в газопленочных и газовых смесях, делаются заключения о механизме воспламенения.

Изучению гетерогенной (газопленочной) детонации в инертной пористой среде посвящены работы [1—3]. Ниже содержатся результаты экспериментов по структуре детонационных волн (ДВ) для газопленочных и газовых систем в пористой среде.

Методика и условия проведения экспериментов не отличаются от описанных в [3], оптическая съемка процессов проводилась в стальных шариках размером $\delta = 12$ мм камерой СФР и фоторегистратором барабанного типа. В качестве газообразного окислителя для заполнения среды использовали кислород.

Измерения перепада давления $\overline{\Delta p} = \Delta p/p_0$ (p_0 — начальное давление) в волнах детонации турмалиновыми и пьезокерамическими датчиками по методике [4] позволили дополнить и уточнить полученные в [2] результаты (рис. 1, а). С удалением от нижнего предела детонации p_0^* (p_0^* — крайние левые точки) скорости детонации D (рис. 1, б) различаются слабее для различных горючих с близкой теплотой сгорания при фиксированных δ и объемной концентрации горючего α (кривые 1—7), поскольку с усилением скоростного напора физическая кинетика становится менее зависимой от теплофизических свойств горючего. Зависимости $D(p_0)$ и $\overline{\Delta p}(p_0)$ имеют максимум вблизи стехиометрии ($\alpha_{ст}$), при $\alpha \approx (1-2)\alpha_{ст}$, где $D_{max} \approx 900 \div 1200$ м/с, $\overline{\Delta p}_{max} \approx 30 \div 40$. Замедление роста и последующее уменьшение значений D и $\overline{\Delta p}$ с увеличением p_0 связано с обеднением смесей по горючему (см. кривые 9, 10).

Для получения более полных экспериментальных данных при толстых пленках горючего ($\alpha \geq 0,5 - 2\%$) требуется давление $\approx 100 -$

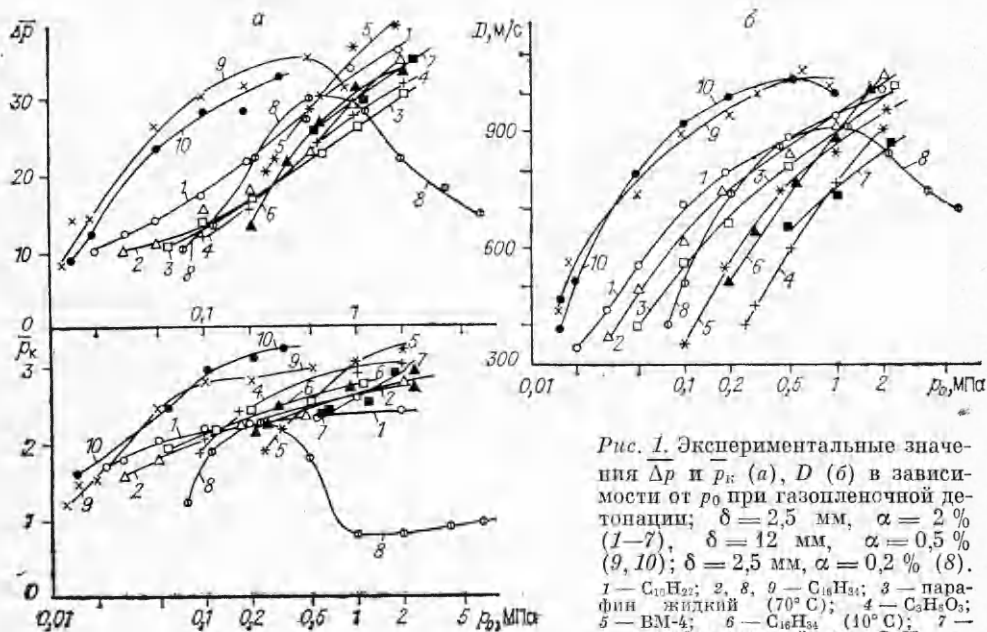


Рис. 1. Экспериментальные значения $\overline{\Delta p}$ и p_0^* (а), D (б) в зависимости от p_0 при газопленочной детонации; $\delta = 2,5$ мм, $\alpha = 2\%$ (1—7); $\delta = 12$ мм, $\alpha = 0,5\%$ (9, 10); $\delta = 2,5$ мм, $\alpha = 0,2\%$ (8).
1 — $C_{10}H_{22}$; 2, 8, 9 — $C_{10}H_{24}$; 3 — парафин жидкий (70°С); 4 — $C_8H_{18}O_2$; 5 — ВМ-4; 6 — $C_{16}H_{34}$ (10°С); 7 — парафин твердый; 10 — $C_{15}H_{32}$.

