

УДК 532.546

ЭВОЛЮЦИЯ ИМПУЛЬСА ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ ПОРИСТУЮ ПРЕГРАДУ, РАСПОЛОЖЕННУЮ В ВОДЕ

Хусаинов И.Г.

*Стерлитамакский филиал ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет»,
Стерлитамак, e-mail: kig10@mail.ru*

Решена задача о прохождении импульса давления, распространяющегося по воде, через пористую преграду, насыщенную газом, с учетом состояния пор на границе. Рассмотрены случаи «открытой» и «закрытой» пор на границе пористой преграды. Построена математическая модель в виде дифференциальных уравнений для описания процесса распространения одномерных волн в пористой среде в двухскоростном приближении. Получены коэффициенты отражения и прохождения волн через границу «вода – пористая среда». Проанализировано влияние параметров пористой среды (начального значения объемной доли газа и размеров пор) на величину амплитуды прошедшего через вторую границу преграды импульса давления. Установлено, что когда поры на границе «открытые», то волна почти полностью отражается от первой границы. В этом случае эволюция импульса слабо зависит от радиуса пор и исходной объемной доли газа в среде. В случае «закрытых» пор на границе эволюция импульса существенно зависит от исходной объемной доли газа.

Ключевые слова: пористая среда, акустическая волна, волновой импульс

EVOLUTION OF THE IMPULSE OF PRESSURE PROPAGATING THROUGH A POROUS OBSTACLE LOCATED IN WATER

Khusainov I.G.

FGBOU VPO'S Sterlitamak branch «Bashkir state university», Sterlitamak, e-mail: kig10@mail.ru

The problem about passages of an impulse of the pressure extending on water, through the porous obstacle saturated by gas, in view of a status pore on border is solved. The cases of «opened» and «closed» pore of boundaries of the porous obstacle are considered. The mathematical model in the form of the differential equations for the description of process of distribution of one-dimensional waves in the porous environment in two-high-speed approach is constructed. Factors of reflection and passage of waves through border «water – the porous environment» are received. Influence of parameters of the porous environment (initial value of the gas volume fraction and pore size) on size of amplitude of the past through the second border obstacle of an impulse of pressure is analysed. It is established, when pore on border «opened» the wave almost is completely reflected from the first border. In this case evolution of an impulse poorly depends on radius pore and an initial value of the gas volume fraction in the environment. Case of the «closed» pore on border evolution of an impulse essentially depends on an initial value of the gas volume fraction.

Keywords: porous medium, acoustic wave, wave pulse

В настоящее время для ряда отраслей современной техники и технологии весьма актуальна проблема подавления акустических, ударных и детонационных волн в газах и жидкостях. Большое внимание к этой проблеме обусловлено необходимостью разработки эффективных мер борьбы с шумами в различных технологических и энергетических установках, а также необходимостью создания надежных систем защиты от взрыва, обеспечивающих безопасность труда и технологического оборудования. В связи с этим изучение отражения акустических волн от пористой преграды является весьма актуальным.

В [9] изучена эволюция волнового импульса при прохождении через пористую преграду, расположенную в газе и насыщенную таким же газом. В данной работе рассматривается случай, когда преграда находится в воде. Установлены закономерности отражения и прохождения волн через границу «вода – пористая среда».

Акустические волны используются при определении параметров призабойной зоны пласта [2, 5, 10, 14, 15], перфорированной зоны скважины [3, 6], а также нагрева пористых сред, насыщенных жидкостью [4, 8].

Основные уравнения

Пусть волновой импульс, распространяясь по жидкости, падает нормально на плоскую поверхность пористой среды, насыщенной газом. Толщина пористой среды (преграды) равна l (см. рис. 1), а два других её измерения, высота и ширина, достаточно большие, чтобы пренебречь краевыми эффектами. Поверхность преграды, на которую падает начальный импульс, будем считать первой границей, а параллельную ей и расположенную на расстоянии l – второй границей. В работе рассматриваются два различных случая, определяемые характером первой и второй границ:

а) «открытая» граница (в этом случае газ, содержащийся в порах, расположенных

непосредственно на границе, соприкасается с водой, окружающей пористую среду);

б) «закрытая» граница (на границе между пористой средой и водой находится тонкая неподатливая плёнка нулевой массы).

