Ударно-волновые импульсы в водогазонасыщенном песке, их распространение и амплитудно-частотные характеристики

© А.Т. Ахметов,[1,2] И.К. Гималтдинов,[1] Д.Р. Богданов,[1] Р.Ф. Гизатуллин,[1,2] А.А. Валиев[1,2]

[1]Уфимский государственный нефтяной технический университет,
450064 Уфа, Россия
[2]Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального исследовательского центра РАН,
450054 Уфа, Россия
e-mail: Alfir@anrb.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 19 июня 2026 г.
Принято к публикации 23 октября 2026 г.

Экспериментально исследовано распространение последовательности ударно-волновых импульсов в уплотненной песчаной насыпной среде при водонасыщенности 0%, 15%, 30% и 60%. Опыты выполнены на вертикальной ударной трубе с секцией насыпных сред. Установлено, что добавление воды приводит к усилению поглощения импульсов и изменению их формы: при водонасыщенности 15%–60% на верхнем датчике в песчаной насыпке возникает фронтальный пик зондирующего импульса, связанный с откликом газожидкостной поровой структуры, а на нижних датчиках вместо выраженного полного импульса регистрируется короткий затухающий колебательный пакет с заметной спектральной составляющей в области 4–5 kHz.

Ключевые слова: ударная труба, ударно-волновой импульс, песчаная насыпная среда, зондирующий импульс, фурье-анализ.

DOI: 10.61011/JTF.2026.12.64062.274-26

Распространение ударных волн в зернистых пористых средах определяется структурой зернового скелета, степенью уплотнения, пористостью, а также составом и распределением флюидов в поровом пространстве [1–3]. Наличие жидкой фазы изменяет межзерновые контакты, сжимаемость порового флюида и механизмы диссипации энергии. Поэтому даже частичная водонасыщенность может существенно влиять на скорость распространения ударно-волнового импульса, его амплитуду, форму фронта и спектральный состав [2,3]. Изучение этих эффектов важно для оценки защитных свойств песчаных и грунтовых слоев при ударно-волновых нагрузках, а также для развития методов волнового зондирования водогазонасыщенных насыпных сред.

Экспериментальные исследования взаимодействия ударно-волновых импульсов (УВИ) с пористыми и насыпными средами традиционно проводятся в ударных трубах [4,5]. В трубе, оснащенной секцией насыпных сред, волна многократно отражается от поверхности исследуемой среды и верхнего торца трубы. В результате формируется последовательность импульсов: первый прошедший в песок импульс далее называется основным, а последующие переотраженные импульсы — зондирующими. Такие зондирующие импульсы позволяют исследовать состояние насыпной среды после кратковременного воздействия основного УВИ [6].

Ранее было показано, что в сухих песчаных насыпках на зондирующих импульсах могут формироваться пики давления, амплитуда которых превышает амплитуду основного импульса [6,7]. Их возникновение связывалось со структурной перестройкой зернового скелета. Однако в природных и технических условиях песчаные среды, как правило, содержат влагу, и даже небольшое количество воды существенно изменяет условия распространения и затухания ударно-волновых импульсов.

Влажные водогазонасыщенные насыпные среды имеют более сложный отклик. Вода удерживается в порах капиллярными силами и может смещаться под действием давления сжатой газовой фазы. В результате на нижних датчиках полный импульс регистрируется в виде короткого затухающего колебательного пакета, что требует не только анализа осциллограмм, но и амплитудно-частотного анализа.

В настоящей работе исследовано влияние водонасыщенности (0%, 15%, 30% и 60%) на распространение зондирующих импульсов в песчаной насыпной среде: анализируются осциллограммы давления, скорости, поглощение и амплитудно-частотные характеристики сигналов на разной глубине.