Горючее	Пористая среда		α , %	p_0^* , МПа	$\overline{\Delta p^*}$	D^* , м/с
	δ , мм	φ				
$C_{10}H_{22}$ (ж.)	2,5	0,41	2	0,02	9	350
$C_{15}H_{32}$ (ж.)	12	0,43	0,5	0,013	8	400
$C_{16}H_{34}$ (ж.)	2,5	0,41	0,2	0,08	12	415
	2,5	0,41	2	0,03	10	390
	12	0,43	0,5	0,015	7	435
$C_{16}H_{34}$ (тв.)	2,5	0,41	2	0,2	13	525
	12	0,43	0,5	$\leq 0,2$	≤ 30	≤ 750
Парафин (ж.)	2,5	0,41	2	0,05	9	400
Парафин (тв.)	2,5	0,41	2	0,5	27	665
ВМ-4 (ж.)	2,5	0,41	2	0,1	11	350
Глицерин — $C_3H_8O_3$ (ж.)	2,5	0,41	2	0,25	20	400

Примечание. ж. — жидкое, тв. — твердое, φ — пористость.

500 атм, что создает значительные трудности. В случае $\alpha = 0,2\%$ опытные данные приведены вплоть до верхнего предела $p_0^{**} \approx 60$ атм, когда $D^{**} \approx 710$ м/с, $\overline{\Delta p^{**}} \approx 15$ (см. рис. 1, 9), остальные кривые на рис. 1 качественно не отличаются от 9. Значения p_0^* возрастают с повышением молекулярной массы горючих и уменьшением размера пор; на нижнем пределе $D^* \approx 350 \div 450$ м/с, $\overline{\Delta p^*} \approx 9 \div 13$ для различных α и δ .

Данные о пределах сведены в таблице, ошибка их измерения $\leq 30\%$. Для одного и того же горючего предельные параметры (p_0^* , D^* , $\overline{\Delta p^*}$) повышаются, если уменьшать α , δ или использовать горючее в твердой фазе (см. рис. 1). В дополнение к данным [3] на рис. 1, а приведены также значения $\bar{p}_k = p_k/p_0$, где p_k — конечное давление в пористой среде после прохождения детонации и установления равновесия.

Типичные осциллограммы, характеризующие структуру волны детонации. — профили давления и свечения при различных p_0 , α и агрегатных состояниях горючего представлены на рис. 2, а — д. (Здесь же для сравнения показан случай детонации газовой смеси $C_2H_2 + 2,5O_2$ в пористой среде (е).) Вблизи нижнего предела ДВ становится более пологой, относительный скачок давления при этом уменьшается (см. рис. 2, в, д), начало свечения (пламя) отстает от фронта на $\tau_n \approx 25 \div 30$ мкс (15—20 мм), что соответствует 3—5 порам. В твердых

