

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 порошковой 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

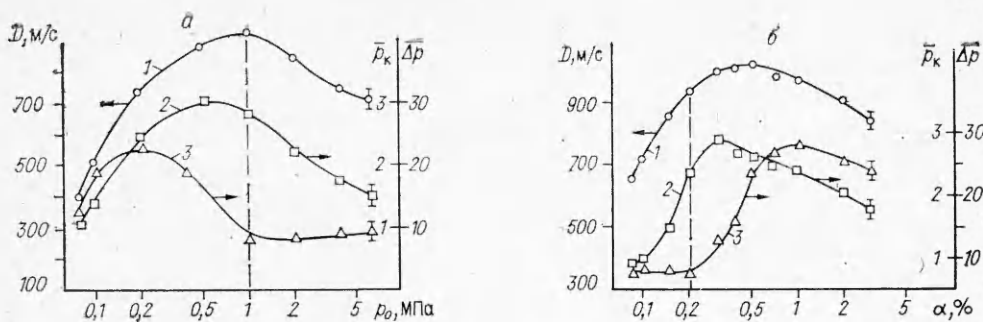


Рис. 1. Зависимости D (1), $\overline{\Delta p}$ (2) и $\overline{p_k}$ (3) от p_0 и α в засыпке из шаров с $\delta = 2,5$ мм; система $C_{16}H_{34} - O_2$.
 $a - \alpha = 0,2\%$; $b - p_0 = 1$ МПа.

$\delta = 0,12-0,25$ и $0,25-0,6$ мм; фракцию сфероидизированного порошка карбида вольфрама, плакированного никелем с $\delta = 0,04 \div 0,08$ мм и цилиндрические образцы песчаника с максимальным размером пор $d_{max} = 6 \div 10$ мкм. Перед опытом частицы пористой среды смачивали известным количеством горючей жидкости, перемешивали и помецали в трубу, тщательно утрясая до достижения максимальной насыпной плотности. Затем трубу закрывали, откачивали оставшийся в порах воздух и заполняли окислителем. Процесс инициировали взрывом взрывчатой газовой смеси $C_2H_2 + 2,5 O_2$, $2H_2 + O_2$, $H_2 + 4 O_2$ в верхней части трубы, объем которой меняли от 5 до 20 % от всего объема трубы. Взрывчатую смесь в трубу добавляли непосредственно перед инициированием, что позволяло избежать ее перемешивания с окислителем. В качестве горючего использовали углеводороды парафинового ряда: пентадекан $C_{15}H_{32}$ и гексадекан $C_{16}H_{34}$ с крайне низким давлением паров при нормальных условиях.

В результате экспериментов установлено, что для системы жидкое горючее — газообразный окислитель — инертная пористая среда существует определенная область начальных параметров (α , p_0 , δ), внутри которой возможно распространение детонации. В этом случае процесс на длине $\approx (10-20)\delta$ от места инициирования выходит на стационарный режим распространения и в дальнейшем его скорость почти постоянна. Вне области существования гетерогенная детонация либо вообще не возникает, либо сразу вблизи места инициирования воспламенение срыгается, и по газу в пористой среде распространяется быстро затухающая волна сжатия без химической реакции.

Параметры детонации зависят от p_0 , α и δ . Влияние p_0 при фиксированных α и δ показано на рис. 1, a . Здесь $\overline{\Delta p} = \Delta p/p_0$ — относительный перепад давления в волне детонации, $\overline{p_k} = p_k/p_0$, где p_k — давление, регистрируемое в пористой среде после окончания химической реакции и полного остывания продуктов. Из-за слабого увеличения температуры системы после опыта (для всех p_0 — не превышает 20 К), величина $\overline{p_k}$ — фактически характеризует изменение числа молей газа в результате химической реакции. Суммарная погрешность измерения D составляла 3—5 %, $\overline{\Delta p}$ — 10—15 %, $\overline{p_k}$ — 5—10 % (см. рис. 1). Левый край кривых, где $p_0 = p_0^*$, соответствует нижнему пределу детонации по p_0 и связан с ростом относительных теплопотерь из зоны пламени в стенки поровых каналов, а правый, где $p_0 = p_0^{**}$, — верхнему пределу из-за переобогащения системы окислителем выше предельно допустимого. Давление p_0^{st} , при котором горючее и окислитель находятся в стехиометрическом соотношении, обозначено вертикальной штриховой линией.

