

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЗДУШНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ПОРИСТЫМ ЭКРАНОМ

А. А. Губайдуллин, Д. Н. Дудко, С. Ф. Урманчеев

Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики СО РАН, 625000 Тюмень

Численно исследованы некоторые особенности отражения воздушных ударных волн от жесткой стенки, покрытой слоем пористого вещества. Для исследования волновых процессов в насыщенных пористых средах применена двухскоростная с двумя тензорами напряжений математическая модель, построенная методами механики многофазных сред. Развита методика численного моделирования, основанная на двухшаговой схеме Лакса — Вендроффа. Рассмотрены процессы прохождения волной типа «ступенька» границы раздела «газ — пористая среда» и отражения от жесткой стенки, покрытой пористым материалом; проанализировано влияние параметров пористой среды и волны на процесс отражения; выполнено сопоставление численных результатов с экспериментальными данными других авторов.

### ВВЕДЕНИЕ

Проблема воздействия воздушных ударных волн на преграды, экранированные пористым слоем, привлекает внимание многих исследователей [1–15]. На первый взгляд, может показаться, что экран из легкосжимаемого или пористого материала должен гасить ударное воздействие. Однако, как показывают эксперименты, такой экран может вызывать не только гашение, но и значительное усиление волны. Так, в [1] было обнаружено сильное увеличение пикового давления при отражении ударной волны от стенки под слоем пенополиуретана пористостью 95 ÷ 98%. Дальнейшие исследования этого эффекта [2, 3] показали, что увеличение слоя пенополиуретана от 0 до 50 мм приводит к монотонному возрастанию коэффициента увеличения давления  $K$  от 1 до 10 ( $K = p_3/p_2$ , где  $p_2$  и  $p_3$  — амплитуды давления отражения без покрытия и с покрытием соответственно). Последующее увеличение толщины слоя до 100 мм практически не сказалось на значении  $K$ .

Значительное снижение пикового давления на стенке обнаружено при наличии воздушного зазора между стенкой и экраном из пенополиуретана [4], причем экран в случае, когда его длина сравнима с длиной падающей нестационарной ударной волны, эффективно ослабляет ударные волны. В [4] отмечено также влияние начальной плотности пенополиуретана на скорость затухания в нем ударной волны.

Передаче ударно-волновой нагрузки на твердую стенку насыщенными средами посвящена работа [5]. Давление на твердой стенке измерялось двумя датчиками. Один из них воспринимал полную нагрузку, передаваемую скелетом пористой среды и насыщающим ее газом, второй воспринимал только давление газа. Первый датчик зафиксировал значительный выброс амплитуды первого пика давления с последующими небольшими осцилляциями, сходящимися приблизительно к стационарному значению — давлению отражения воздушной ударной волны от твердой стенки. Примерно к такому же значению стремились, плавно возрастая, и показания второго датчика. Следует отметить, что асимптотические значения показаний датчиков не совпадают между собой и отличаются от теоретического примерно на 20%.

В [6, 7] описаны новые экспериментальные результаты, касающиеся полей давления на стенке и внутри гранулированных слоев из различных материалов во время столкновения со слабыми ударными волнами.

В [8] рассматривалась нестационарная фильтрация газа через гранулированный слой, соприкасающийся с жесткой стенкой, при воздействии слабой ударной волны. Главной целью этой работы было изучение поля давления газа в гранулированном слое во время сжатия его ударной волной.

Теоретический анализ задачи выполнен в работах [9–20]. При этом использованы

два подхода. В [9–13] пористая среда, насыщенная газом, моделировалась «псевдогазом» т. е. сплошной средой с заданным уравнением состояния. В [14–20] учитывались эффекты несовпадения скоростей и давлений фаз, а также межфазное силовое и тепловое взаимодействие. Первый подход позволяет получить некоторые оценки, в частности изменение (усиление) полного напряжения на преграде, экранированной пористым слоем, второй подход дает возможность описать процесс не только качественно, но и количественно, например рассчитать временную зависимость полного напряжения, давления газа и приведенного напряжения на преграде. Следует отметить, что все указанные выше модели незамкнутые, т. е. содержат модельные параметры, значения которых следует определять из эксперимента.

В настоящей работе рассмотрены процессы прохождения волной типа «ступенька» границы раздела «газ — пористая среда» и отражения от жесткой стенки, покрытой пористым материалом; проанализировано влияние параметров пористой среды и волны на процесс отражения; выполнено сравнение численных результатов с экспериментальными данными.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим двухфазную смесь плотноупакованной зернистой пористой среды, поровое пространство которой заполнено газом. Для изучения распространения волн в таких средах используем двухскоростную с двумя тензорами напряжений модель насыщенную пористой среды [15, 21]. Запишем систему уравнений, описывающую плоское одномерное движение газонасыщенной пористой среды:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_1 v_1)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_2 v_2)}{\partial x} = 0,$$

$$\rho_1 \frac{d_1 v_1}{dt} = -\alpha_1 \frac{\partial p_1}{\partial x} - F,$$

$$\rho_2 \frac{d_2 v_2}{dt} = -\alpha_2 \frac{\partial p_1}{\partial x} + F + \frac{\partial \sigma_{2*}}{\partial x},$$

$$\rho_1 \frac{d_1 u_1}{dt} = \frac{\alpha_1 p_1}{\rho_1^0} \frac{d_1 \rho_1^0}{dt} + F(v_1 - v_2) - Q$$

$$\left( \frac{d_i}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_i \frac{\partial}{\partial x} \right),$$

$$\rho_2 \frac{d_2 u_2}{dt} = Q + \sigma_{2*} \frac{\partial v_2}{\partial x},$$

где  $\alpha_i$ ,  $\rho_i$ ,  $\rho_i^0$ ,  $v_i$ ,  $u_i$  — объемное содержание, приведенная и истинная плотности, скорость и внутренняя энергия  $i$ -й фазы;  $p$  — давление;  $Q$  — интенсивность передачи тепла от  $j$ -й к  $i$ -й фазе в единице объема смеси;  $\sigma_{2*}$  — продольная компонента тензора приведенных напряжений пористой среды;  $F$  — сила межфазного взаимодействия. Индекс  $i = 1$  относится к параметрам газа,  $2$  — твердой фазы. По определению