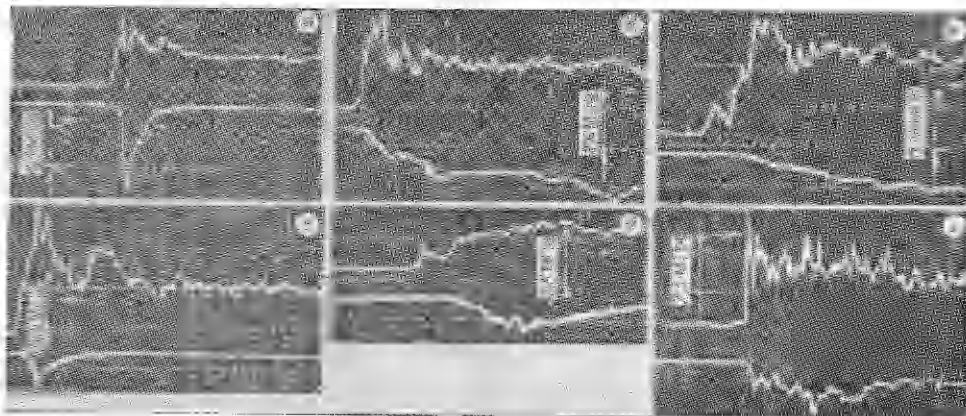


Рис. 2. Осциллограммы давления (верхний луч) и свечения (нижний луч) при детонации $C_{16}H_{34} - O_2$ (а — д) и $C_2H_2 + 2,5 O_2$ (е); $\delta = 12$ мм.
 p_0 , МПа: а — г, е — 0,2, д — 0,02; α , %: а — г — 0,5, д — 0,05; Δt , мкс/дел: а — 50 б — е — 20.

гладких пленках задержка воспламенения больше, чем в жидких (см. рис. 2, *в*, *д*). Волна газопленочной детонации вблизи предела характеризуется наличием слабого ударного предвестника с последующей более сильной волной сжатия. Вдали от предела ($\tau_{\text{н}} \ll 5$ мкс) максимумы свечения и давления близки.

Существует качественное отличие тепловых процессов за фронтом детонации в случае тонких и толстых пленок. Так, если в бедных составах смесь выгорает в зоне реакции, и впоследствии наблюдается плато свечения (см. рис. 2, *б*) с медленным остыванием продуктов реакции (которое можно оценивать по известным зависимостям [5]), то в богатых (по горючему) смесях продолжающийся после завершения основных реакций срыв и испарение с поверхности пленки горючего приводят к резкому остыванию газа в поровом пространстве — свечение прекращается через 30—100 мкс (см. рис. 2, *а*, *г*, *д*). Горение в зоне реакции в случае толстых жидких пленок гораздо интенсивнее. Однако наличие предварительно созданных шероховатостей на поверхности твердой пленки способствует еще большему увеличению параметров детонации (см. рис. 2, *а*, *г*, где шарики, покрытые твердой пленкой гексадекана, перед опытом встряхнули). Во всех случаях давление имеет пульсирующий характер в связи с хаотичностью структуры и отражением волн сжатия от поверхностей частиц среды. Пульсации давления зависят от местоположения датчика и всегда вблизи поверхности шариков выше, чем в центре пор.

Прямым исследованием газодинамических процессов непосредственно в пористой среде является оптическая регистрация самосвечения детонации. Теплерограммы, полученные на отдельных препятствиях, плоских каналах переменного сечения, приближенно моделирующих среду, не дают достоверной информации для рассматриваемой задачи. Покадровые снимки самосвечения газопленочной и газовой детонации приведены на рис. 3. Передний фронт пламени за фронтом газопленочной детонации по сравнению с газовой неровный, с турбулентными выбросами, свечение более неоднородно. Во всех случаях фронт детонации в среднем перпендикулярен линии распространения за исключением незначительных (в несколько градусов) локальных искривлений. Для тонких пленок горючего свечение, как и при газовой детонации, продолжительное. При избытке горючего по мере его поступления в объем газ в порах остывает уже через несколько десятков микросекунд (см. рис. 3, $t = 76$ мкс), где сверху вниз начался процесс прекращения горения).

