

УДК 534.2

## ПЕРЕДАЧА ДАВЛЕНИЯ ЧЕРЕЗ АЛЮМИНИЕВУЮ ПЕНУ ПРИ ПОДВОДНОМ ВЗРЫВЕ

Чж.-Ц. Фань, Х.-Х. Ма, Чж.-У Шень, М.-Цз. Линь

Китайский университет науки и технологии, 230027 Хэфэй, Китай, fanzhq@mail.ustc.edu.cn

Исследовано взаимодействие волн от подводного взрыва с пластинами алюминиевой пены с различными видами пор. Волна, прошедшая через образец с закрытыми порами, может быть разделена на две части: одна — с низкочастотным спектром, которая соотносится с газом в порах, а другая — с высокочастотным спектром, которая является результатом объединения волн, проходящих по матрице, и волн, образующихся при взаимодействии жидкости с матрицей.

Ключевые слова: волна от подводного взрыва, прошедшая волна, алюминиевая пена, отрицательное давление, частота.

### ВВЕДЕНИЕ

Взаимодействие волн в водонаполненных ячеистых материалах интенсивно изучалось в различных дисциплинах, таких как морская география, горная гидравлика, проектирование защитных конструкций. Металлическая пена является новым видом технологических материалов, хорошо поглощающих энергию. Она бывает двух типов: с закрытыми и открытыми порами. Исследование распространения ударных/взрывных волн в пене представляет значительный интерес в связи с широким применением в железнодорожной, автомобильной и военной отраслях промышленности.

Теория Био [1, 2] предсказала существование трех типов прошедших волн, возбуждаемых при ударно-волновом воздействии на границе раздела между пористой средой и жидкостью. Впервые это показано экспериментально в работе [3], а затем численно изучено и подтверждено в [4]. Эти исследования основаны на предположении, что пористая среда полностью насыщена только одной жидкостью. Теоретический анализ, экспериментальные и численные исследования взаимодействия ударных волн с ячеистыми материалами проведены в [5–7]. Согласно этим работам пены из одного и того же материала, но с разным типом пор (закрытыми или открытыми) различно откликаются на ударно-волновой импульс. Однако эксперименты были проведены только с образцами с открытыми порами. В работе [8] по-

казано, что у пористых сред, заполненных водой, коэффициент демпфирования высокий, а у заполненных газом — низкий. В работе [9], где исследовался коэффициент затухания звука в диапазоне частот волны подводного взрыва  $3 \div 24$  кГц, установлено, что размер поры сильно влияет на прохождение волны через пористую среду. В работе [10] показано, что наличие пузырьков воздуха в частично насыщенной жидкостью среде меняет фазовую скорость и коэффициент затухания волн, распространяющихся в ней. В [11, 12] выполнены эксперименты по изучению взаимодействия ударной волны с пористой средой, наполненной жидкостью с включением газовых пузырьков. Результаты экспериментов подтвердили существование двух типов продольных волн давления в такой среде. Поэтому можно предполагать, что особенности волн подводного взрыва, распространяющихся по водонасыщенной пористой среде с закрытыми и открытыми порами, различаются.

Цель настоящей работы — исследовать экспериментально взаимодействие взрывной волны с водонасыщенными пенами с открытыми и закрытыми порами.

### ЭКСПЕРИМЕНТ

Постановка экспериментов показана на рис. 1. Подводная взрывная волна генерировалась при взрыве промышленного неэлектрического детонатора и воздействовала на образец при прямом соударении с ним. Предполагалось, что волны, действующие на образец, — плоские. Это обеспечивалось выбором

