

УДК 534.2

## Особенности распространения ударно-волновых импульсов в насыщенных средах с различным типом скелета: акустический аспект

Валиахметова Оксана Юрьевна<sup>(\*)</sup>v9174121007@gmail.com  
SPIN-код: 5677-6520

ФГБОУ ВО УГНТУ, Уфа, Россия

**Аннотация.** В рамках изучения акустических свойств насыщенных сред в работе проводится сравнительный акустический анализ взаимодействия ударно-волнового импульса с пористыми средами, насыщенными пузырьковой жидкостью, обладающими разным типом скелета: насыпной средой (песок) и консолидированной (песчаник). Проведено численное моделирование, сравниваются временные и амплитудные характеристики волнового отклика. Анализ эпюр давления и напряжения показывает, что в песчанике преобладают процессы быстрого упругого возбуждения, характерные для распространения волн в сплошных средах, в то время как в песке доминируют медленные процессы с интенсивным затуханием, связанные с вязкоупругим поведением и межфазным трением. Результаты работы позволяют объяснить наблюдаемые различия в рамках теории нелинейной акустики гетерогенных сред и важны для интерпретации акустических данных в задачах геофизического мониторинга и диагностики материалов.

**Ключевые слова:** пористая среда, пузырьковая жидкость, волны, ударно-волновой импульс, песчаник, песок, акустика

## Features of impact-wave impulses distribution in saturated media with different skeleton types

Valiakhmetova Oksana Yurievna<sup>(\*)</sup>v9174121007@gmail.com  
SPIN-code: 5677-6520

FSBEI HE USPTU, Ufa, Russia

**Abstract.** The paper presents a comparative acoustic analysis of the interaction of a shock wave pulse with porous media saturated with bubble fluid, which have different types of skeleton — non-cohesive (sand) and cohesive (sandstone). Numerical modeling was performed using the control volume method, and the time and amplitude characteristics of the wave response were compared. The analysis of pressure and stress diagrams shows that fast elastic excitation processes, characteristic of wave propagation in continuous media, predominate in sandstone, while slow dissipative processes with intensive attenuation, associated with viscoelastic behavior and interfacial friction, dominate in sand. The results of the work allow to explain the observed differences within the framework of the theory of non-linear acoustics of heterogeneous media and are important for the interpretation of acoustic data in the problems of geophysical monitoring and diagnostics of materials.

**Keywords:** porous medium, bubble fluid, waves, shock-wave impulse, sandstone, sand, acoustics

**Введение.** Исследование распространения ударно-волновых возмущений в насыщенных пористых средах лежит в области нелинейной акустики сложных сред. Ключевым фактором, определяющим акустический отклик такой системы, является природа твердого скелета. Связные среды (песчаник) способны поддерживать распространение классических упругих волн, в то время как отклик несвязных сред (песок) определяется совокупностью волновых и медленных диссипативных процессов. Наличие пузырьковой жидкости добавляет в систему дополнительные релаксационные механизмы, усиливающие затухание и дисперсию.

Формируемые в работе ударно-волновые импульсы относятся к классу слабых ударных волн, где перепады давления невелики, а скорости движения среды малы по сравнению со скоростью звука. В таких условиях поведение волны на большей части расчетной области подчиняется законам линейной акустики, а нелинейные эффекты сосредоточены лишь в узкой зоне фронта. Таким образом, исследуемые процессы с хорошей точностью могут быть отнесены к акустическим явлениям, что позволяет интерпретировать результаты численного моделирования в терминах распространения, затухания и отражения акустических волн в сложных гетерогенных средах. Целью данной работы является теоретическое и численное сравнение акустических характеристик ударно-волнового импульса, прошедшего через песок и песчаник, насыщенные пузырьковой жидкостью, и интерпретация результатов с позиций физики волновых процессов.

Изучение распространения волн в сложных средах начинается с фундаментальных основ, изложенных в работе [1] по общей акустике, который закладывает базовое понимание волновых процессов в сплошных средах. В работе [2] авторы экспериментально исследовали акустические свойства водонасыщенных пористых сред и показали существование двух типов волн — быстрой и медленной, что стало ключом к пониманию поведения таких систем. Влияние нестационарных эффектов на эволюцию импульса давления в насыщенной пористой среде было подробно рассмотрено в работе [3], где авторы указывают на важность учета временных характеристик процесса. В исследовании [4] экспериментально показано, как степень водонасыщения влияет на прохождение слабых ударных волн в насыпных средах, что важно для понимания роли жидкости в диссипации энергии. В работе [5, 6] рассмотрены акустические волны в пористых средах, где пузырьки газа расположены на стенках пор, а также построена математическая модель распространения акустических волн в пористой среде с пузырьковой жидкостью. Авторы работы [7] применили акустические методы для диагностики подводных выбросов в виде многофазных струй, что демонстрирует практическую ценность таких исследований. Современные исследования [8], углубляют понимание нелинейных акустических свойств пузырьковых жидкостей за счет учета взаимодействия между пузырьками, что особенно важно для сред с высокой концентрацией газа. Работа [9] посвящена численному изучению динамики волнового импульса при переходе из жидкости в пористую среду

с пузырьковой жидкостью, что также представляет интерес от фундаментальной акустики до конкретных численных решений.