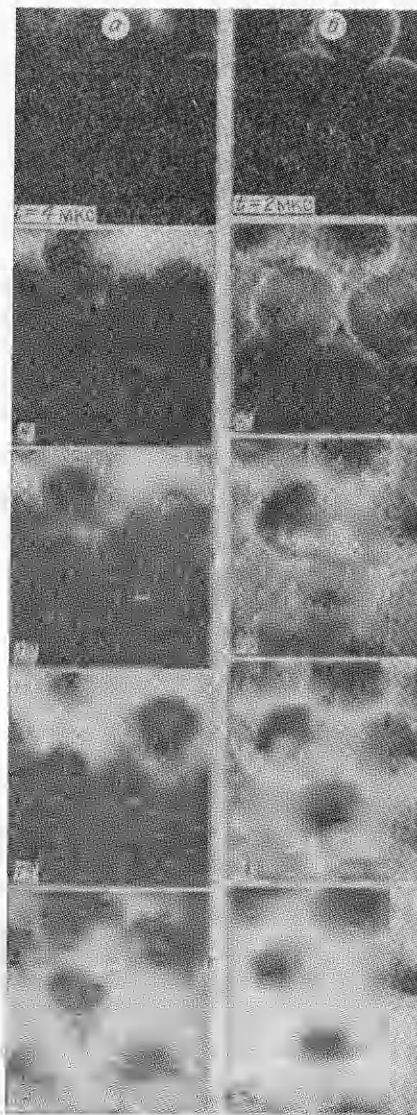


Рис. 3. Покадровые снимки свечения при детонации $\text{C}_{16}\text{H}_{34} - \text{O}_2$ (*а*) и $\text{C}_2\text{H}_2 + 2,5 \text{O}_2$ (*б*); $\delta = 12$ мм, $p_0 = 0,2$ МПа, $\alpha = 0,5$ %.

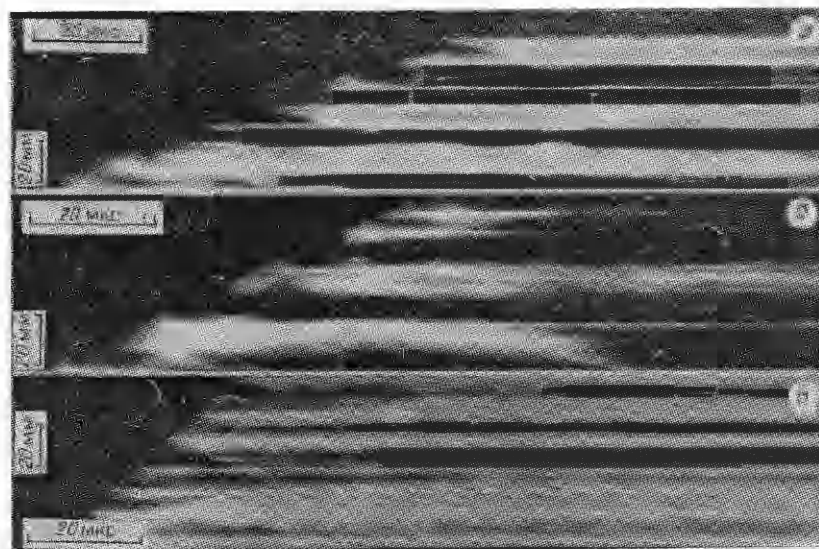


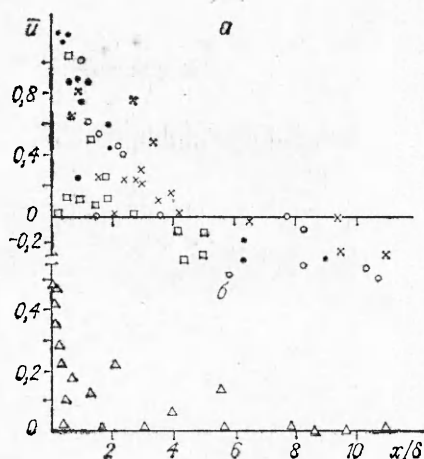
Рис. 4. Фоторазвертки самосвечения для детонации $C_{16}H_{34} - O_2$ (а, б) и $C_2H_2 + 2,5 O_2$ (в); $\delta = 12$ мм, $p_0 = 0,2$ МПа, $\alpha = 0,1$ (а) и $0,5\%$ (б).

За фронтом газовой детонации в пористой среде в отличие от детонации в безграничном пространстве наблюдается постепенное увеличение светимости, что указывает на более длительный характер реакции из-за наличия узких норовых зазоров, где газ некоторое время не воспламеняется.

Плавный подъем светимости после того как она скачком возрастает на переднем фронте фиксируется и на осциллограммах (см. рис. 2, е). Этот факт представляется нетривиальным и не замечен авторами ранее при исследовании пористых сред из более мелких частиц. На большей части поверхности шаров свечение в первые моменты времени интенсивнее, чем в объеме, из-за повышения температуры на них при торможении потока. Во всех опытах с газовой детонацией наблюдается регулярная струйно-вихревая структура в зоне реакции (внешне похожая на «глаза» и «носик»), возникающая после отражения переднего фронта от поверхности шаров (см. рис. 3, б). Газ в этих областях, по-видимому, более холодный и выгорает постепенно лишь через 20—30 мкс.