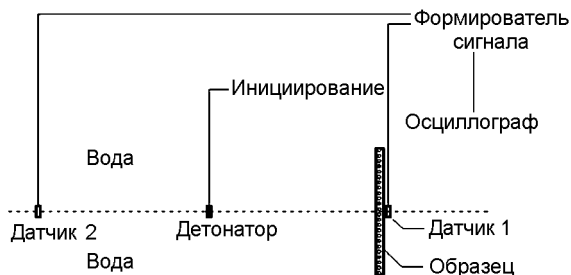


Рис. 1. Постановка эксперимента

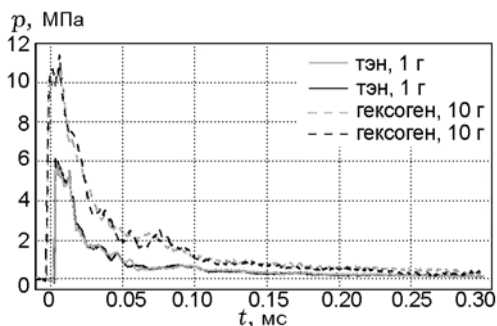


Рис. 2. Верификация датчиков давления 1 и 2 ( $r = 70$  см) при взрыве двух различных зарядов

соответствующих размеров образца и регулировкой расстояния между образцом и источником взрыва. Датчик давления 1 размещался на расстоянии 8 мм от тыльной поверхности образца и регистрировал профиль давления прошедшей через него волны. Одновременно датчик 2, расположенный с другой стороны от источника взрыва, фиксировал падающую взрывную волну. Волновые профили, регистрируемые датчиками 1 и 2 в отсутствие образца для двух различных зарядов, показаны на рис. 2. Видно, что они практически совпадают, и поэтому было принято, что ударно-волновой импульс, регистрируемый датчиком 2, соответ-

ствует импульсу, действующему на образец в эксперименте.

Эксперименты проводили в цилиндрическом резервуаре, заполненном водой. Его диаметр 5 м, высота также 5 м. В качестве детонатора использовался тэн массой  $0.75 \div 1.14$  г, плотностью  $\approx 1.5$  г/см<sup>3</sup>. Датчики давления, источник взрыва и геометрический центр образца находились на одной высоте. Расстояние между источником взрыва и лицевой стороной образца составляло  $r = 70$  см. Датчик 2 располагался симметрично на таком же расстоянии от источника взрыва. Датчики давления 1 и 2 на основе турмалина были специально сконструированы для работы под водой. Их коэффициенты чувствительности равны 29.55 и 30.05 мВ/МПа соответственно. Чувствительный элемент размером около 4 мм был заделан в трубку диаметром 8 мм и длиной 12 см.

В качестве образцов использовали тонкие квадратные пластины алюминиевой пены как с открытыми, так и с закрытыми порами. Характеристики образцов представлены в таблице. Первые четыре — это образцы из алюминиевой пены с закрытыми порами, а пятый образец — с открытыми. Среди образцов с закрытыми порами у первых трех поры в среднем одного размера, а у четвертого — меньше, с тем чтобы выяснить влияние размера пор на характеристики прошедших волн. Эксперименты с образцами с открытыми порами (образец 5) проводили в двух постановках, чтобы определить влияние граничных условий на прошедшие волны. В первом случае вода могла свободно проходить через образец, во втором — его фронтальная и боковые поверхности были закрыты тонкой алюминиевой фольгой, что не позволяло воде свободно проходить через образец. В качестве контрольного образца использовали сплошную алюминиевую пластину (об-

Характеристики образцов из алюминиевой пены, использованных в экспериментах

Номер образца	Тип пор	Размер поры, мм	Пористость $\Phi$ , %	Размер, см	Толщина, см
1	Закрытые	3 ÷ 4	85.9	20 × 20	1.06
2	—//—	3 ÷ 5	83.0	20 × 19.8	1.00
3	—//—	3 ÷ 5	74.1	20 × 20	1.00
4	—//—	1.0 ÷ 1.5	68.5	20 × 20	1.02
5	Открытые	5 ÷ 6	72.2	20 × 20	1.00
6	Сплошная пластина	—	0	20 × 20	1.00

разец 6). Для каждого типа образцов выполнено по три эксперимента, чтобы гарантировать достоверность результатов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Волна подводного взрыва

Известно, что поле давления на достаточно далеком расстоянии от точечного источника взрыва можно считать сферически-симметричным. На рис. 3 показан типичный профиль давления падающей волны при подводном взрыве. В течение 2 мкс наблюдается скачок давления, за ним следует область осцилляции давления на протяжении примерно 8 мкс. Среднее значение давления в этой области медленно уменьшается. После 9 мкс давление падает очень быстро (сначала экспоненциально). Однако затем, когда время достигает «характеристического» значения  $\theta$ , скорость падения давления уменьшается, и в дальнейшем профиль давления может быть приближен гиперболической функцией. Кроме того, на кривой видно несколько нерегулярных горбов давления разной формы и амплитуды. Согласно результатам [13] эти две особенности связаны с интенсивным расширением газового пузыря и с формой и типом взрывчатого вещества соответственно.