Эксперименты проводились на вертикальной ударной трубе с секцией насыпных сред. Камера высокого давления (КВД) и камера низкого давления (КНД) разделялись диафрагмой из пергамента (силиконизированная бумага). После разрыва диафрагмы в КНД формировался УВИ, который распространялся к поверхности песчаной насыпной среды. Амплитуда давления при прохождении в песок близка к удвоенной вследствие большого скачка акустического импеданса на границе воздухпесок, однако доля прошедшей энергии мала; основная часть импульса отражается от поверхности насыпки и затем от верхнего торца КВД, формируя последовательность переотраженных импульсов.

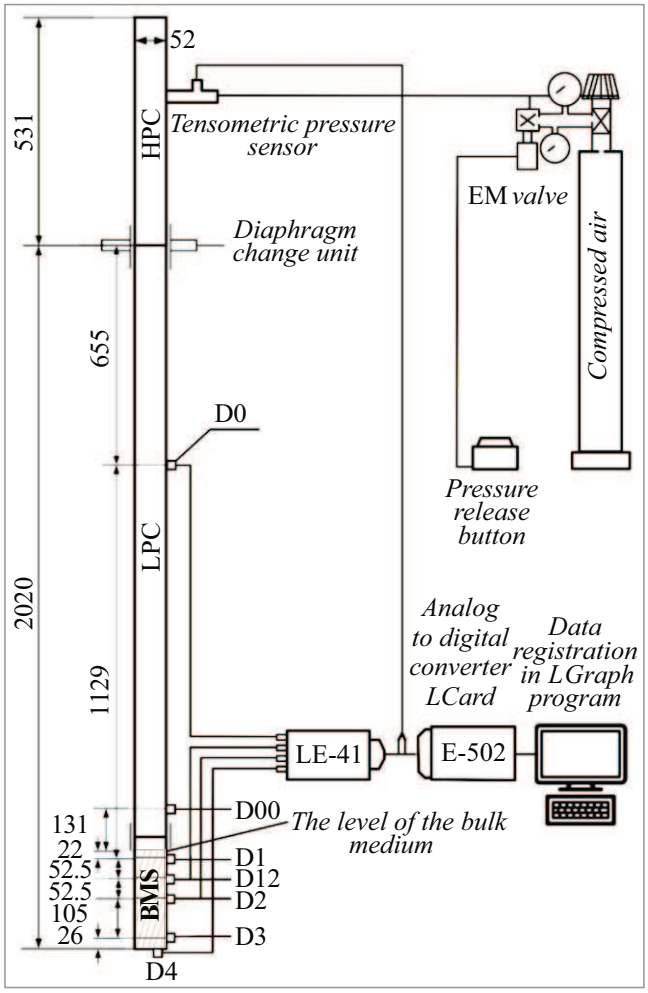


Рис. 1. Схема установки „Ударная труба“. Расположение датчиков давления: D0 и D00 в КНД и датчиков D1, D12, D2, D3 — на боковой стенке секции насыпных сред; D4 — на нижнем торце СНС.

Регистрация давления осуществлялась пьезоэлектрическими датчиками ЛХ-610 с рабочим частотным диапазоном 3–10000 Hz. Собственная (резонансная) частота датчиков в паспорте не указана; по спектру их колебаний („звона“) при регистрации импульса с крутым фронтом в воздухе она оценивается в $\approx 20-24$ Hz, что существенно выше анализируемой полосы 4–5 kHz. Схема установки и расположение датчиков приведены на рис. 1. Чувствительная поверхность датчиков устанавливалась заподлицо с внутренней поверхностью трубы, их сигналы поступали на усилители заряда LE-41 и далее на АЦП L-Card E-502. В качестве насыпной среды использовался кварцевый песок фракции 0.2–0.6 mm. Пористость определялась насыпным методом — по насыпной массе песка в объеме известной величины и плотности кварца 2.65 g/cm^3: для сухого песка она составляла 37.6 %, для увлажненного — 38.9 % (уплотнение влажного песка до пористости сухой насыпки затруднено вследствие капиллярного сцепления между зернами). Влажные образцы приготавливались интенсивным перемешиванием навески песка известной массы с отмеренным объемом дистиллированной воды до визуально однородного состояния с последующей послойной засыпкой и уплотнением в секции насыпных сред, что обеспечивало однородное начальное распределение влаги по высоте столба. Водонасыщенность задавалась как отношение объема воды к объему пор и составляла 0 %, 15 %, 30 % и 60 %.