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \rho_i = \alpha_i \rho_i^0.$$

Силу межфазного взаимодействия представим в виде двух слагаемых: силы вязкого трения Стокса  $F_\mu$  и силы присоединенных масс  $F_m$  [15, 21]:

$$F = F_\mu + F_m, \quad F_\mu = \eta_\mu a_2^{-2} \alpha_1 \alpha_2 \mu_1 (v_1 - v_2),$$

$$F_m = \frac{1}{2} \eta_m \rho_1^0 \alpha_1 \alpha_2 \left( \frac{d_1 v_1}{dt} - \frac{d_2 v_2}{dt} \right),$$

где  $\mu_1$  — динамическая вязкость газа;  $a_2$  — радиус частиц, составляющих скелет пористой среды. Коэффициенты  $\eta_\mu$  и  $\eta_m$  характеризуют вязкое и инерционное взаимодействие фаз и зависят от структуры среды. В отличие от случая пористых сред, насыщенных жидкостью, волновые процессы в газонасыщенных пористых средах характеризуются значительным изменением числа Рейнольдса, поэтому следует учитывать зависимость от числа Рейнольдса коэффициента  $\eta_\mu$  [21]:

$$\eta_\mu = \frac{3}{16} C_\mu \text{Re},$$

где  $\text{Re} = 2a_2 \rho_1^0 |v_1 - v_2| / \mu_1$ ,  $C_\mu$  — коэффициент трения. Для определения коэффициента  $C_\mu$  при  $\alpha_2 \geq 0,45$  имеется эмпирическая формула, полученная обработкой экспериментов по стационарной продувке газов сквозь насыпной слой (разной пористости) неподвижных сферических частиц [22]:

$$C_\mu = C_\mu^{(2)} = \frac{4}{3\alpha_1} \left( 1,75 + \frac{150\alpha_2}{\alpha_1 \text{Re}} \right).$$

Для газозвесей ( $\alpha_2 \leq 0,08$ )

$$C_\mu = C_\mu^{(1)} = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4,4}{\text{Re}^{1/2}} + 0,42.$$

В промежуточной области ( $0,08 < \alpha_2 < 0,45$ ) предлагается использовать линейную интерполяцию [21]:

$$C_\mu = \frac{(\alpha_2 - 0,08)C_\mu^{(2)} + (0,45 - \alpha_2)C_\mu^{(1)}}{0,37}.$$

Отметим, что в работе [14] использовался аналог коэффициента  $C_\mu$ , который принимался постоянным, а его значение определялось для каждого образца пористой среды экспериментально.

Межфазный теплообмен опишем с помощью числа Нуссельта, для определения которого воспользуемся эмпирической формулой [23]

$$Q = \frac{3\alpha_2}{2a_2^2} \lambda_1 \text{Nu} (T_1 - T_2),$$

$$\text{Nu} = \begin{cases} 2,0 + 0,106 \text{Re} \text{Pe}^{1/3}, & \text{Re} \leq 200, \\ 2,27 + 0,6 \text{Re}^{2/3} \text{Pe}^{1/3}, & \text{Re} \geq 200, \end{cases}$$

$$\text{Pr} = c_p \mu_1 / \lambda_1,$$

где  $\lambda_1$  — коэффициент теплопроводности газа,  $T_i$  — температура  $i$ -й фазы.

Будем считать скелет вязкоупругим со временем релаксации  $t_{20}$ :

$$\frac{d_2 \sigma_{2*}}{dt} - E_{f*} \frac{d_2 \varepsilon_{2*}}{dt} = -\frac{1}{t_{20}} (\sigma_{2*} - E_{e*} \varepsilon_{2*}).$$

Для описания деформирования насыпной пористой среды это уравнение следует дополнить условием

$$\sigma_{2*} \leq 0 \quad \left( \sigma_{2*} = 0 \quad \text{при} \quad \frac{d\rho_2}{dt} < 0 \right),$$

$$\frac{d_2 \varepsilon_{2*}}{dt} = \frac{\partial v_2}{\partial x},$$

$$E_{f*} = \rho_{20} D_{f*}^2, \quad E_{e*} = \rho_{20} D_{e*}^2.$$

Здесь  $\varepsilon_{2*}$  — продольный компонент деформаций твердой фазы;  $D_{f*}$ ,  $D_{e*}$  — продольные динамическая и статическая скорости звука, а  $E_{f*}$ ,  $E_{e*}$  — динамический и статический модули упругости скелета пористой среды; индекс нуль соответствует начальному состоянию.

Газ в порах примем идеальным, калорически совершенным:

$$p_1 = \rho_1^0 R T_1, \quad u_1 = c_{v,1} (T_1 - T_0) + u_{10}.$$

Здесь  $R$  — универсальная газовая постоянная,  $T_0$  — начальная температура,  $c_{v,1}$  — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме.

Сжимаемость газа многократно превосходит сжимаемость материала твердой фазы. Поэтому можно предположить, что в случае газонасыщенной пористой среды материал скелета можно считать несжимаемым ( $\rho_2^0 = \rho_{20}^0$ ). Проведенные расчеты подтверждают это предположение [15, 16].