Особенности структуры течения оказалось возможным выявить и на фоторазвертках процесса (рис. 4). Здесь темные продольные полосы соответствуют положениям шариков. При газопленочной детонации темные области шире, чем в случае газовой детонации. Это означает, что горение жидкой пленки в узких сечениях пор более затруднено. С увеличением толщины пленки светящиеся области сужаются, а темные, где горение не возникало или прекратилось, расширяются во времени (см. рис. 4, б). Горение в узких зазорах затруднено в силу того, что при испарении и срыве жидкости с пленки происходит быстрое остывание газа. В таких условиях сгорание газообразного окислителя в пористой среде не может быть полным. На всех снимках ясно видны протяженные отраженные волны, образованные в результате взаимодействия падающей ДВ с каждым шариком. В отраженных волнах заметно усиливается свечение, последующие их отражения от шариков уже не порождают волн сжатия, однако усиливают горение. Скорость отраженных волн при детонации $C_2H_2 + 2,5O_2$ в пористой среде $v \approx (0,5 \div 0,65)D$; при газопленочной детонации $v \approx (0,75 \div 1,5)D$ — основное количество отраженных волн имеют значения $v > D$ (вероятно из-за протекания реакций за ними). С приближением к пределу детонации (опыты выполнены при $p_0 = 0,1, 0,05, 0,03$ и $0,025$ МПа) качественные изменения происходят

Рис. 5. Массовая скорость при детонации $C_{16}H_{34} - O_2$ (а) и $C_2H_2 + 2,5 O_2$ (б); x — расстояние от фронта, $\delta = 12$ мм, $p_0 = 0,2$ МПа.



лишь при $p_0 \leq 0,025$ МПа, когда ослабляется свечение и перестают быть заметны отраженные волны.

По трекам на фоторазвертках ДВ построены профили массовой скорости $\bar{u} = u/D$ продуктов детонации в пористой среде (рис. 5) с ошибкой 20—25%. Разброс экспериментальных точек отражает реальную ситуацию по сечениям, включающим несколько пор. За фронтом газовой детонации скорость потока монотонно (в среднем) изменяется в диапазоне $0 \leq \bar{u} \leq 0,5$ (рис. 5, а). При газопленочной детонации течение имеет струйный характер, часть струй вблизи фронта имеет значения $\bar{u} \approx 0,8 \div 1,2$ (иногда $u > D$), наблюдается более ранняя остановка всего потока ($x/\delta \approx 2 \div 6$) и последующее обратное течение с $u \approx -(0,2 \div 0,4)D$. Наличие высокоскоростных струй газа на переднем фронте детонации в такого типа системах установлено впервые.

Существует определенное внешнее сходство описанных процессов с низкоскоростными ($D \leq 10^3$ м/с) режимами унитарных ВВ [6, 7]. Однако следует различать их механизмы воспламенения. В случае газопленочной детонации массовый поток за передней ударной волной влияет на пленку горючего (разрушает, испаряет ее), а формирующиеся высокоскоростные горячие струи, воздействуя дополнительно на горючее, поддерживают передний фронт детонации. При низкоскоростной детонации унитарных ВВ сравнительно слабый ударный фронт в газе не вызывает каких-либо физико-химических изменений в веществе, и высокоплотный поток газа из зоны реакции поджигает зерна ВВ. Принципиально иной механизм реализуется в газах с высокой энергетикой (смесь $C_2H_2 + 2,5 O_2$) вдали от предела, когда инициирование осуществляется за счет ударно-волнового воздействия на газ.

На основании проведения измерений можно сделать следующие выводы.

Показана зависимость нижних предельных параметров детонации от свойств и концентрации горючего, размера частиц пористой среды. При газопленочной детонации максимальные значения скоростей детонации и относительных перепадов давления в волне достигают соответственно 900—1200 м/с и 30—40. Вблизи нижнего предела в волне детонации можно выделить слабый ударный предвестник и пологую волну сжатия ($\Delta p \approx 10 \div 15$) с реакцией. В ДВ с толстой пленкой горючего ($\alpha \geq 0,5\%$) свечение гораздо короче, чем с тонкой: гашение пламени происходит через 30—100 мкс при срыве и испарении избыточного количества горючего. Фронт свечения при газопленочной детонации более неровный, чем при газовой детонации. В зоне реакции газовой детонации наблюдается регулярная струйно-вихревая структура. Свечение при газовой детонации может постепенно нарастать на длине до 5—6 размеров частиц. В волнах газовой и газопленочной детонации регистрируются протяженные, отраженные от шариков волны сжатия. При газопленочной детонации (в отличие от газовой) часть продуктов реакции (струй) движется со скоростью, близкой к скорости детонации. Такие струи наряду с передней ударной и отраженными волнами осуществляют воспламенение смеси в отдельных порах.