**Материалы и методы.** Для проведения теоретического исследования была использована система уравнений, описывающая законы сохранения массы, импульса и энергии:

$$\frac{\partial \rho_g^0}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g^0 v_g}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial \rho_g^0 v_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g^0 v_g^2}{\partial x} = -\frac{\partial p}{\partial x}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_g^0 u_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g^0 u_g v_g}{\partial x} + p \frac{\partial v_g}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

где  $\rho_g^0$ ,  $v_g$  — истинная плотность и скорость газа,  $p$  — давление,  $u_g$  — удельная внутренняя энергия.

Постановка задачи включает также следующую систему уравнений, описывающих процессы в насыщенной пузырьковой жидкостью пористой среде: уравнения баланса масс, числа пузырьков и импульсов:

$$\frac{\partial \rho_{l+g}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{l+g} v_l}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s v_s}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial n_b}{\partial t} + \frac{\partial n_b v_l}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho_{l+g} v_l}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{l+g} v_l^2}{\partial x} + \alpha_g \frac{\partial p_l}{\partial x} = -F_\mu - F_m; \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_s v_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s v_s^2}{\partial x} + \alpha_s \frac{\partial p_l}{\partial x} = \frac{\partial \sigma_{s*}}{\partial x} + F_\mu + F_m. \quad (5)$$

В первом случае скелет пористой среды будем считать вязкоупругим (песок):

$$\frac{\partial \sigma_{s*}}{\partial t} + \frac{\partial \sigma_{s*} v_s^2}{\partial x} = \sigma_{s*} e_s + E_{f*} e_{s*} - \frac{\sigma_{s*} - E_{e*} \xi_{s*}}{t_{s0}}. \quad (6)$$

Здесь  $\sigma_{s*}$ ,  $\xi_{s*}$  — продольные компоненты тензоров приведенных напряжений и деформации твердой фазы пористой среды;  $E_{f*}$ ,  $E_{e*}$  — динамический и статический модули упругости;

Во втором случае скелет пористой среды предполагается упругим (песчаник):

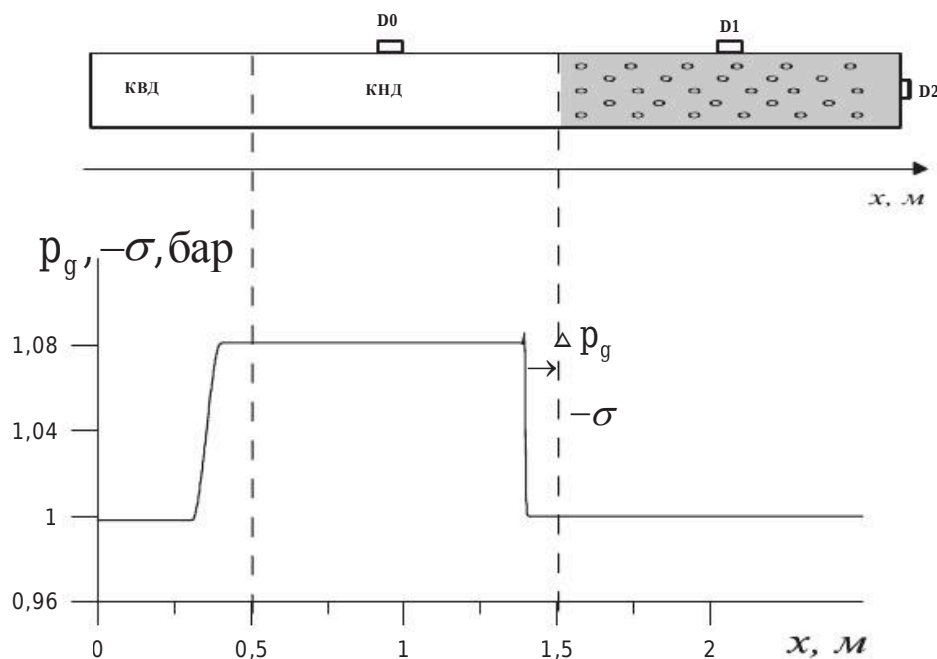
$$\sigma_{s*} = \alpha_s (\lambda_{s*} \xi_s + 2\mu_{s*} \xi_s + v_{s*} p_l); \quad \frac{d_s \xi_s}{dt} = \frac{\partial v_s}{\partial x} \left( \frac{d_s}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + v_s \frac{\partial}{\partial x} \right), \quad (7)$$

где  $\xi_s$  — деформация твердой фазы.