Осциллограммы давления, зарегистрированные датчиками D0–D4, приведены на рис. 2 при водонасыщенностях песка 0 %, 15 %, 30 % и 60 %. Датчик D0 фиксирует УВИ в воздухе, а датчики D1–D4 — их прохождение в песчаной насыпке. На всех осциллограммах выделяются основной импульс и последующие зондирующие импульсы, возникающие в результате переотражений волны в ударной трубе.

В сухом песке основной импульс проходит в глубину насыпной среды и регистрируется на всех датчиках D1–D4; его амплитуда монотонно убывает с глубиной, уменьшаясь примерно в 10 раз на участке от верхнего датчика D1 до нижнего бокового датчика D3. Зондирующий импульс имеет форму, существенно отличающуюся от основного УВИ, и содержит выраженный пик давления. На отрезке 5.25 cm (D1–D12) зондирующий импульс продолжает формироваться и на треть увеличивает свою амплитуду. Амплитуда основного и зондирующего УВИ на донном датчике (D4) почти втрое выше, чем на нижнем боковом датчике (D3), хотя датчик D3 расположен на 2.6 cm выше донного датчика D4. Это связано с тем, что датчик D4 установлен на жестком донном торце секции: на нем сигнал формируется не только прошедшей волной, но и ее отражением от жесткой границы, а также вкладом механического воздействия (ударов) подходящих к торцу движущихся зерен песка.

При добавлении воды (15 %, 30 % и 60 %) форма сигналов существенно изменяется. На датчике D1 на переднем фронте зондирующего импульса появляется выраженный узкий пик, по положению и форме отличающийся от пиков в сухом песке; этот пик можно связать с откликом газовой фазы в водогазонасыщенной поровой структуре. На датчике D12 амплитуда падает и появляются высокочастотные осцилляции, а на D2–D4 полный импульс регистрируется в виде короткого затухающего колебательного пакета. С ростом водонасыщенности поглощение усиливается, и при 60 % на D3 и D4 полный импульс практически не проходит — сохраняется лишь слабый колебательный отклик.

Скорость распространения импульса в воздухе составляла около 400 m/s и слабо зависела от давления разрыва диафрагмы, которое составляло в экспериментах 87–98 kPa. В верхней части песчаной насыпки (участок D1–D12) скорости основного и зондирующего импульсов были близки и находились в диапазоне 115–125 m/s как для сухого, так и для увлажненного песка. На участке D12–D2 (5.25 cm) зависимость