### Волны, прошедшие через образцы с закрытыми порами

Профили давления, зарегистрированные датчиком 1 для четырех образцов с закрытыми

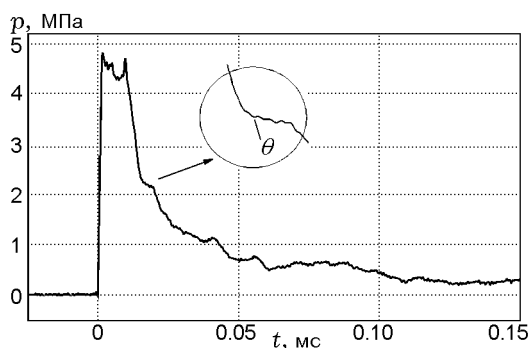


Рис. 3. Типичный профиль давления падающей волны от подводного взрыва (в увеличенном масштабе — область характеристического времени)

порами, показаны на рис. 4 (приведена только одна кривая из трех подобных, полученных в разных экспериментах). Как видно, каждая прошедшая волна может быть разделена на две части: сильная волна сжатия гладкой формы и короткой длительности и слабая осциллирующая волна сжатия с затянувшимся процессом нагружения. Форма сигнала и интенсивность давления обеих частей сильно зависят от физических свойств пены. По-видимому, первая волна проходит через пористую пластину напрямую, а вторая движется вслед за первой с задержкой и не проходит напрямую через образец. Первую волну обозначим DTW (direct transmitted wave), а вторую — ITW (indirect transmitted wave).

Некоторые профили давления, представленные на рис. 4 и относящиеся к DTW, в увеличенном масштабе приведены на рис. 5. Здесь же для сравнения показан профиль для волны, прошедшей через лист сплошного алюминия (образец 6). Видно, что форма DTW изменяется с изменением плотности и среднего размера пор образца. По сравнению с резким скачком давления в волне, прошедшей через образец 6, фронт нарастания давления в DTW более пологий. Углы наклона переднего фронта у первых трех образцов с близким средним размером пор, но разной плотностью совершенно идентичны. Однако форма заднего фронта заметно меняется при варьировании плотности. По мере уменьшения пористости давление спадает быстрее и волна напряжения, прошедшая через образец, похожа на взрывную волну с резким фронтом нарастания и длинным пологим спадом. Кроме того, плато на профиле давления DTW в опыте с образцом 1 постепенно превращается в пик. Для образца 4 характерны заметно бóльшая по сравнению с другими образцами амплитуда DTW, более четко выраженная вторая волна сжатия и бóльшая частота флуктуаций на кривой ITW. Из этих данных следует, что характерные черты DTW зависят от макроскопических физических свойств среды (пористость, скорость звука и др.), в то время как форма волны и амплитуда ITW сильно зависят от размера и концентрации пор в образце.

При проектировании защитных устройств необходимо знать коэффициент затухания  $\beta = p_t/p_i$ , где  $p_i$  — амплитуда падающей волны,  $p_t$  — пик давления соответствующей DTW, значение которого может быть использовано