При сильном избытке углеводородного горючего окисление идет преимущественно до СО и H_2 [4, 5] и по окончании реакции $\overline{p_k}$ может достигать 3—4. Такие условия здесь реализуются в области $p_0 \leq 0,4 \div 0,5$ МПа, где $\overline{p_k} \geq 2$. В то же время снижение давления до $\overline{p_k} \sim 1$

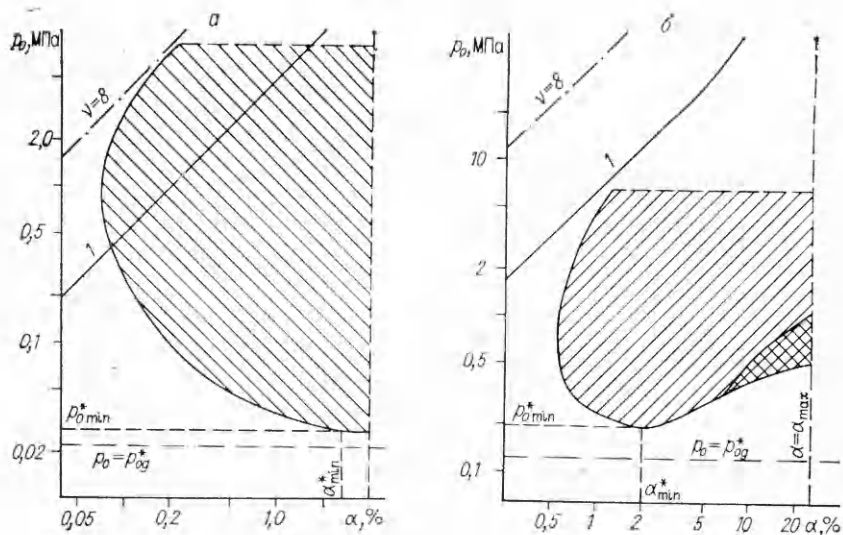


Рис. 2. Область существования гетерогенной детонации в пористой среде; система $C_{16}H_{34} - O_2$.

вблизи p_0^* свидетельствует, вероятно, о значительном (более 80 %) недогорании O_2 на нижнем пределе. По-видимому, в этом случае горение распространяется только по самым крупным порам, а остальная часть объема в процессе не участвует. При $p_0 = p_0^{st}$ $\bar{p}_k \approx 0,7$, что приблизительно совпадает с изменением числа молей газа при горении стехиометрического состава с образованием CO_2 и H_2O и указывает на практически полное выгорание смеси. На верхнем пределе $p_0^* \bar{p}_k \sim 1$ из-за сильного переобогащения системы O_2 , большая часть которого остается в порах непрореагировавшей.

Зависимости для случая, когда α меняется, а δ и p_0 фиксированы, приведены на рис. 1, б. Здесь нижний предел детонации $\alpha = \alpha^*$ (левые концы (кривых) подобен верхнему пределу по p_0 на рис. 1, а и связан с избытком окислителя. Правые концы зависимостей не являются пределом детонации — в опытах здесь ограничивались значениями $\alpha \leq 4\%$, когда еще жидкая пленка гексадекана равномерно распределяется по высоте слоя частиц. Зависимости D и Δp на рис. 1 подобны, максимальные значения достигаются, когда система переобогащена горючим приблизительно в 2 раза относительно стехиометрии. В области, где $\alpha < \alpha^{st}$ $\bar{p}_k \approx 0,7 \div 0,9$, что указывает на преимущественный ход реакции с образованием CO_2 и H_2O , при $\alpha > \alpha^{st}$ избыточное горючее препятствует образованию CO_2 , и в продуктах реакции преобладают CO и H_2 ($\bar{p}_k \approx 2 \div 3$).