Работа выполнена по гранту Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лямин Г. А. Гетерогенная детонация в жесткой пористой среде // ФГВ.— 1984.— 20, № 6.— С. 134—138.
2. Лямин Г. А., Пинаев А. В. Влияние свойств горючего на параметры гетерогенной детонации в пористой среде // Динамика сплошной среды.— Новосибирск, 1988.— Вып. 88.— С. 95—101.
3. Лямин Г. А., Пинаев А. В. Гетерогенная детонация (газ — пленка) в пористой среде. Область существования и пределы // ФГВ.— 1992.— 28, № 5.
4. Лямин Г. А., Пинаев А. В., Лебедев А. С. Пьезоэлектрики для измерения импульсных и статических давлений // Там же.— 1991.— 27, № 3.— С. 94—103.
5. Пинаев А. В., Лямин Г. А. Основные закономерности дозвукового и детонационного горения газов в инертных пористых средах // Там же.— 1989.— 25, № 4.— С. 75—85.
6. Андреев В. В., Зубков П. И. и др. Об одном из режимов детонации порошковых ВВ малой плотности // Динамика сплошной среды.— Новосибирск, 1972.— Вып. 10.— С. 183—188.
7. Андреев В. В., Лукьянчиков Л. А. Механизм распространения детонации с малой скоростью в порошковом тэне при искровом инициировании // ФГВ.— 1974.— 10, № 6.— С. 912—919.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 29/VIII 1991

УДК 534.222.2

Г. А. Лямин, А. В. Пинаев

ГЕТЕРОГЕННАЯ ДЕТОНАЦИЯ (ГАЗ — ПЛЕНКА) В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ. ОБЛАСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ И ПРЕДЕЛЫ

Представлены результаты экспериментального исследования гетерогенной детонации в пористой среде, когда пленка горючего покрывает поверхность инертных частиц, а газообразный окислитель заполняет свободный объем пор. Для широкого диапазона начальных параметров определена область существования детонации в такой системе и предложены критерии для оценки ее пределов. Показано, что разбавление кислорода азотом сильно снижает параметры детонации, а при использовании воздуха в качестве окислителя ее распространение в исследуемой системе становится невозможным по крайней мере при давлениях до 6 МПа.

В [1] обнаружена детонация в зернистой пористой среде, поверхность частиц которой покрыта жидкой пленкой углеводородного горючего, а объем пор заполнен газообразным кислородом. Скорость процесса $D = 400 \div 1050$ м/с в зависимости от объемного содержания горючего α и начального давления окислителя p_0 . Влияние состава горючего на характеристики гетерогенной (газопленочной) детонации исследовано в [2]. Здесь же для ряда случаев найдены нижние пределы процесса по p_0 и α . Однако остается открытым вопрос о пределах и области существования детонации при одновременном изменении параметров, характеризующих все три фазы — p_0 , α и δ , где δ — размер частиц пористой среды.

Эксперименты проводили в вертикально расположенных стальных толстостенных трубах с внутренним диаметром $d = 6 \div 50$ мм и длиной $L = 150 \div 700$ мм. По всей длине трубы устанавливали световоды диаметром 0,3 мм для регистрации свечения процесса при помощи ФЭУ (разрешение по времени не хуже 3 мкс). В стенках труб устанавливали пьезодатчики с собственной частотой 300 кГц и размером чувствительного элемента ≈ 2 мм [3]. В некоторых датчиках вплотную к пьезоэлементам располагали световод, что позволяло регистрировать профили давления и свечения практически в одном и том же месте (а для $\delta \geq 5$ мм в одной и той же поре). Сигналы с датчиков давления и ФЭУ регистрировали осциллографами С8-1, С8-14, С8-17.

В качестве пористой среды использовали засыпки из стальных полированных шариков с $\delta = 2,5, 5$ и 12 мм; фракции кварцевого песка с