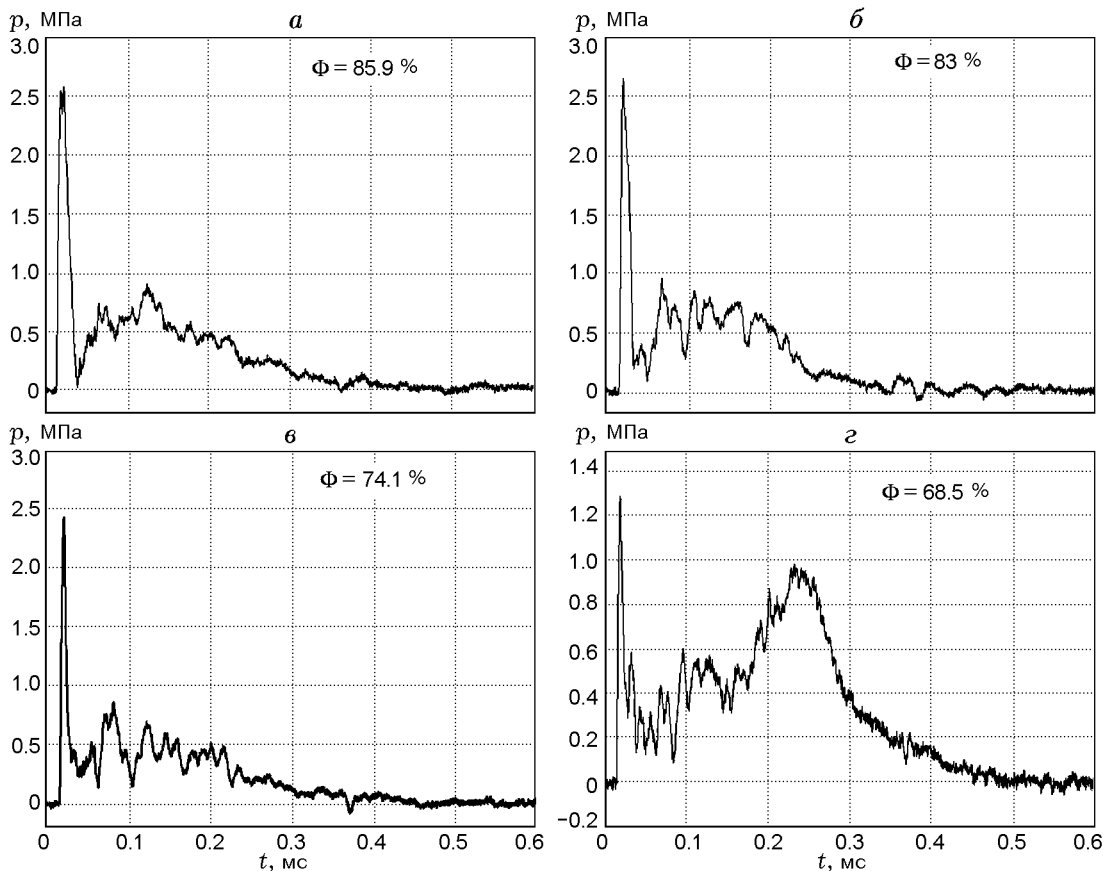


Рис. 4. Профили давления проходящих волн для образцов с закрытыми порами, различающихся степенью пористости

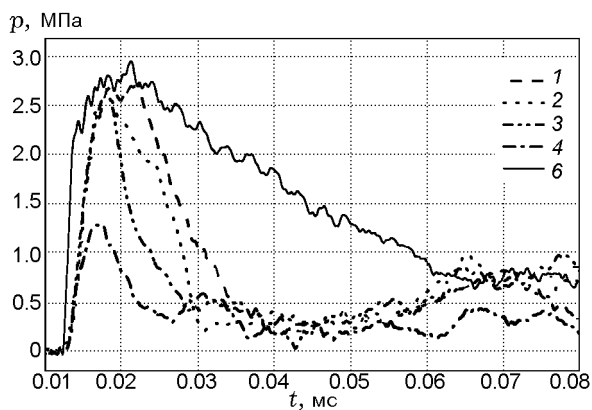


Рис. 5. Профили давления DTW для сплошного образца (б) и из пены с закрытыми порами различной пористости (1–4)

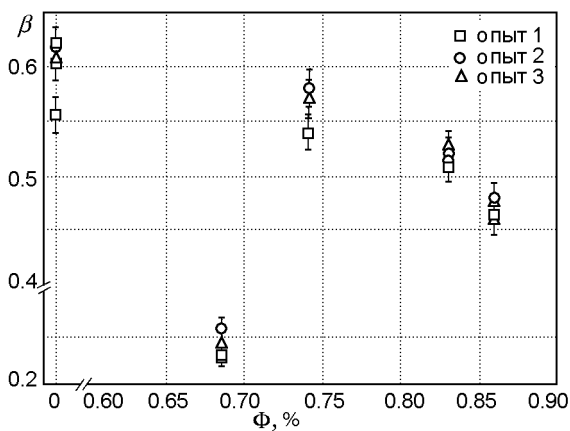


Рис. 6. Коэффициент затухания давления для сплошного образца и четырех образцов из пены с закрытыми порами

