

## ЭВОЛЮЦИЯ ВОЛНОВОГО ИМПУЛЬСА ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ПОРИСТОЙ ПЕРЕГОРОДКЕ

Ситдикова Л.Ф.,

научный руководитель канд. физ.-мат. наук Дмитриев В.Л.

*Стерлитамакская государственная педагогическая академия им. Зайнаб Бишиевой*

Теоретическое и экспериментальное исследование распространения акустических волн в пористой среде является актуальным и существенно для развития представлений о процессах, сопровождающих применение современных технологий использования пористых сред. Для ряда отраслей современной техники и технологии весьма актуальна проблема подавления акустических, ударных и детонационных волн в газах. Большое внимание к этой проблеме обусловлено необходимостью разработки эффективных мер борьбы с шумами в различных технологических и энергетических установках, необходимостью создания надежных систем взрывной защиты, обеспечивающих безопасность труда и технологического оборудования. Известно много работ, касающихся акустики пористых сред и посвященных изучению процессов распространения волн в таких средах [1 – 12].

В представленной работе исследованы процессы отражения и прохождения импульса волны давления на границе раздела однородной и пористой сред для случаев «закрытых» и «открытых» границ пористой преграды.

Пусть волновой импульс, распространяясь по внешней среде (например, по воздуху), перпендикулярно падает на поверхность пористой среды. Эту поверхность, на которую падает импульс, будем считать первой границей, а параллельную ей, расположенную на расстоянии  $l$  – второй границей. Два других измерения, высоту и ширину пористой среды будем считать достаточно большими, чтобы пренебречь краевыми эффектами.

Будем рассматривать два различных случая, определяемых характером первой и второй границ: открытая граница (поры перегородки сообщаются с внешней средой); закрытая граница (поры перегородки отделены от внешней среды тонкой непроницаемой пленкой). В работе рассматриваются короткие импульсы, пространственная протяженность которых намного меньше расстояния  $l$ .

Распространение линейных волн в насыщенных газом пористых средах, исследовано в [12]. В указанной работе получено дисперсионное соотношение, учитывающее процессы межфазного теплообмена и межфазные силы взаимодействия:

$$\frac{K}{w} = \pm \frac{1}{C_g \sqrt{2}} \sqrt{B_1 + B_2 \tilde{C}^2 \pm \sqrt{(B_1 + B_2 \tilde{C}^2)^2 - 4B_3 \tilde{C}^2}},$$

$$B_1 = (1 + c_T)(1 + i\tilde{C}_V a_{s0}), \quad B_2 = \frac{(1 + ib\tilde{C}_V)}{1 - iwm_s/E_s}, \quad B_3 = \frac{(1 + c_T)(i\tilde{C}_V(a_{s0} + b\tilde{C}_V g_0) + 1)}{1 - iwm_s/E_s},$$

$$b = \frac{r_{g0}^0}{r_{s0}^0}, \quad \tilde{C} = \frac{C_g}{C_s}, \quad C_g = \sqrt{\frac{gP_0}{r_{g0}^0}}, \quad C_s = \sqrt{\frac{E_s}{r_{s0}^0}}, \quad c_T = (g - 1)A\Pi_g(y_g), \quad c_V = \frac{1}{wt^*},$$

$$\Pi_g(y_g) = 3\frac{\tilde{Y}_g}{\tilde{H}_g} \operatorname{cth}(y_g) - \frac{1\Pi_g}{\tilde{H}_g} g^2, \quad A = 1/\frac{\tilde{Y}_g}{\tilde{H}_g} + y_s \operatorname{cth}(y_s) \Pi_g(y_g) / h_{\tilde{F}}^{\Pi}$$

$$n_g = m_g / r_{g0}^0, \quad y_g = \sqrt{-iwa_0^2/A_g}, \quad y_s = \sqrt{-iwb_0^2/A_s},$$

$$t^{*-1} = -\frac{1}{2} iwh_m a_{g0} a_{s0} + h_m a_{g0} a_{s0} n_g a_0^{-2} + h_B (1 + i) a_{g0} a_{s0} a_0^{-1} \sqrt{2n_g w},$$

$$A_g = \frac{l_g}{r_{g0}^0 c_g}, A_s = \frac{l_s}{r_{s0}^0 c_s}, h = \frac{a_{s0} r_{s0}^0 c_s}{a_{g0} r_{g0}^0 c_g},$$

где  $w$  – круговая частота;  $K$  – комплексное волновое число;  $C_g, C_s$  – фазовые скорости волны в газе и в скелете;  $P_0$  – давление в газе в невозмущенном состоянии;  $g$  – показатель адиабаты;  $E_s$  – модуль упругости пористого скелета;  $m_g$  – динамическая вязкость газа;  $m_s$  – коэффициент вязкости скелета;  $a$  – радиус поры;  $b$  – полутолщина стенки поры;  $a_j$  – объемное содержание фаз,  $c_j$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $l_j$  – коэффициент теплопроводности,  $r_{j0}^0$  – начальная истинная плотность  $j$ -й фазы;  $h_m, h_n, h_B$  – коэффициенты, зависящие от параметров пористой среды [3]. Нижний индекс  $j = s, g$  относится к параметрам скелета и газа в порах, дополнительный нижний индекс 0 – к начальному состоянию, верхний индекс 0 – соответствует истинному значению параметра.