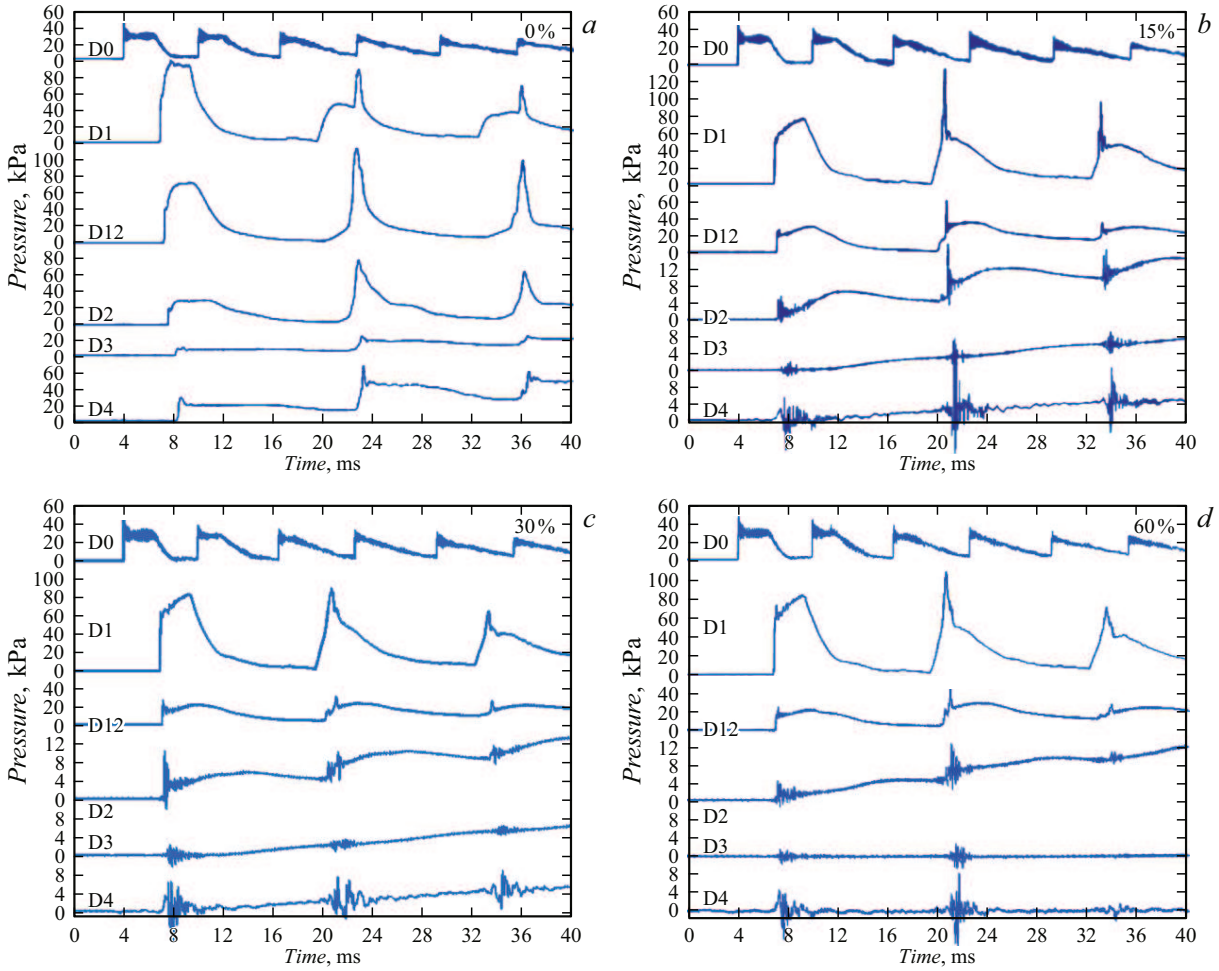


Рис. 2. Осциллограммы давления при водонасыщенности песка: *a* — 0%, *b* — 15%, *c* — 30%, *d* — 60%. По оси абсцисс отложено время, [ms]; по оси ординат — давление, [kPa]. Масштаб на датчиках D2–D4 увеличен в 5 раз.

скорости от водонасыщенности проявлялась значительно сильнее. Скорость основного импульса изменялась примерно от 150 до 280 m/s, тогда как скорость зондирующего импульса оставалась существенно ниже и составляла около 70–120 m/s. Это указывает на то, что основной и зондирующий импульсы распространяются в различных состояниях песчаной среды. Основной импульс проходит через исходную или слабо измененную структуру, а зондирующий — через среду, уже перестроенную первым ударно-волновым воздействием.