В силу несжимаемости материала твердой фазы деформация скелета происходит за счет переупаковки зерен и изменения объемов пор. Тогда упругая внутренняя энергия твердой фазы не меняется и вся работа внутренних межгранулярных сил переходит в тепловую энергию:

$$u_2 = c_2 (T_2 - T_0) + u_{20},$$

где  $c_2$  — удельная теплоемкость материала твердой фазы.

При заданных значениях  $\eta_m$ ,  $D_{f*}$ ,  $D_{e*}$ ,  $t_{20}$  выписанная система уравнений является замкнутой. Для ее программной реализации использована следующая методика. Уравнения модели в частных производных обезразмериваются и приводятся к форме, близкой к дивергентной. Процедура численного интегрирования на каждом шаге по времени состоит из трех этапов. На первом «замораживается» межфазное силовое и тепловое взаимодействие и уравнения интегрируются с помощью двухшаговой схемы Лакса — Вендроффа [24]. На втором этапе проводится пересчет значений переменных с учетом межфазного взаимодействия. При необходимости возможен третий этап — сглаживание полученного решения.

## ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Известно, что в насыщенной пористой среде исходное возмущение в процессе распространения распадается на две волны — быструю (деформационную) и медленную (фильтрационную). Двухволновая структура возмущения присуща параметрам фаз (давлению газа и напряжению в скелете, скоростям, температурам и т. д.), но профиль полного напряжения в среде имеет практически одноволновую структуру. В случае газонасыщенной среды скорость медленной волны много меньше, чем скорость

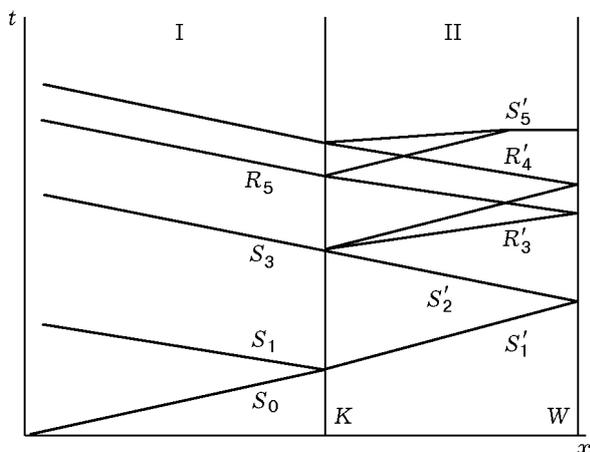


Рис. 1.  $x-t$ -Диаграмма взаимодействия воздушной ударной волны с преградой, экранированной пористым слоем:

область I — воздух, II — слой пористой среды

быстрой. Поэтому при взаимодействии ударной волны с жесткой стенкой, покрытой пористым слоем, быстрая волна успевает отразиться от стенки и свободной поверхности прежде, чем медленная волна достигнет стенки. Это вызывает дополнительные трудности при анализе возникающей волновой картины. Однако наибольший интерес представляет суммарное воздействие на преграду, которое описывается полным напряжением  $\sigma$ . Профиль давления газа хотя и имеет двухволновую структуру, но наблюдается лишь фильтрационная (медленная) волна, так как амплитуда быстрой волны, как правило, мала. В экспериментах на ударных трубах обычно регистрируют полное напряжение и давление газа.

Схема взаимодействия набегающей воздушной ударной волны с пористым слоем, насыщенным воздухом, и преградой (жесткой стенкой) показана на рис. 1. Здесь  $K$  — граница слоя;  $W$  — стенка;  $S_0$  — набегающая воздушная ударная волна;  $S'_i$  и  $R'_i$  — волны сжатия и разрежения в экранирующем преграду слое, возникающие после взаимодействия ударной волны с контактной границей, индекс  $i$  указывает последовательность образования волн в слое;  $S_1$ ,  $S_3$  и  $R_5$  — соответственно ударные волны и волна разрежения в воздухе, образующиеся в результате взаимодействия волн в слое с его границей  $K$ . Как видно из рис. 1, воздействие воздушной ударной волны на преграду определяется взаимодействием с прегра-

дой волн сжатия и разрежения, приходящих из экранирующего пористого слоя. Если диаграмма сжатия слоя отличается от таковой для линейно-упругой среды и отражает диссипативные свойства, можно ожидать, что волны после нескольких отражений затухнут и на преграде будет регистрироваться осциллирующая кривая полного напряжения, сходящаяся к давлению отражения ударной волны в газе от жесткой стенки.

Рассмотрим, какими должны быть граничные условия на контактной границе «газ — пористая среда». Как показано в работах [25–28], в случае линейных волн давление газа и полное напряжение должны быть непрерывными:

$$p_{1-} = p_{1+}, \quad p_{1-} = \sigma_+, \quad (1)$$

откуда следует, что

$$\sigma_{2*+} = 0.$$

В случае нелинейных волн эти условия могут нарушаться. Анализ соответствующих соотношений на скачках объемных концентраций твердой фазы выполнен в работах [29, 30]. Для сохранения энтропии авторы вводят поверхностную силу, действующую со стороны газа на твердую фазу. Для определения величины этой силы требуется привлекать данные опытов.

При применении схем сквозного счета можно явно не накладывать граничные условия. Результаты расчетов согласуются с условиями (1) для слабых волн, но с ростом интенсивности падающей волны наблюдается скачок полного напряжения на контактной границе (рис. 2).