Численное моделирование выполнялось для песчаника и песка, насыщенных пузырьковой жидкостью. При этом использовались следующие значения параметров:  $p_0 = 1,01325$  бар,  $T_0 = 290$  К,  $\rho_{s0}^0 = 1700$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{l0}^0 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $C_l = 1500$  м/с,  $\mu_l = 0,001$  Па·с,  $\Sigma = 73$  мН/м,  $\rho_{g0}^0 = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>,  $\lambda_g =$

$= 0,0259 \text{ Вт/(м} \cdot \text{град)}$ . Продольные динамическая и статическая скорости звука:  $D_{f*} = 2500 \text{ м/с}$ ,  $D_{e*} = 0 \text{ м/с}$ . Скелет пористой среды предполагается вязкоупругим и упругим с модулями упругости  $\lambda_{s*} = 2 \cdot 10^8 \text{ Па}$ ,  $\mu_{s*} = 2 \cdot 10^8 \text{ Па}$ .

**Результаты расчетов:** Рассмотрим особенности распространения ударной волны в песке и песчанике в ударной трубе.

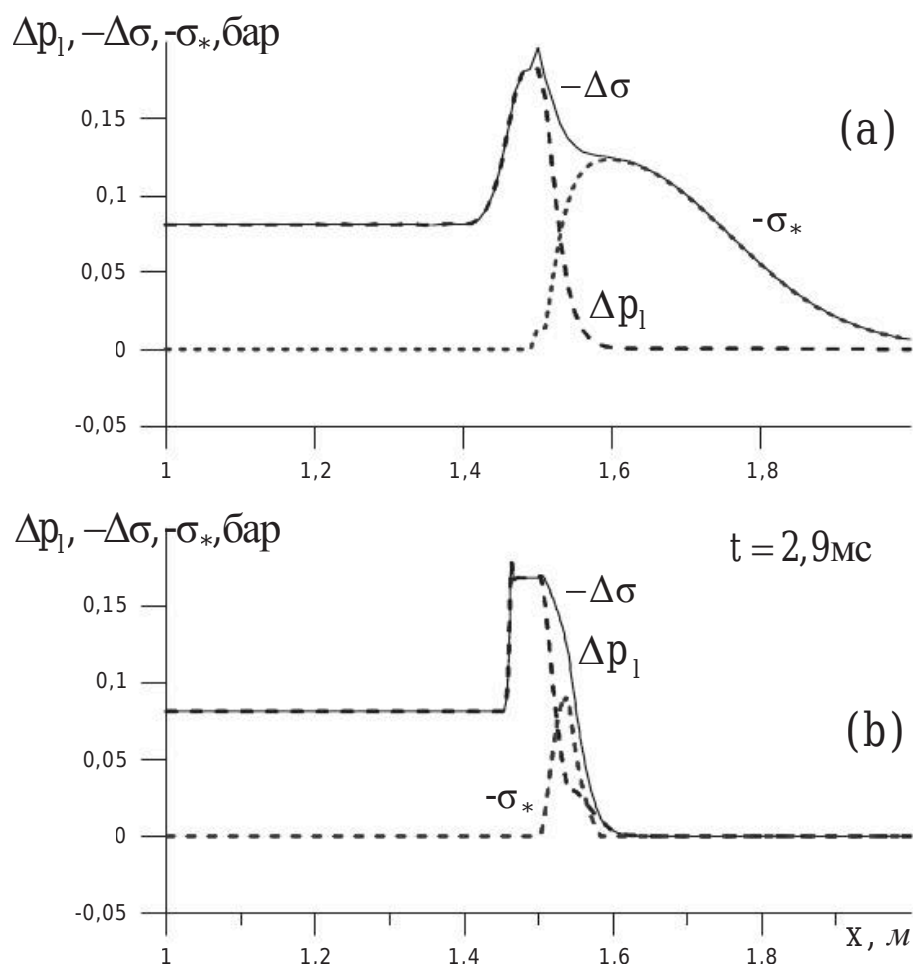


**Рис. 1.** Схематическое изображение ударной трубы и эпюра давления ( $p_g$ ) и напряжения ( $\sigma$ ) в газе, в момент времени  $t = 2,5 \text{ мс}$ . до достижения границы «газ-СНС»

Схема ударной трубы для наглядности представлена на рис. 1 в горизонтальном положении, что удобно для визуализации эпюр давления. В действительности экспериментальная установка была ориентирована вертикально. Эксперимент проводился на ударной трубе длиной 2,5 м. На стенке трубы заданы условия отсутствия теплового потока. Высота камеры высокого давления (КВД) составляет 500 мм, камеры низкого давления (КНД) — 1 м. Для помещения насыпной среды предусмотрена секция насыпной среды (СНС) высотой 1 м. Разрыв мембраны между КВД и КНД, вследствие увеличения давления в КВД, приводит к зарождению ударной волны в КНД, которая отражалась и преломлялась на границе с СНС. Далее прошедшая волна частично отражалась и частично проникала в область пористой среды, насыщенной пузырьковой жидкостью.