Коэффициенты  $c_V$  и  $c_T$  учитывают влияние, соответственно, нестационарных сил межфазного взаимодействия и теплообмена между скелетом и газом на динамику «быстрой» и «медленной» волн.

Найдем коэффициенты отражения  $N$  и прохождения  $M$  волн, определяемые соответственно как отношения давлений отраженной волны к падающей волне и прошедшей волны к падающей волне.

Учтем, что, когда плоская волна падает на границу раздела двух сред, должны быть сохранены условия непрерывности сплошности среды на границе раздела и равенство сил по обеим сторонам границы раздела. Из закона неразрывности среды следует равенство скоростей первой и второй сред, а вследствие равенства действия и противодействия должны быть одинаковы давления на границе раздела.

После соответствующих выкладок и преобразований, для первой границы получим следующие коэффициенты отражения и прохождения:

$$N_{1,l} = \frac{1 - D_{1,l}}{1 + D_{1,l}}, M_{1,l} = \frac{2}{1 + D_{1,l}},$$

$$D_{1,o} = C_e w \frac{K_g (1 + c_T)}{K_g} C_g^{-2} + \frac{K_s}{K_g} - \frac{1}{K_g} \frac{a_{s0} b C_s^2}{E_s}, D_{1,c} = \frac{r_{g0}^0 C_g}{c_m w} \frac{1}{D_{2,o}^{(g)}}.$$

Аналогично, для второй границы имеем:

$$N_{2,l}^{(j)} = \frac{D_{2,l}^{(j)} - 1}{D_{2,l}^{(j)} + 1}, M_{2,l}^{(j)} = \frac{2D_{2,l}^{(j)}}{D_{2,l}^{(j)} + 1},$$

$$D_{2,o}^{(g)} = \frac{C_g \frac{K_g}{K_g} + \frac{ia_{g0} c_v w^2 (1 + c_T)}{K_s C_g^2}}{w \frac{K_g}{K_g} + ia_{s0} c_v + \frac{ia_{g0} c_v K_g}{K_s}}, D_{2,o}^{(s)} = c_m \frac{wr_{g0}^0 C_g}{E_s K_s}, D_{2,c}^{(g)} = D_{2,o}^{(g)} / a_{g0}, D_{2,c}^{(s)} = D_{2,o}^{(s)} / a_{s0}.$$

Здесь верхний индекс  $j = g, s$ , заключенный в скобки, соответствует газовой фазе и скелету соответственно, а нижний индекс  $l = o, c$  – случаям «открытой» и «закрытой» границ. На основе полученных выражений для коэффициентов отражения и прохождения рассмотрим динамику волны конечной длительности при прохождении через пористую преграду.

Пусть с левой стороны на границу раздела «газ (или вода) – пористая преграда» ( $x < 0$ ) падает импульс давления, который имеет колоколообразную форму и описывается выражением  $p^{(0)}(0, t) = \exp\left[-\frac{t-t_m}{t_* / 2}\right]^2$ . Здесь  $t_*$  и  $t_m$  определяют

характерную протяженность импульса и момент времени, на которое приходится максимум амплитуды первоначального импульса. Отраженный и прошедший сигналы, используя преобразование Фурье, запишем в виде:

$$p^{(r)}(0, t) = \frac{1}{P_0} \int_{-\infty}^{\infty} p^{(0)}(0, t) N(w) \exp(iw(t - t)) dw$$

$$p^{(t)}(0, t) = \frac{1}{P_0} \int_{-\infty}^{\infty} p^{(0)}(0, t) M(w) \exp(iw(t - t)) dw$$

Здесь  $p^{(0)}(0, t)$  – осциллограмма давления для падающей волны.

На рис. 1 указано расположение датчиков, регистрирующих импульсы давлений в среде. Датчик D1 размещен с левой стороны, вблизи первой границы пористой среды и регистрирует исходный импульс давления и отраженный. Датчики D2 и D3 расположены внутри пористой среды, вблизи первой границы и регистрируют прошедшие импульсы давлений в порах среды и материале скелета соответственно. Датчики D4 и D5 расположены внутри пористой среды, вблизи второй границы и регистрируют импульсы, дошедшие до этой границы и отраженные от нее («медленная» и «быстрая» волны соответственно). Датчик D6 расположен справа от пористой среды, вблизи второй границы и регистрирует прошедшие через вторую границу импульсы давлений (по порам и по скелету).