При анализе граничных условий возникает и другой вопрос: можно ли проводить расчеты по приближенной схеме, отбросив газ слева от пористой среды и заменив его «поршнем», воздействующим на пористую среду; какими в этом случае будут условия на поршне; будет ли он воздействовать только на скелет, только на газ в порах или на обе фазы одновременно. Проведенный численный анализ показал, что возмущение из газа в насыщенную газом пористую среду передается через газ в порах, который через силовое межфазное взаимодействие вовлекает в движение твердую фазу. Решающую роль при этом играет слагаемое  $\alpha_2(\partial p_1/\partial x)$  в уравнении импульсов твердой фазы, иногда называемое силой Архимеда; при

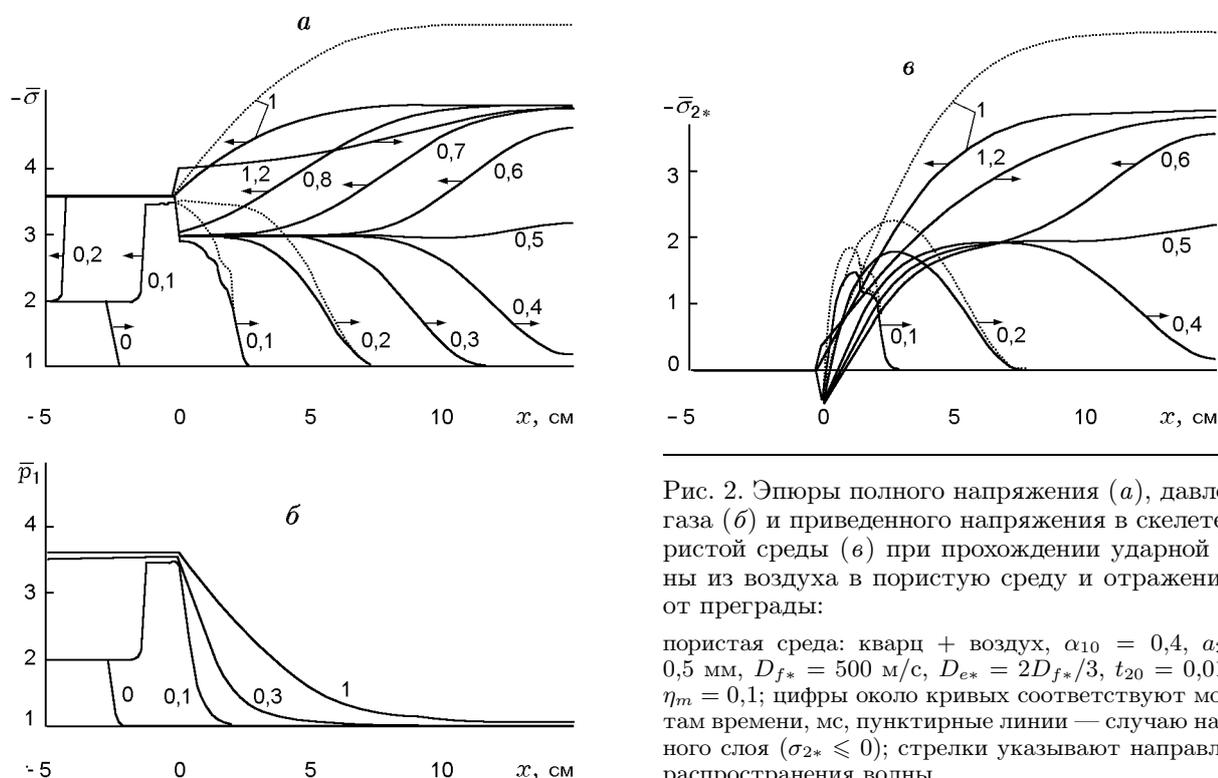


Рис. 2. Эпюры полного напряжения (а), давления газа (б) и приведенного напряжения в скелете пористой среды (в) при прохождении ударной волны из воздуха в пористую среду и отражении ее от преграды:

пористая среда: кварц + воздух,  $\alpha_{10} = 0,4$ ,  $a_{20} = 0,5$  мм,  $D_{f*} = 500$  м/с,  $D_{e*} = 2D_{f*}/3$ ,  $t_{20} = 0,01$  мс,  $\eta_m = 0,1$ ; цифры около кривых соответствуют моментам времени, мс, пунктирные линии — случаю насыпного слоя ( $\sigma_{2*} \leq 0$ ); стрелки указывают направление распространения волны

его отсутствии волна в твердой фазе не возбуждается (имеет практически нулевую амплитуду), интенсивности других сил (вязкого трения, присоединенных масс и т. д.) оказывается для этого недостаточно.

Перейдем к рассмотрению численных решений, полученных в рамках вышеописанной двухскоростной с двумя тензорами напряжений модели.

На рис. 2 представлены эпюры давления газа, полного напряжения и приведенного напряжения в скелете пористой среды в различные моменты времени. Контактной границе «воздух — пористая среда» соответствует координата  $x = 0$ . В результате взаимодействия воздушной ударной волны с пористым слоем в область газа отражается ударная волна; в пористой среде газ, фильтруясь через поры, приводит в движение частицы, которые, контактируя друг с другом, формируют в скелете деформационную волну сжатия и медленную волну разрежения (момент времени  $t = 0,1$  мс). Быстрая волна в газе практически не возбуждается (ее амплитуда очень мала). В моменты  $t = 0,2 \div 0,4$  мс деформационная волна

распространяется по пористому слою и подходит к жесткой стенке. При ее взаимодействии с преградой (стенкой) в область пористого слоя отражается волна сжатия ( $t = 0,6 \div 1,0$  мс), при этом напряжение на преграде существенно повышается. Отметим для сравнения, что безразмерное давление отражения от жесткой стенки при отсутствии пористого слоя равно  $P_w = 3,75$ , а теоретически максимально достижимое давление при отражении ударной волны от стенки, покрытой пористым слоем,  $P_{max} = 6,5$ . Для оценки  $P_{max}$  воспользуемся следующими рассуждениями: волна в газе отражается от пористой среды практически как от жесткой стенки, прошедшую в слой волну можно считать линейной и рассматривать ее отражение от преграды как акустическое. В конкретных расчетах значение  $P_{max}$  может не достигаться. Акустическое сопротивление пористой среды меньше, чем у жесткой стенки. Кроме того, оно зависит от интенсивности межфазного силового взаимодействия, структуры среды, пористости и т. д. Так, например, интенсивность прошедшей в пористую среду волны в случае насыпного слоя (пунктирные линии