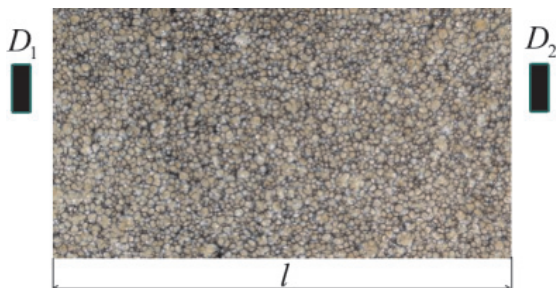


Рис. 1. Схема пористой преграды с датчиками D_1 и D_2

Когда волна падает на первую границу преграды, то одна часть волны проходит через границу в пористую среду, а другая часть – отражается. В пористой среде возникают две волны – «быстрая» и «медленная» [9]. «Медленная» и «быстрая» волны, распространяясь по пористой среде, достигают второй границы $x=l$. Часть каждой из этих («медленной» и «быстрой») волн отражается от второй границы, а другая часть – проходит через эту границу. В статье рассматриваются отраженная от первой границы и прошедшая через вторую границу волны.

Чтобы определить коэффициенты отражения и прохождения волны, сначала нужно рассмотреть распространение волны внутри преграды, т.е. в насыщенной газом пористой среде. Для описания исследуемого процесса примем следующие допущения: все поровые включения среды имеют сферическую форму и одинаковый радиус (характерными размерами среды будем считать средний радиус пор – a_0 и среднюю полутолщину стенок пор – b_0); значения длин рассматриваемых в среде волн намного больше размеров пор.

Запишем макроскопические линеаризованные уравнения неразрывности для скелета пористой среды и газа в порах в двух-скоростном приближении:

$$\frac{\partial \rho_j}{\partial t} + \rho_{j0} \frac{\partial v_j}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

где ρ_j , v_j – плотность и скорость j -й фазы соответственно; нижним индексом $j = s, g$ отмечены параметры скелета и газа в порах, дополнительным нижним индексом 0 – параметры, соответствующие невозмущенному начальному состоянию системы.

Уравнение импульсов для системы в целом запишем в виде

$$\rho_{g0} \frac{\partial v_g}{\partial t} + \rho_{s0} \frac{\partial v_s}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_s^*}{\partial x} - \frac{\partial p_g}{\partial x}, \quad (2)$$

где p_g – давление в газовой фазе; σ_s^* – приведенное напряжение в скелете, определяемое через осредненное истинное напряжение σ_s^0 : $\sigma_s^* = \alpha_{s0} (\sigma_s^0 + p_g)$; α_{s0} – начальная объемная доля твердой фазы. Верхним индексом 0 отмечены параметры, соответствующие истинным значениям.

Примем для скелета модель Максвелла. Тогда имеем

$$\alpha_{s0} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{E_s} \frac{\partial \sigma_s^*}{\partial t} + \frac{\sigma_s^*}{\mu_s}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial v_s}{\partial x},$$

где E_s , μ_s – эффективные модуль упругости и коэффициент сдвига пористого скелета соответственно.

Уравнение импульсов для газовой фазы имеет следующий вид:

$$\rho_{g0} \frac{\partial v_g}{\partial t} = -\alpha_{g0} \frac{\partial p_g}{\partial x} - F. \quad (4)$$

Здесь α_{g0} – начальная объемная доля газовой фазы; F – межфазная сила взаимодействия [9].

Процессы диссипации тепла в изучаемой системе определяются распределением микротемпературы вблизи межфазных границ. Для описания микронеоднородностей температуры используется сферическая ячейчатая схема, предложенная в работах [9]. При этом пористая среда, насыщенная газом, рассматривается как система сферических газовых пузырьков, окруженных слоем материала скелета. Таким образом, в каждой макроскопической точке, определяемой координатой x , вводится типичная ячейка, состоящая из газового пузырька и приходящейся на него доли скелета. Внутри ячейки имеется распределение температуры $T'_j(t, x, r)$ и плотности газа $\rho'_g(t, x, r)$ (r – координата, отсчитываемая от центра ячейки). Давление внутри ячейки полагается однородным.

Связь между микроплотностью $\rho'_g(t, x, r)$ и истинной плотностью $\rho_g^0(t, x)$, являющейся средней для газовой фазы, определяется с помощью выражения [1]:

$$\rho_g^0 = \frac{3}{4\pi a_0^3} \int_0^{a_0} \rho'_g 4\pi r^2 dr. \quad (5)$$

Для истинных плотностей ρ_j^0 и объемной доли фаз α_j можно записать следующие кинематические соотношения: $\rho_j = \alpha_j \rho_j^0$, $\alpha_g + \alpha_s = 1$.