Рассмотрим фронт волны и доминирующий акустический режим. Сравнение эпюр полного напряжения показывает принципиальное различие. В песке рис. 2, а волновой фронт сильно размыт, напряжение нарастает плавно. Это указывает на подавление быстрой волны и доминирование медленной волны, при которой основная энергия рассеивается на вязком трении и проскальзывании частиц, что является типичным для сильно диссипативных аку-

стических сред. В песчанике рис. 2, б наблюдается резкий, почти скачкообразный рост напряжения, формирующий четкий волновой фронт. Это является характерным признаком распространения быстрой волны, а именно основного акустического режима в упругих средах, при котором скелет и жидкость колеблются синфазно.



**Рис. 2.** Эпюры давления ( $p_l$ ), полного ( $\Delta\sigma$ ) и приведенного напряжений  $\sigma^*$  ударно-волнового импульса по пространству для случая падения волны из газа в СНС (песок (а) и песчаник (б)), насыщенные пузырьковой жидкостью в момент времени 2,9 мс

На эпюрах давления в СНС также можно наблюдать эффект релаксации — спад давления после пика. В песке рис. 2, а релаксационный процесс «растворяется» в общем плавном профиле, так как энергия волны сразу и нераздельно тратится и на сжатие пузырьков, и на переупаковку скелета. Это указывает на сильную связь акустических (пузырьковых) и механических (трение) диссипативных каналов в несвязных средах. В песчанике рис. 2, б этот спад, связанный с инерционным сжатием пузырьков, следует за четким упругим предвестником.

**Заключение и выводы:** Песчаник, как среда с жестким скелетом, демонстрирует акустический отклик, близкий к поведению упругого тела с доминированием быстрой волны. Песок ведет себя как высокодиссипативная аку-

стическая среда, в которой волновой процесс подавлен, а энергия рассеивается через медленные релаксационные механизмы. Ключевым фактором, определяющим акустическую картину, является способность скелета передавать упругие возмущения. Наличие жестких связей в песчанике поддерживает волновой режим, их отсутствие в песке превращает среду в эффективный поглотитель акустической (ударной) энергии.

#### Список источников

- [1] Исакович М.А. *Общая акустика*. Москва, Наука, 1973, 496 с.
- [2] Johnson D.L., Plona T.J., Kojima H. Probing porous media with first and second sound. II. Acoustic properties of water-saturated porous media. *Journal of Applied Physics*, 1994, vol. 76, no. 1, pp. 104–114.
- [3] Лукин С.В. К задаче о влиянии нестационарных эффектов на эволюцию импульса давления в насыщенной пористой среде. *Акустика неоднородных сред*, 2007, № 124, 4 с.
- [4] Ситдикова Л.Ф., Акустические волны в пористых средах, насыщенных водой с пузырьками газа на стенках пор. *Нефтегазовое дело*, 2020, т. 18, № 5, с. 36–42.
- [5] Ситдикова Л.Ф., Гималтдинов И.К. Задача о распространении акустических волн в пористой среде, насыщенной пузырьковой жидкостью. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: математика, механика, физика*, 2021, т. 13, № 1, с. 59–66.
- [6] Гималтдинов И.К., Столповский М.В., Кочанова Е.Ю. Акустическая диагностика подводных выбросов, распространяющихся в виде многофазной струи. *Акустический журнал*, 2024, т. 70, № 2, с. 174–179.
- [7] Hemmi K., Kanagawa T. Impact of a bubble–bubble interaction on nonlinear acoustic properties of pressure waves in a non-dilute bubbly liquid. *Results in Engineering*, 2025, vol. 25, pp. 103752-1–103752-10. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103752>
- [8] Gimaltdinov I.K., Rodionov A.S., Valiakhmetova O.Yu. Numerical Study of the Dynamics of a Wave Pulse Propagating from a Liquid into a Bubbly Liquid-Saturated Porous Medium. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2025, vol. 66, no. 3, pp. 534–545. <https://doi.org/10.1134/S0021894425700117>
- [9] Пригожих В.А., Дамдинов Б.Б. Моделирование распространения звука в жидкости с пузырьками воздуха. *Вестник Бурятского государственного университета. Химия. Физика*, 2025, № 1, с. 49–55. <https://doi.org/10.18101/2306-2363-2025-1-49-55>