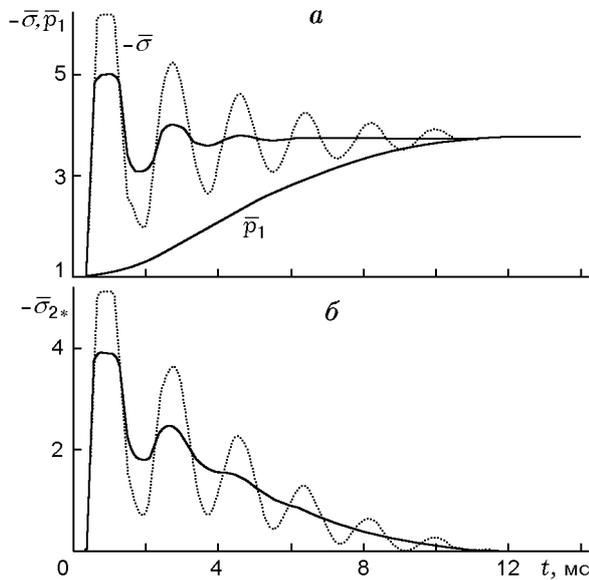


Рис. 3. Осциллограммы полного напряжения, давления газа (а) и приведенного напряжения (б) на преграде при экранировании ее пористым слоем: обозначения и параметры слоя такие же, как на рис. 2

на рис. 2) больше, чем для консолидированной пористой среды (сплошные линии). Соответственно больше и интенсивность волны, отраженной от стенки. Заметим, что в данных расчетах отражение от преграды происходит линейно, но если падающая волна имеет конечную длительность (импульс), то коэффициент отражения от стенки может стать меньше двух: пористая среда обладает дисперсионными и диссипативными свойствами, из-за которых падающая волна является «размазанной», и когда задний фронт волны доходит до стенки, его успевают догнать волны разрежения, понижая напряжение на преграде.

Из рис. 2 видно, что в консолидированной среде вблизи ее свободной поверхности могут возникать зоны растягивающих эффективных напряжений. В модельном случае отсутствия сил трения и присоединенных масс расчеты для насыпной и консолидированной сред совпадают, зона растягивающих напряжений исчезает, но полное напряжение и давление газа на контактной границе претерпевают скачок.

В момент времени  $t = 1,0$  мс отраженная волна подходит к граничной поверхности «воздух — пористая среда». В результате взаимодействия волны сжатия в пористой среде с границей слоя в область воздуха проходит слабая волна сжатия  $S_3$  (см. рис. 1), а в пористую среду распространяется волна разреже-

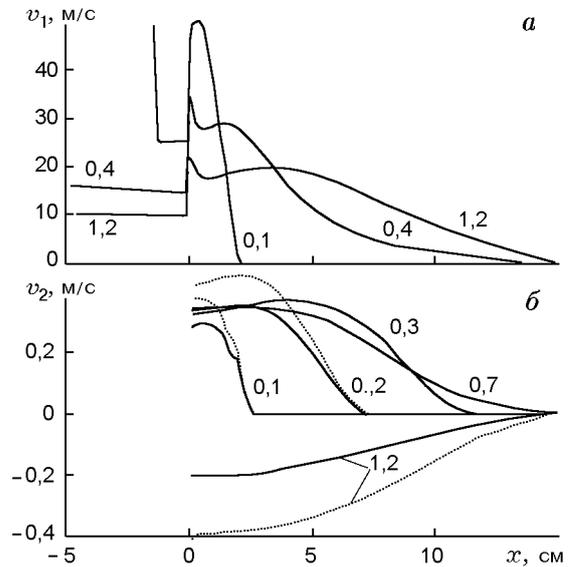


Рис. 4. Эпюры скоростей газовой (а) и твердой (б) фаз при прохождении ударной волны из воздуха в пористую среду:

обозначения и параметры слоя такие же, как на рис. 2

ния  $R_3$ , которая понижает относительное напряжение на преграде до 3,1. Дальнейшее развитие волнового процесса определяется взаимодействиями волн сжатия и разрежения с границей слоя и преградой, при этом напряжение на преграде растет при взаимодействии с ней волны сжатия и уменьшается при взаимодействии с преградой волны разрежения. Можно отметить, что волновая картина в экранирующем пористом слое определяется волнами сжатия и разрежения, распространяющимися по твердой фазе пористой среды, газ при этом продолжает фильтроваться через поры, непрерывно повышая давление на преграде.

Характер изменения полного напряжения на преграде (рис. 3) при экранировании ее пористым слоем существенно отличается от случая, когда пористый экран отсутствует: напряжение имеет немонотонный, волнообразный, с затухающими колебаниями профиль. При этом максимальное напряжение на стенке существенно превышает максимальное давление в случае отсутствия пористого слоя. За фазой сжатия на поверхности преграды следует фаза разрежения, в которой напряжение понижается. В последующем колебательный характер изменения полного напряжения на стенке сохраняется, но амплитуда колебаний уменьшается и напряжение стремится к значению  $P_w$ .

Определенный интерес представляет изме-

нение скоростей фаз (рис. 4). Скорость газа может на два порядка превышать скорость твердой фазы. Частицы насыпной среды несколько более подвижны, чем консолидированные. По мере распространения фильтрационной волны вглубь слоя скорость протекания газа через контактную границу падает, но на самой границе скачкообразно увеличивается. Воздух, нагретый в падающей и отраженной от слоя волнах до температуры 425 К, быстро остывает при фильтрации в слое, отдавая тепло твердой фазе, температура которой изменяется слабо. Пористость изменяется на десятые доли процента.