Хотя экспериментальные кривые на рис. 1 и дают представление об изменениях параметров детонации при варьировании p_0 и α , для более полного описания пределов детонации различной природы удобно рассмотреть область существования взрывного процесса на плоскости $p_0 - \alpha$ (или $\lg p_0 - \lg \alpha$) при фиксированном δ .

На рис. 2, а показана область существования детонации (заштрихована) в засышке из шариков с $\delta = 2,5$ мм. Если начальные параметры системы попадают внутрь заштрихованной области, то при достаточной интенсивности инициирующей ударной волны в пористой среде возникает и распространяется газопленочная детонация со скоростью $1200 \geq D \geq 400$ м/с. Сплошной линией обозначен фактический предел детонации, установленный в опытах. Точность его определения составляла от 10 до 30 %. Штриховыми линиями отмечены верхняя граница изученных давлений окислителя $p_0 = p_0^{max} = 8$ МПа и максимальное содержание горючего без его стекания $\alpha = \alpha_{max} = 4\%$. Заметим, что на плоскости $\lg p_0 - \lg \alpha$ точки, описывающие системы с одинаковым отноше-

нием массы горючего и окислителя, лежат на линии, которая в области малых $\alpha \ll \varphi$ (φ — пористость) практически не отличается от прямой, пересекающей ось абсцисс под углом 45° . Семейство таких линий описывается уравнением

$$p_0 = k \rho_f R T_0 \alpha / (\varphi - \alpha) \mu_f,$$

где k — количество молей окислителя, приходящихся на 1 моль горючего (для стехиометрической смеси $C_{16}H_{34}$ с O_2 $k_{st} = 24,5$; ρ_f и μ_f — плотность и молекулярная масса горючего; R — универсальная газовая постоянная; T_0 — начальная температура. Сплошной линией на рис. 2 показана кривая стехиометрического состава (коэффициент избытка окислителя относительно стехиометрии ($\nu = k/k_{st} = 1$)), штрихпунктирной линией обозначен богатый предел по окислителю ($\nu = 8$) для газовой смеси (получен экстраполяцией данных по концентрационным пределам горения газовых смесей предельных углеводородов [5] в область более высоких μ_f). Горизонтальная штрихпунктирная прямая $p_0 = p_{0g}^*$ указывает нижний предел по p_0 для горения в пористой среде гомогенной газовой смеси предельного углеводорода с O_2 , p_{0g} получено формально из критерия Пекле $Pe = u_n d_{max} / \chi$, где u_n — нормальная скорость пламени, а χ — температуропроводность исходной смеси. В расчете принимали $Pe = 30$, как найдено в [6] для смеси $C_3H_8 + 5 O_2$; значение $u_n = 3$ м/с получено экстраполяцией данных из [5] для газовых смесей; $\chi = \chi_0 p_0 / p_{00}$, где $\chi_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ м²/с; p_{00} — нормальное давление.

Как можно видеть на рис. 2, а область существования детонации ограничена этими двумя штрихпунктирными прямыми, причем при определенных условиях пределы гетерогенной детонации практически совпадают с пределами горения газовой смеси. Наибольшее отличие наблюдается в области малых α и p_0 , где предел детонации связан непосредственно с гетерогенной природой исходной системы. Как упоминалось в [2], существенной особенностью газо-жидкостной детонации является необходимость массоподвода горючего с поверхности жидкой пленки при обтекании ее потоком горячего газа. В случае толстых пленок заметную роль в интенсификации массообмена играют механизмы образования волн и срыв с их гребней микрокапель жидкости, тогда как для тонких ($\leq 5-10$ мкм) основной механизм состоит в относительно медленном испарении жидкости с нагретой поверхности [7]. Поэтому уменьшение α и соответственно толщины пленки Δ приводит к ослаблению массоподдачи горючего в зону реакции, что снижает параметры детонации. При этом существует минимальная концентрация горючего α_{min} , а значит и толщина пленки Δ_{min} , ниже которой детонация невозможна при любых p_0 . В данном случае для системы $C_{16}H_{34} - O_2$ ($\delta = 2,5$ мм) $\alpha_{min} = 0,08\%$ и $\Delta_{min} = 0,5$ мкм. Отметим также, что здесь фактически отсутствует богатый предел по горючему — детонация возможна даже при переобогащении системы горючим на три порядка относительно стехиометрии.