Для описания распределения температуры в ячейке пористой среды запишем систему уравнений теплопроводности:

$$\begin{aligned} \rho_{g0}^0 c_g \frac{\partial T'_g}{\partial t} &= \lambda_g r^{-2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial T'_g}{\partial r} \right) + \frac{\partial p_g}{\partial t}, \quad (0 < r < a_0); \\ \rho_{s0}^0 c_s \frac{\partial T'_s}{\partial t} &= \lambda_s \frac{\partial^2 T'_s}{\partial r^2}, \quad (a_0 < r < a_0 + b_0), \end{aligned} \quad (6)$$

где λ_j , c_j ($j = g, s$) – теплопроводность и удельная теплоемкость.

Граничные условия для уравнений (6) запишем в виде

$$\begin{aligned} T'_g &= T'_s; \quad \lambda_s \frac{\partial T'_s}{\partial r} = \lambda_g \frac{\partial T'_g}{\partial r}, \quad (r = a_0); \\ \frac{\partial T'_g}{\partial r} &= 0, \quad (r = 0); \\ \frac{\partial T'_s}{\partial r} &= 0, \quad (r = a_0 + b_0). \end{aligned} \quad (7)$$

Газ, находящийся в порах среды, будем считать калорически совершенным. Тогда

$$p_g = \rho_g^0 R T'_g, \quad (8)$$

где R – газовая постоянная.

Для бегущих гармонических волн в работе получено дисперсионное соотношение. Написаны условия для границы «вода – пористая среда» и получены коэффициенты отражения и прохождения.

Прохождение импульса давления через преграду

С использованием полученных выражений для коэффициентов отражения и прохождения гармонических плоских волн на первой и второй границах рассмотрим эволюцию волны конечной длительности, проходящей через пористую преграду. В зависимости от толщины пористой преграды будем рассматривать импульсы давлений, временная протяженность которых позволяет не учитывать влияние отраженного от противоположной границы импульса на прохождение им рассматриваемой границы.

Пусть слева от преграды на границу раздела «вода – пористая среда» падает импульс давления, имеющий колоколообразную форму [7, 11–13]. В численных расчетах временная протяженность импульсного сигнала равна $2,5 \cdot 10^{-4}$ с, а толщина пористой преграды $l = 0,5$ м.

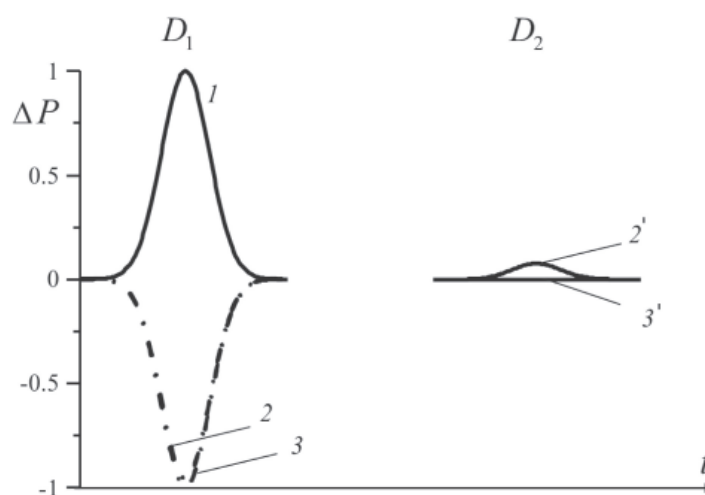


Рис. 2. Влияние состояния пор на границе преграды на эволюцию импульса давления. Линия 1 – исходный импульс; линии 2 и 3 – отраженные от первой границы импульсы; линии 2' и 3' – прошедшие через вторую границу импульсы. Линии 2 и 2' соответствуют случаю, когда поры на границе закрытые, а линии 3 и 3' – когда поры на границе открытые

Результаты численной реализации анализа процессов отражения и прохождения импульсных возмущений через пористую преграду с «открытыми» и «закрытыми» порами на границе, проведенной с использованием метода дискретного преобразования Фурье, представлены на рис. 2–3. Осциллограммы D_1 и D_2 соответствуют показаниям датчиков D_1 и D_2 , расположенных перед пористой преградой и после нее. Датчик D_1 регистрирует исходный и отраженный от первой границы пори-

стой преграды импульсы давления, а датчик D_2 – импульс, прошедший через вторую границу преграды.