Исследовалось влияние параметров пористой среды на отражение воздушной ударной волны типа «ступенька». С увеличением толщины слоя до некоторого значения амплитуда колебаний полного напряжения на стенке растет, так как при малой толщине слоя передний фронт волны из-за его «размазанности» успевает догнать волна разрежения, идущая от свободной поверхности. При дальнейшем увеличении толщины слоя амплитуда остается постоянной. Период колебаний пропорционален толщине слоя, а скорость нарастания давления газа на поверхности преграды — обратно пропорциональна. Изменение пористости среды также не приводит к заметному изменению амплитуды полного напряжения, но при увеличении пористости скорость нарастания давления газа на стенке увеличивается. Более существенным фактором для амплитуды колебаний полного напряжения является размер зерен, так как увеличение их радиуса влечет за собой уменьшение удельной поверхности раздела фаз и, следовательно, интенсивности сил межфазного взаимодействия, а это, в свою очередь, уменьшает затухание деформационной и особенно фильтрационной волн. Таким образом, отмечено некоторое снижение амплитуды полного напряжения при увеличении размера зерен и увеличение крутизны профиля давления газа на преграде.

Трение между зернами скелета при его деформации делает поведение скелета вязкоупругим. Интенсивность межзеренного трения описывается временем релаксации  $t_{20}$  и отношением скоростей звука в скелете  $D_{f*}/D_{e*}$ . Предельные значения  $t_{20}$ , равные нулю и бесконечности, соответствуют упругому поведению скелета с различными модулями упругости  $E_{f*}$  и  $E_{e*}$ . Максимум диссипативных потерь из-за межзеренного трения наблюдается при конеч-

ном ненулевом значении  $t_{20}$ . С увеличением отношения  $D_{f*}/D_{e*}$  (или  $E_{f*}/E_{e*}$ ) эти потери растут. Межзеренное трение является основной причиной затухания деформационной волны.

Изменение акустической жесткости пористого слоя влияет на амплитуду и период колебаний полного напряжения на преграде. Рост скоростей звука или плотности материала скелета вызывает увеличение акустического сопротивления слоя и, следовательно, уменьшение амплитуды колебаний. Увеличение скоростей звука приводит к уменьшению времени пробега волной пористого слоя и, следовательно, уменьшает период колебаний, при этом растет интенсивность затухания колебаний.

Сила присоединенных масс больше сказывается на фильтрационной волне, чем на деформационной. С увеличением коэффициента  $\eta_m$  ( $0 \leq \eta_m \leq 1$ ), учитывающего структуру среды, уменьшается крутизна профиля давления газа на преграде. На полном напряжении это практически не сказывается. Отметим, что для газозвеси  $\eta_m = 1$ , а для пористой среды с прямолинейными цилиндрическими каналами, ориентированными вдоль направления движения,  $\eta_m = 0$ . Влияние пористости, размера зерен, времени релаксации, силы вязкого трения, присоединенных масс и т. д. на скорость и затухание деформационной и фильтрационной линейных волн можно проследить также по поведению соответствующих дисперсионных кривых [31].

Выполнены расчеты (рис. 5) применительно к условиям проведения экспериментов [7]. Эксперименты проводили на насыпной среде. Воздушная ударная волна, образующаяся после разрыва диафрагмы в вертикальной ударной трубе (длина камеры высокого давления 0,8 м, длина камеры низкого давления 1,5 м), набегала на слой шариков, лежащих на дне трубы сечением  $31 \times 31$  мм. Для регистрации воздействия на преграду в торце трубы под пористым слоем было установлено два датчика: первый открыт для контакта с частицами, второй закрыт тонкой сеткой (диаметр отверстий 0,2 мм). Открытый датчик записывал полное напряжение, закрытый — давление газа. В экспериментах варьировались материал, из которого изготовлены шарики, и толщина слоя ( $4 \leq h \leq 95$  мм). Интенсивность падающей ударной волны в воздухе соответствовала числу Маха  $M = 1,318$ ;  $P_w = 3,28$ . Параметры расчетной модели ( $t_{20} = 0,01$  мс,