Несколько иной вид имеет область существования гетерогенной детонации в песке с $\delta = 0,25 \div 0,6$ мм (рис. 2, б). Увеличение удельной поверхности среды на единицу объема, связанное как с уменьшением δ , так и с отличиями формы зерен от сферической, позволяет достигать более высоких концентраций горючего ($\alpha = 20 \div 30\%$) без заметного стекания жидкой пленки. В этом случае не только большая часть объема пор оказывается заполненной горючим ($\varphi = 35\%$), но и многие поровые каналы полностью перекрываются жидкостью в узких местах, что приводит к невозможности детонации при $\alpha > \alpha_{max} = 25\%$. На рис. 2, б можно видеть, что увеличение α не всегда ведет к уменьшению p_0^* , при $\alpha \geq 2\%$ p_0^* снова начинает расти. По-видимому, усиление массоподвода горючего с поверхности жидкой пленки при больших Δ увеличивает потери тепла из зоны реакции и приводит к срыву детонации, когда она как бы «захлебывается» избытком горючего. Для ее восстановления

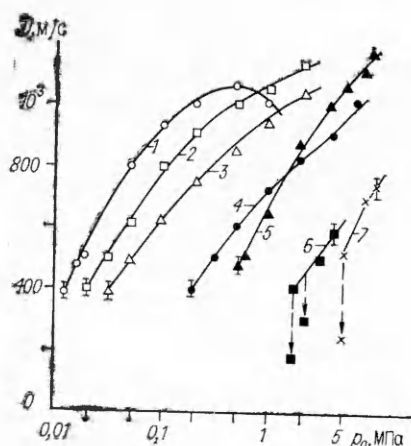


Рис. 3. Зависимость $D(p_0)$ для стальных шаров с $\delta = 12$ (1), 5 (2), 2,5 (3), песка с $\delta = 0,25-0,6$ (4), 0,12-0,25 (5) и 0,04-0,08 мм (6) и песчаника ($d_{\max} = 6-10$ мкм) (7); система $C_{16}H_{34} - O_2$.

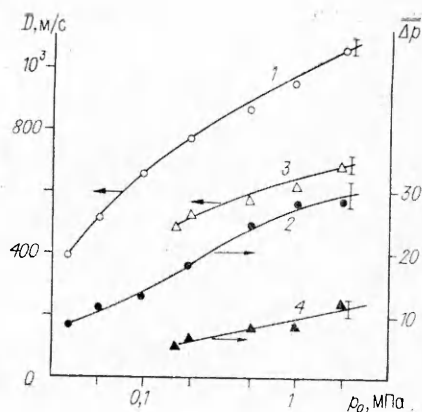


Рис. 4. Зависимости D (1, 3) и $\overline{\Delta p}$ (2, 4) от p_0 для систем $C_{16}H_{34} - O_2$ (1, 2) и $C_{16}H_{34} - (O_2 + N_2)$ (3, 4); $\alpha = 2\%$, $\delta = 2,5$ мм.

требуется повысить энерговыделение и, следовательно, p_0 . При этом система переобогащена горючим на 2—3 порядка относительно стехиометрии.

Другая особенность гетерогенной детонации при высоких α — появление участка (двойная штриховка на рис. 2, б), на котором пламя в пористой среде может устойчиво распространяться с дозвуковой скоростью относительно скорости звука в окислителе. Характерные скорости такого процесса изменяются от 80 до 300 м/с в зависимости от начальных условий. Появление дозвукового режима сгорания в области больших p_0 , высоких α и малых δ связано с возможностью смесеобразования в волне сжатия относительно небольшой интенсивности (по результатам опытов $\overline{\Delta p} \leq 2-3$). Переход от одного режима к другому происходит скачком, при этом имеется область начальных параметров, внутри которой возможно возникновение как одного, так и другого режима.