Зависимость эволюции импульса давления от состояния пор на границе демонстрируется на рис. 2. Исходная объемная доля газа в пористой среде равна $\alpha_{g0} = 0,9$. Когда поры на границе «открыты», то волна почти полностью отражается от первой границы (как от «свободной» границы). В этом случае эволюция импульса слабо зависит от радиуса пор и исходной объемной доли газа в среде.

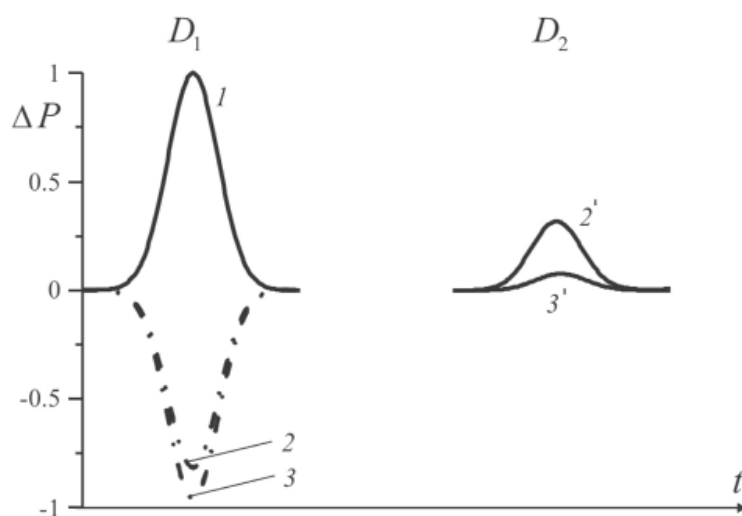


Рис. 3. Эволюция импульса давления, преодолевающего пористую преграду с закрытыми порами на границе. Линиям 2 и 2' соответствует $\alpha_{g0} = 0,5$, а линиям 3 и 3' – $\alpha_{g0} = 0,9$. Остальные обозначения линий такие же, как на рис. 2

На рис. 3 показано влияние исходной объемной доли газа в пористой среде на значение амплитуды прошедшего через преграду импульса для случая «закрытых» пор на границе. Видно, что эволюция импульса существенно зависит от исходной объемной доли газа α_{g0} . Установлено, что при уменьшении α_{g0} от 90 до 50% величина амплитуды импульса, прошедшего через преграду, увеличивается от 10 до 40% от исходной амплитуды. В этом случае эволюция импульса слабо зависит от радиуса пор.

Вывод

Установленные закономерности прохождения и отражения волн конечной длительности от насыщенной газом пористой преграды могут быть использованы при разработке средств защиты объектов от акустических, ударных и детонационных волн.

Работа выполнена при поддержке гранта СФ БашГУ № В14-19.

Список литературы

1. Володин С.В., Дмитриев В.Л., Хусаинов И.Г. Распространение линейных волн во влажных насыщенных газом пористых средах // Теплофизика высоких температур. – 2009. – Т. 47, № 5. – С. 734–740.
2. Хафизов Р.М., Хусаинов И.Г., Шагапов В.Ш. Динамика восстановления давления в «вакуумированной» скважине // Прикладная математика и механика. – 2009. – Т. 73, № 4. – С. 615–621.
3. Хусаинов И.Г. Акустическое зондирование перфорированных скважин короткими волнами // Прикладная механика и техническая физика. – 2013. – Т. 54, № 1. – С. 86–93.
4. Хусаинов И.Г. Воздействие акустическим полем на насыщенную жидкостью пористую среду // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 6; URL: <http://www.science-education.ru/120-15160> (дата обращения: 31.10.2014).
5. Хусаинов И.Г. Динамика релаксации давления в полости с плоско-параллельными стенками после ее опрессовки // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5; URL: <http://www.science-education.ru/119-15159> (дата обращения: 31.10.2014).
6. Хусаинов И.Г. Отражение акустических волн в цилиндрическом канале от перфорированного участка // Прикладная математика и механика. – 2013. – Т. 77, № 3. – С. 441–451.

7. Хусаинов И.Г. Оценка качества перфорации скважины акустическим методом // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5; URL: <http://www.science-education.ru/119-14505> (дата обращения: 09.09.2014).