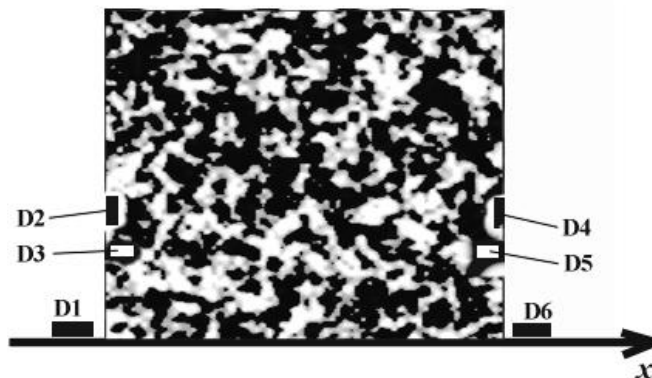


Рис 1. Схематизация пористой среды и расположение датчиков.

На основе результатов численной реализации, полученных с использованием метода быстрого преобразования Фурье для эволюции импульса давления при взаимодействии с пористой преградой толщиной 1 м для «открытых» и «закрытых» границ пористой перегородки, можно сделать следующие выводы. Для «открытых» границ затухание импульса увеличивается при увеличении доли материала скелета пористой перегородки. Увеличение доли материала скелета ведет также к росту отраженной части импульса от первой границы пористой перегородки. Импульс, распространяющийся по газу в порах, проходит вторую границу пористой перегородки практически без отражения, а распространяющийся по скелету среды – полностью отражается от нее. В случае «закрытых» границ пористая перегородка практически полностью экранирует исходный импульс.

Для случая «открытой» границы установлено, что определяющее влияние на затухание импульса давления оказывает начальный радиус пор. Учет межфазного теплообмена и силы Бассэ приводит к дополнительному уменьшению (до 30 % и более) амплитуды импульса, преодолевающего пористую среду, насыщенную газом.

#### Список литературы

1. Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н. и др. О влиянии пористого сжимаемого покрытия на характер ударно-волнового нагружения конструкций. // Журнал технической физики. 1987. Т. 57. Вып. 4. – С. 831-833.
2. Гвоздева Л.Г., Фаресов Ю.М. О расчете параметров стационарных ударных волн в пористой сжимаемой среде. // Журнал технической физики. 1985. Т. 55. Вып. 4. – С. 773-775.
3. Губайдуллин А.А., Кучугурина О.Ю. Распространение слабых возмущений в трещиновато-пористых средах. // ПММ. 1999. Т.63. Вып. 5. – С. 816-825.
4. Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Урманчеев С.Ф. Моделирование взаимодействия воздушной ударной волны с пористым экраном. // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. № 4. – С. 87-96.
5. Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Урманчеев С.Ф. Воздействие воздушных ударных волн на преграды, покрытые пористым слоем. // Вычислительные технологии. 2001. Т. 6. № 3. – С. 3-18.
6. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Численное исследование взаимодействия волны сжатия со слоем пористой среды в линейном приближении. // Труды Института механики УНЦ РАН по материалам Российской научной конференции «Механика и химическая физика сплошных сред». Вып. 5. Уфа: Изд-во «Гилем», 2007. – С. 151-156.
7. Болдырева О.Ю., Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Кутушев А.Г. Численное исследование передачи ударно-волновой нагрузки экранируемой плоской стенкой через слой порошкообразной среды и разделяющий их воздушный зазор. // Физика горения и взрыва, 2007. Т. 43, № 1. – С. 773- 775.
8. Егоров А.Г., Костерин В.В., Скворцов Э.В. Консолидация и акустические волны в насыщенных пористых средах. – Казань: КГУ. 1990. – 102 с.
9. Рейнер М. Деформация и течение. М.: Гостехиздат, 1963. – 381 с.
10. Хусаинов И.Г., Дмитриев В.Л. Исследование эволюции волнового импульса при прохождении через пористую преграду. // ПМТФ. 2011. Т.52. № 5. – С. 136-145.
11. Шагапов В.Ш. Влияние тепломассообменных процессов между фазами на распространение малых возмущений в пене. // Теплофизика высоких температур. 1985. Т. 23. №1. – С. 126-132.
12. Шагапов В.Ш., Хусаинов И.Г., Дмитриев В.Л. Распространение линейных волн в насыщенных газом пористых средах с учетом межфазного теплообмена. // ПМТФ. 2004. Т.45. № 4. – С. 114-120.