На рис. 2, б видно, что бедный предел гетерогенной детонации по горючему на плоскости $\lg p_0 - \lg \alpha$ лежит значительно ниже концентрационного предела горения для газовой смеси ($\nu = 8$). Такой результат скорее всего связан с особенностью заполнения горючим песчанной запылки. Изучение частиц песка под микроскопом показало, что некоторые из них (~10%) имеют дополнительные мелкие поры и трещины внутри самих частиц и способны впитывать часть горючего, которая, таким образом, оказывается недоступной для сгорания в волне детонации. Поэтому содержание горючего, способного эффективно сгорать в пористой среде, оказывается меньше фактического содержания α , и область существования детонации в песке сдвигается вправо относительно случая гладких шаров того же размера.

Диаграммы на плоскости $p_0 - \alpha$ (или $\lg p_0 - \lg \alpha$) не дают полного представления об области существования детонации, так как не учитывают изменение δ . На рис. 3 приведены зависимости $D(p_0)$ для пористых сред с различным размером частиц. Содержание горючего α для каждого случая выбиралось так, чтобы значение p_0^* было минимально (см. рис. 2). Скорость детонации на нижнем пределе составляет 400—500 м/с и растет одновременно с p_0 до 800—1200 м/с. Дальнейший рост скорости невозможен в случае больших δ и, следовательно, малых α из-за переобогащения среды окислителем выше стехиометрии, а для малых δ ограничен достигнутыми в опытах максимальными p_0 . Наряду с детонацией в пористой среде с малыми δ появляется и дозвуковой режим распространения (кривые 6, 7).

Таблица 1

Пористая среда	δ , мм	d_{\max} , мм	α_{\min}^* , %	φ	p_{0g}^* МПа	$p_{0\min}^*$ МПа
Песчаник Карбид воль- фрама	—	0,008	8	0,15—0,2	2,5	5,0
	0,04—0,08	0,02	5	0,42	1,0	1,7
Песок	0,12—0,25	0,05	4	0,34	0,4	0,5
	0,25—0,6	0,15	2	0,35	0,13	0,2
	2,5	0,9	2	0,41	0,022	0,03
Шары	5	1,8	1	0,43	0,011	0,02
	12	4,3	0,5	0,43	0,0047	0,012

Значения нижних пределов $p_{0\min}^*$ и соответствующих α_{\min}^* для разных типов использованных сред сведены в табл. 1. Здесь же приведены значения p_{0g}^* , рассчитанные по критерию $Re = 30$, аналогично тому, как это делали для рис. 2. Из сравнения p_{0g}^* и $p_{0\min}^*$ видно, что этот критерий позволяет оценивать нижний предел гетерогенной детонации в пористой среде по p_0 в широком интервале δ .

Влияние состава окислителя изучали при разбавлении кислорода азотом (рис. 4). Использовали следующие смеси: O_2 , $O_2 + N_2$, $O_2 + 2N_2$ и $O_2 + 4N_2$ (воздух). Разбавление окислителя азотом в 2 раза резко снижает параметры детонации и увеличивает p_0^* . Попытки возбудить газофленочную детонацию в смесях $O_2 + 2N_2$ и $O_2 + 4N_2$ к успеху не привели вплоть до $p_0 = 6$ МПа (см. рис. 4). В табл. 2 приведены значения p_{0g}^* для изученных смесей, рассчитанные по критерию $Re = 30$, использовались значения u_n , полученные экстраполяцией данных из [5] для газовых смесей углеводородов с кислородом и азотом. В табл. 2 приведены фактические значения p_0 , полученные в опытах. Из их сравнения можно сделать вывод, что предел распространения гетерогенной детонации в пористой среде при разбавлении кислорода азотом сдвигается высоко вверх относительно предела пламени для газовой смеси. Для объяснения этого факта необходимо вспомнить, что при использовании в качестве окислителя воздуха предельным режимом распространения пламени для многих горючих газовых смесей является медленное горение со скоростью не выше нескольких метров в секунду [5]. Однако при сгорании гетерогенной смеси в пористой среде такой режим принципиально невозможен, поскольку подготовка способной гореть газовой смеси требует очень сильного теплового и газодинамического воздействия на жидкую пленку горючего.