для грубой оценки защитных свойств пористых материалов. На рис. 6 показаны полученные в экспериментах значения коэффициента затухания, определенные с ошибкой 5 %. Как следует из рисунка, для образцов примерно с оди-

наковым средним размером пор значения  $\beta$  обратно пропорциональны пористости, т. е. амплитуда DTW увеличивается с ростом плотности. Качественно объяснить это явление мож-

но, опираясь на классическую одномерную теорию распространения волн сжатия. На границе раздела вода — образец волна делится на отраженную и проходящую. Амплитуды отраженной и прошедшей волн можно точно рассчитать, если корректно определены коэффициенты отражения и прохождения. Согласно теории коэффициент прохождения увеличивается с ростом плотности, и это означает, что в образец передается больше энергии. Однако предварительное условие в этой модели заключается в том, что среды, находящиеся по обе стороны от границы раздела, являются изотропными и однородными. Хотя эта теория не соответствует точно проведенным экспериментам, она все же позволяет качественно объяснить полученные результаты. Результаты опыта с образцом 4 не согласуются с выводами, сделанными на основе опытов с предыдущими тремя образцами. Здесь необходимо принять во внимание сильное изменение размера и концентрации пор в образце, поскольку их плотность на единицу объема более чем в 20 раз превосходит плотность в образцах 1–3.

#### Волны, прошедшие через образец с открытыми порами

Опыты с образцом 5 проведены в одной и той же постановке при двух граничных условиях: (i) фронтальная и боковые поверхности пластины алюминиевой пены открыты; (ii) эти поверхности закрыты тонким слоем алюминиевой фольги. Как видно из рис. 7, амплитуда DTW явно возросла по сравнению с образцами с закрытыми порами той же толщины и практически такого же размера пор. К тому же, ITW не столь явно выражена, как волны, прошедшие через образцы с закрытыми порами, и в целом заметно слабее. Несмотря на то, что после DTW наблюдаются отдельные флуктуации, длительность их положительной фазы почти в четыре раза меньше.

На рис. 8 приведены профили давления DTW, полученные в экспериментах с образцом 5 в двух описанных выше постановках. Плавный рост давления, наблюдавшийся в предыдущих опытах, сменился ступенчатым передним фронтом. Этот факт согласуется с моделью распространения волны, представленной в [14]. Из выводов этой работы следует, что части падающей волны отстают от ударного скачка, когда он продвигается через пористую среду. Эти части движутся назад и да-

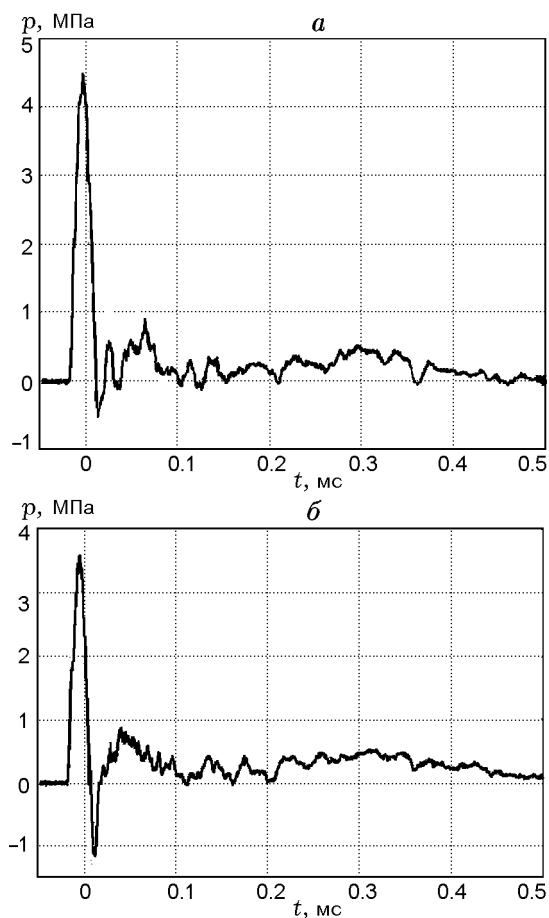


Рис. 7. Профили давления прошедшей волны для образца 5 с открытыми порами:

*a* — фронтальная и боковая поверхности открыты, *б* — закрыты

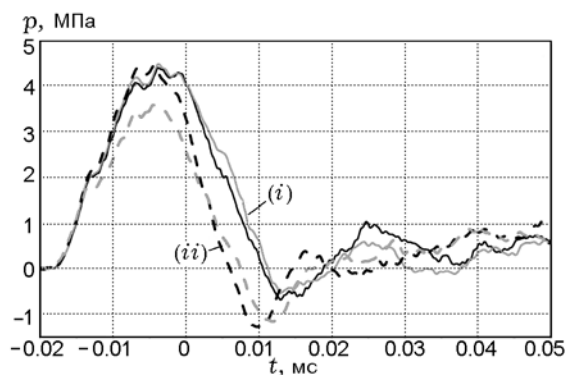


Рис. 8. Профили давления DTW для образца 5 с открытыми порами при различных граничных условиях:

(i) — с открытыми поверхностями, (ii) — с закрытыми фронтальной и боковой поверхностями

лее внутрь пор, одни из них взаимодействуют друг с другом, а другие даже превращаются в слабую волну разрежения, которая в конце концов догоняет основную отраженную волну. В ходе движения через образец волна сжатия все больше диспергируется, диспергированные волны подвергаются сложным процессам отражения и прохождения и в конечном итоге выходят из пористого материала в виде объединенной прошедшей волны. Части прошедшей волны задерживаются из-за многократных взаимодействий между жидкостью, содержащейся в порах, и матрицей образца. Это приводит к тому, что расстояние, которое проходят эти диспергированные волны, увеличивается, и в результате они проявляются серией флуктуаций различной формы и амплитуды за DTW.

Для образца с открытыми порами коэффициент затухания  $\beta$  составляет в среднем 0.954 и 0.650 при граничных условиях (i) и (ii) соответственно. При закрытых фронтальной и боковых поверхностях интенсивность прошедшей волны радикально уменьшается. Согласно результатам работы [15] интенсивность прошедшей волны тесно связана с потоком жидкости через поры.

Другая интересная особенность волны, прошедшей через образец с открытыми порами, — это существование области отрицательного давления, которая тотчас следует за прямо прошедшей волной (см. рис. 8). Максимальное отрицательное давление достигает почти  $-1.2$  МПа. Это явление не наблюдалось в экспериментах с образцами с закрытыми порами. Возможно, оно связано с акустическими характеристиками жидкости, содержащейся в порах, и с проницаемостью образца. В работе [16] предложено другое объяснение появлению области отрицательного давления: оно могло быть вызвано реакцией самого датчика давления. Ответ на этот вопрос требует продолжения исследований.

### Частотный анализ

Для дальнейшего рассмотрения механизма распространения волны в пористых материалах проведен частотный анализ данных. Полученные сигналы путем фильтрации могут быть разложены на высокочастотную и низкочастотную части [17]. Полный сигнал давления представляется в виде  $S(t) = S_{LC}(t) + S_{HC}(t)$ , где  $S_{LC}(t)$  — низкочастотная часть, а  $S_{HC}(t)$  — высокочастотная.