8. Хусаинов И.Г. Тепловые процессы при акустическом воздействии на насыщенную жидкостью пористую среду // Вестник Башкирского университета. – 2013. – Т. 18, № 2. – С. 350–353.

9. Хусаинов И.Г., Дмитриев В.Л. Исследование эволюции волнового импульса при прохождении через пористую преграду // Прикладная механика и техническая физика. – 2011. – Т. 52, № 5 (309). – С. 136–145.

10. Хусаинов И.Г., Хусаинова Г.Я. Исследование параметров пласта методом опрессовки // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3; URL: <http://www.science-education.ru/117-13813> (дата обращения: 04.07.2014).

11. Шагапов В.Ш., Хусаинов И.Г., Дмитриев В.Л. Распространение линейных волн в насыщенных газом пористых средах с учетом межфазного теплообмена // Прикладная механика и техническая физика. – 2004. – Т. 45, № 4 (266). – С. 114–120.

12. Шагапов В.Ш., Хусаинов И.Г., Ишмухаметова А.А. К теории акустического зондирования перфорированной скважины // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2007. – № 6. – С. 42–48.

13. Шагапов В.Ш., Хусаинов И.Г., Ишмухаметова А.А. О возможности определения качества перфорации скважины локальным акустическим зондированием // Прикладная механика и техническая физика. – 2009. – Т. 50, № 1 (293). – С. 44–48.

14. Шагапов В.Ш., Хусаинов И.Г., Хафизов Р.М. Релаксация давления в полости, окруженной пористой и проницаемой породой, при ее опрессовке введением газа // Прикладная механика и техническая физика. – 2006. – Т. 47, № 1 (275). – С. 109–118.

15. Шагапов В.Ш., Хусаинова Г.Я., Хусаинов И.Г., Хафизов Р.М. Релаксация давления в полости, окруженной пористой и проницаемой горной породой // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 38, № 3. – С. 106–112.

References

1. Volodin S.V., Dmitriev V.L., Khusainov I.G., High Temperature, 2009, Vol. 47, no. 5, pp. 701–706.

2. Khafizov R.M., Khusainov I.G., Shagapov V. Sh. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2009, Vol. 73, pp. 443–448.

3. Khusainov I.G. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2013, Vol. 54, no. 1, pp. 74–80.

4. Khusainov I.G. Modern Problems of a Science and Education, 2014, No. 6, available at: www.science-education.ru/119-15160.

5. Khusainov I.G. Modern Problems of a Science and Education, 2014, No. 5, available at: www.science-education.ru/119-15159.

6. Khusainov I.G. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 2013, Vol. 73, pp. 443–448.

7. Khusainov I.G. Modern Problems of a Science and Education, 2014, no. 5, available at: www.science-education.ru/119-14505.

8. Khusainov I.G. The Bulletin of the Bashkir University, 2013, Vol. 18, no. 2, pp. 350–353.

9. Khusainov I.G., Dmitriev V. L. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2011, Vol. 52, no. 5, pp. 791–799.

10. Khusainov I.G., Khusainova G.Ya. Modern Problems of a Science and Education, 2014, No. 3, available at: www.science-education.ru/117-13813.

11. Shagapov V.Sh., Khusainov I.G., Dmitriev V.L. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2004, Vol. 45, no. 4, pp. 552–557.

12. Shagapov V.Sh., Khusainov I.G., Ishmukhametova A.A. News of Higher Educational Institutions. Oil and Gas, 2007, no 6, pp. 42–48.

13. Shagapov V.Sh., Khusainov I.G., Ishmukhametova A. . Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2009, Vol. 50, no. 1, pp. 44–48.

14. Shagapov V.Sh., Khusainov I.G., Khafizov R.M., Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, 2006, Vol. 47, no. 1, pp. 91–98.

15. Shagapov V.Sh., Khusainova G.Ya, Khusainov I.G., Khafizov R.M., Combustion, Explosion, and Shock Waves, 2002, Vol. 38, no. 3, pp. 346–351.

Рецензенты:

Мустафина С.А., д.ф.-м.н., профессор кафедры математического моделирования, Стерлитамакский филиал, ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г. Стерлитамак;

Михайлов П.Н., д.ф.-м.н., профессор кафедры алгебры, геометрии и методики обучения математике, Стерлитамакский филиал, ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный университет», г. Стерлитамак.

Работа поступила в редакцию 28.11.2014.