Усиление поглощения с ростом водонасыщенности оценивалось количественно по отношению амплитуд сигналов соседних датчиков. На верхнем участке (D1–D12) ослабление обоих импульсов уже заметно, а на более глубоком участке D12–D2 оно возрастает в несколько раз, особенно для влажного песка и сильнее для зондирующего импульса. Огибающая регистрируемого на нижних датчиках затухающего пакета асимметрична: колебания быстро нарастают за крутым передним фронтом и затем медленно спадают по амплитуде, что характерно для резонансного „звона“, возбуждаемого ударным фронтом.

Для каждого датчика выделялись временные интервалы длительностью ≈ 13 ms, соответствующие основному и зондирующему импульсам, и для них рассчитывались амплитудно-частотные характеристики как модуль преобразования Фурье сигнала давления (БПФ; Python/NumPy с контрольным расчетом в Matlab, результаты совпали). По оси ординат спектров отложена амплитуда спектральных составляющих давления в kPa.

Амплитудно-частотные характеристики зондирующего импульса для нижних датчиков D3 и D4 приведены на рис. 3. Эти датчики выбраны потому, что именно на них при увеличении водонасыщенности наиболее заметно исчезновение полного импульса и появление коротких затухающих колебательных пакетов. Для сравнения приведены спектры при водонасыщенности 0%, 15%, 30% и 60%. Диапазон частот 1000–6000 Hz выбран для более наглядного отображения, поскольку низкочастотная часть спектра имеет большую амплитуду и затрудняет сравнение кривых в области 4–5 kHz. Следует подчеркнуть, что доминирующая низкочастотная часть спектра (десятки–сотни Hz), отвечающая медленной огибающей зондирующего импульса длитель-

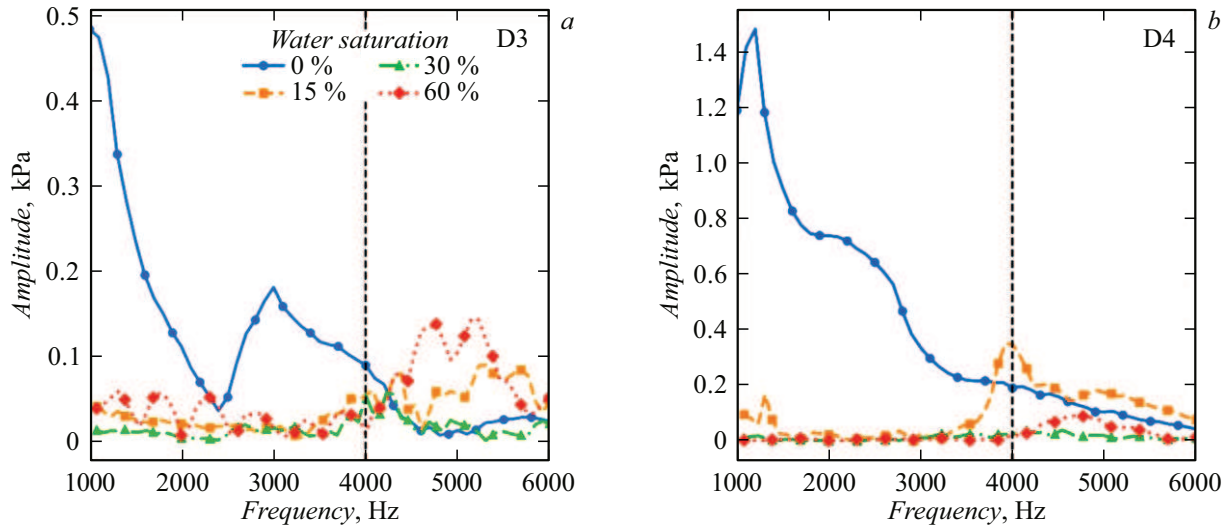


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики зондирующего импульса при водонасыщенности песка 0 %, 15 %, 30 % и 60 %: *a* — датчик D3, *b* — датчик D4. По оси абсцисс отложена частота, по оси ординат — амплитуда спектральных составляющих давления. Вертикальной штриховой линией отмечена частота 4 kHz.