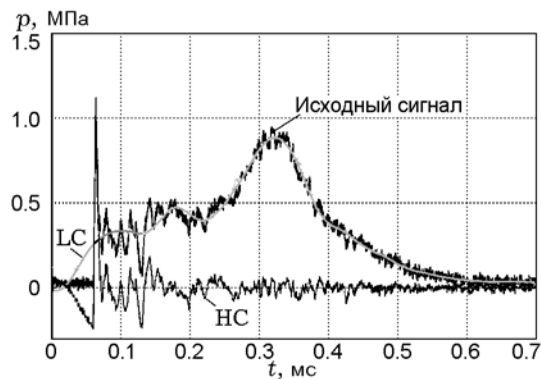


Рис. 9. Разложение прошедшего сигнала давления, полученного в опыте 2 с образцом 4

Это разложение можно рассматривать как результат отделения двух составляющих сигнала выше и ниже некоторой граничной частоты, так что сигнал выделяется в два различных частотных домена. Таким образом, низкочастотная часть LP дает возможность увидеть общий ход сигнала, а детальные особенности обнаруживаются в высокочастотной части HP. Разложение прошедшей волны, полученной в опыте с образцом 4, показано на рис. 9. Видно, что высокочастотная часть содержит главным образом высокочастотные компоненты сигнала, включая DWT и все флуктуации, следующие непосредственно за DTW. В то же время низкочастотная часть не содержит высокочастотных флуктуаций и представляет основной ход сигнала.

Подобная процедура была проведена и для всех остальных образцов. Однако в опытах с образцом 5 с открытыми порами особенности низкочастотной части не столь наглядны, как при испытании образцов с закрытыми порами. Сопоставление высокочастотных частей прошедших волн для четырех образцов с закрытыми порами с полными сигналами для образца с открытыми порами при различных начальных условиях представлено на рис. 10. Формы и колебания волн очень сходны. Мы полагаем, что низкочастотная часть, которая представляет собой общий ход прошедшего сигнала, сильно зависит от характеристик жидкости, находящейся в порах. Возможная трактовка, основывающаяся на работе [18], состоит в том, что высокочастотная часть представляет собой быструю волну, а низкочастотная связана с медленной волной сжатия Биота. Другое объяснение, базирующееся на результатах рас-

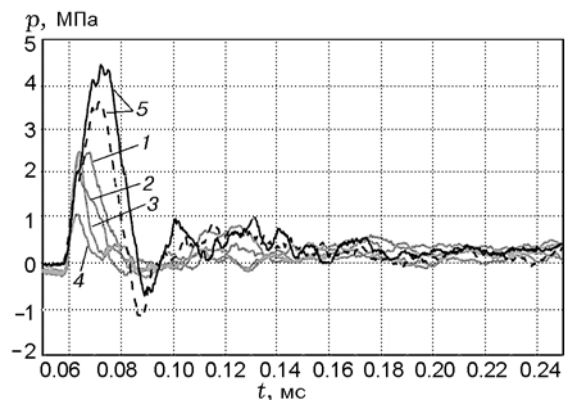


Рис. 10. Профили давления высокочастотных частей проходящих волн для образцов с закрытыми порами различной пористости (1–4) и полных сигналов для образцов с открытыми порами при различных граничных условиях (5)

четов работы [19], заключается в том, что низкочастотная часть связана с давлением жидкости в порах, в то время как высокочастотная передается главным образом через матрицу пористого материала. Анализ данных показывает, что трактовка, предложенная в [19], больше соответствует результатам проведенных экспериментов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовано взаимодействие волны подводного взрыва с пористой средой при нормальном падении волны на образец.

1. Падающая волна, движущаяся через пластину алюминиевой пены, проходит через три среды: воду, газ и воздух. В результате формируется не напрямую проходящая волна, которая состоит из основной части, связанной с давлением газа в порах, и отдельных флуктуаций, которые могут быть вызваны многократным взаимодействием газа и матрицы. Амплитуда прошедшей волны сильно зависит от физических свойств образца, таких как пористость и концентрация пор. Для образцов с аналогичным размером пор амплитуда прошедшей волны пропорциональна относительной плотности образца.