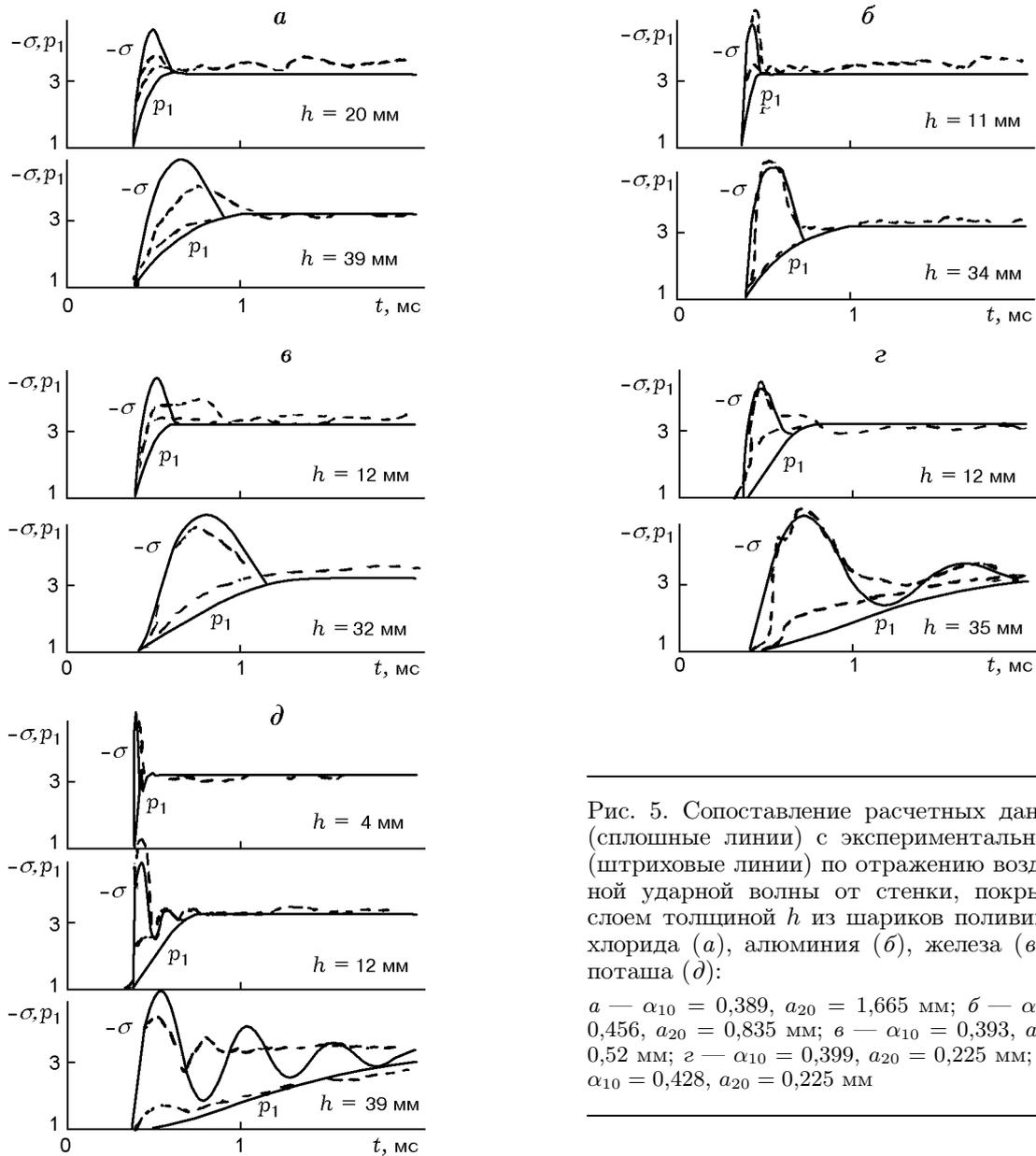


Рис. 5. Сопоставление расчетных данных (сплошные линии) с экспериментальными (штриховые линии) по отражению воздушной ударной волны от стенки, покрытой слоем толщиной  $h$  из шариков поливинилхлорида (*а*), алюминия (*б*), железа (*в*, *г*), поташа (*д*):

*а* —  $\alpha_{10} = 0,389$ ,  $a_{20} = 1,665$  мм; *б* —  $\alpha_{10} = 0,456$ ,  $a_{20} = 0,835$  мм; *в* —  $\alpha_{10} = 0,393$ ,  $a_{20} = 0,52$  мм; *г* —  $\alpha_{10} = 0,399$ ,  $a_{20} = 0,225$  мм; *д* —  $\alpha_{10} = 0,428$ ,  $a_{20} = 0,225$  мм

$\eta_m = 0,1$ , *а* —  $D_{f*} = 408$  м/с,  $D_{e*} = 181$  м/с; *б* —  $D_{f*} = 375$  м/с,  $D_{e*} = 250$  м/с; *в* —  $D_{f*} = 250$  м/с,  $D_{e*} = 111$  м/с; *г* —  $D_{f*} = 350$  м/с,  $D_{e*} = 156$  м/с; *д* —  $D_{f*} = 475$  м/с,  $D_{e*} = 317$  м/с) подбирались из условия наилучшего совпадения расчетной и экспериментальной осциллограмм для одной высоты засыпки  $h$ , затем эти параметры использовали при расчете для других значений  $h$ .

Из сравнения расчетных и эксперимен-

тальных осциллограмм полного напряжения и давления газа на торце камеры низкого давления можно сделать вывод о качественном согласии расчетного решения с экспериментальными данными. Количественные отличия больше проявляются при толщинах слоя  $h \approx 80 \div 90$  мм. Эти отличия могут быть связаны с недостаточно точным описанием процессов нагружения и разгрузки пористой среды используемой моделью. В реальных средах, возможно,

даже при небольших циклических нагрузках необходим учет пластических явлений, а также эффектов, связанных с уплотнением среды, изменением свойств среды в уплотненном состоянии, и эффектов, вызванных неоднородностью процесса, и др. Так, например, в [32] при решении задачи об отражении ударной волны в пористом упругопластическом материале обнаружены такие режимы, при которых отраженная ударная волна не возникает вообще. В этом случае вся энергия падающей ударной волны переходит в тепловую за счет диссипации при вязком затекании пор.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пористый экран может усиливать динамическое воздействие на преграду воздушной ударной волны типа «ступенька». В случае насыпной среды степень усиления может быть больше, чем для консолидированной среды. Степень усиления также зависит от толщины слоя, его структуры и размера зерен. Построенная теория позволяет описать известные экспериментальные данные.