ностью ≈ 13 ms, на рис. 3 намеренно не показана; обсуждаемая полоса 4–5 kHz соответствует быстрым осцилляциям с периодом $\approx 0.2 - 0.25$ ms, наложенным на эту огибающую.

В сухом песке спектры D3 и D4 имеют преимущественно низкочастотный характер: амплитуда спектральных составляющих в целом уменьшается с ростом частоты. При водонасыщенности 15 %–60 % общий уровень сигнала на нижних датчиках уменьшается, однако в области 4–5 kHz сохраняется заметная спектральная составляющая. На датчике D3 эта особенность проявляется в виде локальных максимумов во влажном песке, а на датчике D4 — как сохранение повышенного уровня спектра вблизи 4 kHz на фоне сильного ослабления низкочастотной части.

Частота порядка 4–5 kHz связывается с локальным резонансным откликом газовой фазы с присоединенной массой воды в поровом пространстве. Оценка по формуле Миннаэрта показывает, что частоте 4–5 kHz соответствует эффективный радиус газовой полости $R \approx 0.66 - 0.82$ mm. Эта величина многократно превышает размер отдельной межзерновой поры, поэтому наблюдаемая частота не должна отождествляться с колебаниями одиночного свободного пузырька; более вероятно, что она соответствует эффективному отклику газовой полости или кластера связанных пор. Энергия УВИ затрачивается на возбуждение колебаний осцилляторов упругий газ–жидкость, которые активно диссипируют из-за вязкого трения жидкости о твердые стенки пор и между слоями самой воды.

Таким образом, увеличение водонасыщенности существенно изменяет распространение УВИ в песчаной насыпке: нарастает поглощение, а на глубоких датчиках полный импульс регистрируется в виде короткого затухающего колебательного пакета.

Амплитудно-частотный анализ показал, что в отличие от сухого песка, спектр которого монотонно убывает с частотой, в водогазонасыщенном песке появляется устойчивый локальный максимум в области 4–5 kHz; это указывает на резонансный, а не чисто диссипативный механизм взаимодействия импульса с упругой водо-газовой средой, заполняющей поровую структуру песка.

Полученные результаты могут быть применены для развития методов ударно-волнового зондирования водогазонасыщенных насыпных и грунтовых сред.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-11-00274, https://rscf.ru/project/24-11-00274/

Использование искусственного интеллекта

Инструменты искусственного интеллекта (chatgpt.com) использовались исключительно для редактирования текста.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] J.D. Goddard. Proc. R. Soc. Lond. A, **430** (1878), 105 (1990). DOI: 10.1098/rspa.1990.0083

[2] D.M.J. Smeulders, M.E.H. van Dongen. J. Fluid Mech., **343**, 351 (1997). DOI: 10.1017/S0022112097005983
[3] J. Barrière, C. Bordes, D. Brito, P. Sénéchal, H. Perroud. Geophys. J. Int., **191** (3), 1152 (2012). DOI: 10.1111/j.1365-246X.2012.05691.x
[4] A. Britan, G. Ben Dor, T. Elperin, O. Igra, J.P. Jiang. Exp. Fluids, **22**, 507 (1997). DOI: 10.1007/s003480050078
[5] П.С. Уткин, П.А. Чупров. Компьютерные исследования и моделирование, **16** (6), 1361 (2024). DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-6-1361-1384
[6] А.Т. Ахметов, И.К. Гималтдинов, М.А. Азаматов, А.Ф. Мухаметзянов, Д.Р. Богданов. Письма в ЖТФ, **48** (1), 23 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.01.51874.18834
[7] А.Т. Ахметов, И.К. Гималтдинов, А.Ф. Мухаметзянов, Р.Ф. Гизатуллин. Докл. РАН, **519** (1), 41 (2024). DOI: 10.31857/S2686740024060076