2. Падающая волна, прошедшая через образец с открытыми порами, делится на две части, и амплитуда второй волны в среднем того же порядка, что и у второй волны, прошедшей через образец с закрытыми порами, но дли-

тельность ее положительной фазы почти в четыре раза меньше. Это явление, очевидно, обусловлено различием свойств газа и воды, находящихся в порах матрицы в том или ином случае. Флуктуации давления, наблюдаемые позади первой прошедшей волны, следует связать с взаимодействием между жидкостью в порах и матрицей образца. Отметим, что амплитуда прошедшей волны сильно зависит от граничных условий на фронтальной поверхности образца: внутренние микропотоки жидкости являются важным фактором в процессе движения волны в пене с открытыми порами.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Biot M. A.** Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low frequency range // *J. Acoust. Soc. Amer.* — 1956. — V. 28, N 2. — P. 168–178.
2. **Biot M. A.** Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. II. Higher frequency range // *J. Acoust. Soc. Amer.* — 1956. — V. 28, N 2. — P. 179–191.
3. **Plona T. J.** Observation of a second bulk compressional wave in a porous medium at ultrasonic frequencies // *Appl. Phys. Lett.* — 1980. — V. 36, N 4. — P. 259–261.
4. **Arntsen B., Carcione J. M.** Numerical simulation of the Biot slow wave in water-saturated nivelsteiner sandstone // *Geophys.* — 2001. — V. 66, N 3. — P. 890–896.
5. **Mazor G., Ben-Dor G., Igra O., et al.** Shock wave interaction with cellular materials. Part I: Analytical investigation and governing equations // *Shock Waves.* — 1994. — V. 3, N 3. — P. 159–165.
6. **Mazor G., Ben-Dor G., Igra O., et al.** Shock wave interaction with cellular materials. Part II: Open cell foams; experimental and numerical results // *Shock Waves.* — 1994. — V. 3, N 3. — P. 167–179.
7. **Li Shun-Bo, Dong Zhao-Xing, Qi Yan-Jun, et al.** Numerical simulation on propagation of underwater blast shock wave in absorber structure // *Chin. J. High Pressure Phys.* — 2009. — V. 23, N 5. — P. 360–366.
8. **Mikhailov D. N.** Difference between the longitudinal Frenkel — Biot waves in water- and gas-saturated porous media // *Fluid Dynamics.* — 2006. — V. 41, N 1. — P. 112–120.
9. **Wang Yue.** Influence of pore structures on the underwater sound absorbing properties of open pore foamed aluminum // *Dev. and Application of Mater.* — 2001. — V. 16, N 4. — P. 16–18.
10. **Smeulders D. M. J., De La Rosette J. P. M. Van Dongen M. E. H.** Waves in partially saturated porous media // *Transp. Porous Media.* — 1992. — V. 9, N 1. — P. 25–37.

11. **Nakoryakov V. E., Kuznetsov V. V., Dontsov V. E.** Pressure waves in saturated porous media // Intern. J. Multiphase Flow. — 1989. — V. 15, N 6. — P. 857–875.
12. **Dontsov V. E., Nakoryakov V. E.** Enhancement of shock waves in a porous medium saturated with a liquid containing soluble-gas bubbles // Intern. J. Multiphase Flow. — 2001. — V. 27, N 12. — P. 2023–2041.
13. **Cole R. H.** Underwater Explosion. — Princeton, N.Y.: Princeton Univ. Press., 1948.
14. **Levy A., Ben-Dor G., Skews B. W., et al.** Head-on collision of normal shock waves with rigid porous materials // Exp. Fluids. — 1993. — V. 15, N 3. — P. 183–190.
15. **Skews B.** Shock wave interaction with porous plates // Exp. Fluids. — 2005. — V. 39, N 5. — P. 875–884.
16. **Rude G., Slate J. E.** Small-scale tank facility for studying underwater explosion phenomena // 69th Shock and Vibration Symp. — 1998. — P. 663–673.
17. **Kazemi-Kamyab V., Subramaniam K., Andreopoulos Y.** Stress transmission in porous materials impacted by shock waves // J. Appl. Phys. — 2011. — V. 109, N 1. — P. 1–18.
18. **Brown P. J., Batzle M., Peeters M., et al.** Shock tube experiments and the observation of the Biot slow wave in natural rocks // SEG Expanded Abstr. — 2000. — V. 19, — P. 1846–1849.
19. **Gubaidulin A. A., Britan A., Dudko D. N.** Air shock wave interaction with an obstacle covered by porous material // Shock Waves. — 2003. — V. 13, N 1. — P. 41–48.

*Поступила в редакцию 12/XII 2012 г.,  
в окончательном варианте — 24/IX 2013 г.*

---