Оценки показывают, что (из-за разницы в тепловых активностях) даже при прямом контакте нагретого до 3000 К неподвижного газа ($p_0 = 0,1$ МПа) с пленкой жидкого горючего температура ее поверхности недостаточна для образования реакционноспособной смеси. Единственная возможность для химической реакции распространяться в такой среде — это наличие волны сжатия с зоной принудительной фильтрации газа, когда высокие скорости потока позволяют значительно интенсифицировать теплообмен, а в случае толстых пленок еще и ускорить массообмен за счет срыва микрокапель с поверхности жидкости. Именно такие волны сжатия, требующие значительного энерговыделения для своего существования, и реализуются при гетерогенной детонации в пористой среде. Разбавление окислителя азотом приводит к рез-

Таблица 2

Окислитель	u_n , м/с	p_{0g}^* , МПа	p_0^* , МПа
O_2	3,0	0,022	0,03
$O_2 + N_2$	1,5	0,044	0,15
$O_2 + 2N_2$	0,8	0,083	5
$O_2 + 4N_2$	0,38	0,18	6

кому снижению энерговыделения на моль окислителя, и детонация — волна сжатия с зоной химической реакции ее поддерживающей — перестает существовать.

В заключение сформулируем основные выводы.

Химическая реакция может распространяться внутри инертной пористой среды, частицы которой покрыты пленкой жидкого углеводородного горючего, а объем пор заполнен газообразным окислителем, как в режиме детонации с $D = 400 \div 1200$ м/с, так и в режиме дозвукового горения с $D = 80 \div 300$ м/с. Последний случай реализуется в узкой зоне начальных параметров мелкодисперсных сред при высокой концентрации горючего. Режимов горения с более низкой скоростью в такой среде не существует.

Экспериментальная область существования газопленочной детонации в пористой среде для углеводородно-кислородных смесей на плоскости $p_0 - \alpha$ лежит внутри области, ограниченной линией богатого предела по окислителю $\nu = 8$, прямой нижнего предела по давлению $p_0 = p_{0g}^*$ (где p_{0g}^* можно вычислить по критерию $Re = 30$) и прямой максимального содержания горючего в пористой среде $\alpha = \alpha_{max}$ (когда поры все еще связаны между собой, $\alpha_{max} \lesssim \varphi$).

Разбавление кислорода азотом резко сужает область существования детонации вплоть до ее полного исчезновения при использовании в качестве окислителя воздуха.

Измерение конечного после реакции давления в системе свидетельствует, что одновременно с изменением начального давления и концентрации горючего меняются суммарное уравнение химической реакции и полнота сгорания исходной гетерогенной смеси.

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., Лебедев А. С. Пьезоэлектрики для измерения импульсных и статических давлений // ФГВ.— 1991.— 27, № 3.— С. 94—103.
4. Щетинков Е. С. Физика горения газов.— М.: Наука, 1965.
5. Дубовкин Н. Ф. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания.— М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962.
6. Пинаев А. В., Лямин Г. А. Основные закономерности дозвукового и детонационного горения газов в инертных пористых средах // ФГВ.— 1989.— 25, № 4.— С. 75—85.
7. Фролов С. М., Гельфанд Б. Е., Тимофеев Е. И. Взаимодействие пленки жидкости с высокоскоростным газовым потоком за ударной волной // Там же.— 1984.— 20, № 5.— С. 107—114.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 29/VIII 1991

УДК 532.552.529.5; 533.6.011.72

А. Б. Британ, И. Н. Зиновик, В. А. Левин

РАЗРУШЕНИЕ ПЕНЫ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

Исследованы поведение давления и процесс разрушения полиэдрической пены в ударных волнах. Разрушение пены в ударной трубе фотографировалось с помощью искровой подсветки. В результате опытов измерены характерные времена разрушения каналовой структуры пены и проведено сравнение с расчетными данными.

Применение взрывов в промышленных технологиях приводит к необходимости надежной защиты окружающей среды от вредных послед-