Работа выполнена при финансовой поддержке фонда Президента РФ для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (код проекта 96-15-96001), фонда Минобрнауки РФ в области фундаментального естествознания (код проекта 97-0-4.2-130) и Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 98-01-00831).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. И., Попов Д. Е. Исследование особенностей распространения и отражения волн давления в пористой среде // ПМТФ. 1975. № 6. С. 74–77.
2. Гвоздева Л. Г., Фаресов Ю. М. О взаимодействии воздушной ударной волны со стенкой, покрытой пористым сжимаемым материалом // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10, вып. 19. С. 1153–1156.
3. Гвоздева Л. Г., Фаресов Ю. М., Фокеев В. П. Взаимодействие воздушной ударной волны с пористыми сжимаемыми материалами // ПМТФ. 1985. № 3. С. 111–115.
4. Гельфанд Б. Е., Губанов А. В., Тимофеев Е. И. Взаимодействие воздушных ударных волн с пористым экраном // Изв. АН СССР. МЖГ. 1983. № 4. С. 79–84.
5. Гельфанд Б. Е., Медведев С. П., Поленов А. Н., Фролов С. М. Передача ударно-волновой нагрузки насыщенными средами // ПМТФ. 1988. № 2. С. 115–121.
6. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., et al. Experimental investigation of the interaction between weak shock waves and granular layers // Experiments in Fluids. 1997. V. 22. P. 432–443.
7. Britan A., Ben-Dor G., Elperin T., et al. Mechanism of compressive stress formation during weak shock waves impact with granular materials // Experiments in Fluids. 1997. V. 22. P. 507–518.
8. Britan A., Ben-Dor G., Elperin T., et al. Gas filtration during the impact of weak shock waves on granular layer // Intern. J. Multiphase Flow. 1997. V. 23, N 3. P. 473–491.
9. Гвоздева Л. Г., Фаресов Ю. М. Приближенный расчет параметров стационарных ударных волн в пористых сжимаемых материалах // ПМТФ. 1986. № 1. С. 120–125.
10. Гвоздева Л. Г., Ляхов В. Н., Раевский Д. К. и др. Численное исследование распространения ударной волны в газе и пористой среде // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 4. С. 125–129.
11. Гвоздева Л. Г., Фаресов Ю. М. О расчете параметров стационарных ударных волн в пористой сжимаемой среде // Журн. техн. физики. 1985. Т. 55, вып. 4. С. 773–775.
12. Гельфанд Б. Е., Медведев С. П., Поленов А. Н. и др. О влиянии пористого сжимаемого покрытия на характер ударно-волнового нагружения конструкций // Журн. техн. физики. 1987. Т. 57, вып. 4. С. 831–833.
13. Фомин В. М., Ческидов П. А. Упруго-пластическая модель пористой среды, насыщенной газом // Численные методы решения задач теории упругости и пластичности. Новосибирск: ИТПМ СО РАН, 1982. С. 33–39.
14. Levy A., Ben-Dor G., Sorek S. Numerical investigation of the propagation of shock waves in rigid porous materials: development of the computer code and comparison with experimental result // J. Fluid Mech. 1996. V. 324. P. 163–179.
15. Губайдуллин А. А., Урманчиев С. Ф. Исследования прохождения волн сжатия из жидкости или газа в насыщенную пористую среду и отражения их от преград // Акустика неоднородных сред. Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 1992. С. 122–128.
16. Губайдуллин А. А., Урманчиев С. Ф. Волны сжатия в насыщенных газом пористых средах // Труды 1-й Рос. нац. конф. по теплообмену. М.: МЭИ, 1994. Т. 7. С. 71–77.
17. Губайдуллин А. А., Дудко Д. Н. Взаимодействия с преградами волн сжатия в газонасыщенной пористой среде // Акустика неоднородных сред, Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 1997. Вып. 112. С. 113–118.
18. Gubaidullin A. A., Dudko D. N. Processes of propagation and interaction of shock waves

- with obstacles in gas-saturated porous media // Biot Conf. on Poromechanics. Louvain-la-Neuve, Belgium, 1998. P. 217–220.
19. **Кутушев А. Г., Рудаков Д. А.** Численное исследование воздействия ударной волны на преграду, экранируемую слоем пористой порошкообразной среды // ПМТФ. 1993. Т. 34, № 5. С. 25–31.
  20. **Кутушев А. Г., Родионов С. П.** Численное исследование влияния параметров слоя насыпной среды и падающей ударной волны на давление на экранируемой плоской стенке // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35, № 2. С. 105–113.
  21. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. Ч. 1. М.: Наука, 1987.
  22. **Ergun S.** Fluid flow through packed columns // Chem. Eng. Progress. 1952. V. 48, N 2. P. 89–94.
  23. **Чудновский А. Ф.** Теплообмен в дисперсных средах. М.: Гостехиздат, 1954.
  24. **Рихтмайер Р., Мортон К.** Разностные методы решения краевых задач. М.: Мир, 1972.
  25. **Deresiewicz H., Skalak R.** On uniqueness in dynamic poroelasticity // Bull. Seismological Soc. Amer. 1963. V. 53, N 4. P. 783–788.
  26. **Федоров А. В., Фомин В. М.** К теории комбинированного разрыва в газовзвесах // Физическая газодинамика реагирующих сред. Новосибирск, 1990. С. 128–134.
  27. **Федоров А. В.** Структура комбинированного разрыва в газовзвесах при наличии хаотического давления частиц // ПМТФ. 1992. № 5. С. 36–41.
  28. **Cieszko M., Kubik J.** On the compatibility conditions in the fluid-fluid saturated porous solid contact problems // Arch. Mech. Warszawa. 1993. V. 45, N 1. P. 77–91.
  29. **Крайко А. Н., Миллер Л. Г., Ширковский И. А.** О течениях газа в пористой среде с поверхностями разрыва пористости // ПМТФ. 1982. № 1. С. 111–118.
  30. **Киселев С. П., Фомин В. М.** Соотношения на комбинированном разрыве в газе с твердыми частицами // ПМТФ. 1984. № 4. С. 112–119.
  31. **Nigmatulin R. I., Gubaidullin A. A.** Linear waves in saturated porous media // Transport in porous media. 1992. V. 9, N 1&2. P. 135–142.
  32. **Киселев С. П.** Структура ударных волн сжатия в пористых упругопластических материалах // ПМТФ. 1998. Т. 39, № 6. С. 27–32.

*Поступила в редакцию 18/V 1999 г.,  
в окончательном варианте — 12/X 1999 г.*