

ЭФФЕКТ УСИЛЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН В НАСЫПНЫХ СРЕДАХ

© 2024 г. А. Т. Ахметов^{1,*}, И. К. Гималтдинов^{2,**}, А. Ф. Мухаметзянов², Р. Ф. Гизатуллин¹

Представлено академиком РАН Р. И. Нигматулиным 10.05.2024 г.

Поступило 15.05.2024 г.

После доработки 05.08.2024 г.

Принято к публикации 06.08.2024 г.

Общеизвестно, что ударные волны в песчаных средах поглощаются, т.е. по мере прохождения в насыпной среде их амплитуда снижается, но оказалось, что возможны условия, приводящие к усилению ударных волн по мере прохождения внутрь слоя песка. Эти условия можно создать предварительным воздействием на песок ударно-волнового импульса, они могут быть реализованы в ударной трубе, оснащенной секцией насыпных сред. Ударная волна многократно переотражается от поверхностей изучаемой пористой среды и верхнего торца трубы. Амплитуда и форма переотраженной волны несущественно отличаются от основного импульса. В то же время амплитуда переотраженной волны, распространяющейся в песке непосредственно после воздействия (13 мс) основного импульса, увеличивается более чем три раза по сравнению с амплитудой основного импульса на этой глубине. По сравнению со своей величиной у поверхности песка амплитуда в толще песка становится выше почти вдвое. Максимальное усиление амплитуды переотраженной волны в насыпной среде возрастает с увеличением слоя, через который проходит импульс до некоторой глубины, дальше начинает уменьшаться.

Ключевые слова: песчаная насыпка, ударная труба, ударно-волновой импульс, основной импульс, зондирующий импульс, пик давления, слой насыпной среды

DOI: 10.31857/S2686740024060076, **EDN:** HVZDMN

Основной акустической особенностью насыпных песчаных сред является низкая скорость звука [1]. Их уплотнение приводит к некоторому увеличению скорости [2–4], а консолидация (песчаник, цементация газогидратом) — к многократному возрастанию скорости акустических волн [6, 5, 7].

В ударной трубе, оснащенной секцией насыпных сред, волна многократно переотражается от поверхности изучаемой пористой среды и верхнего торца трубы. Использование переотраженных импульсов для изучения изменений в среде, произошедших под воздействием ударной волны, как зондирующих импульсов, было использовано в работах [8, 9]. При изучении распространения ударного импульса в насыпных средах было выявлено образование пиков при прохождении зондирующе-

го (переотраженного) импульса. Переотраженную волну можно рассматривать как зондирующий импульс, который падает на поверхность насыпной среды непосредственно после воздействия ударно-волнового импульса (основного импульса), в нашем случае промежуток времени порядка 13 мс. Было высказано предположение, что образование пика связано с разрыхлением слоя песка при воздействии ударного импульса и дальнейшего взаимодействия этого измененного слоя с падающим зондирующим импульсом. Для выявления роли величины слоя проведена серия экспериментов с уплотненным песком, слой которого дискретно увеличивался от 0 до 18.5 см.

Изучение процессов, происходящих в насыпных средах, производилось на ударной трубе с пьезоэлектрическими акустическими датчиками типа ЛХ 610 с частотным диапазоном 3–10 000 Гц, диапазоном измеряемых пульсаций 5–500 кПа и системой регистрации (усилитель заряда LE-41 с АЦП Е14-440) на базе L-CARD, сопряженной с компьютером. Напряжение, соответствующее импульсам давления в камере низкого давления (КНД) и показаниям тензометрического датчика, который регистрирует уровень давления разрыва диафрагмы в камере

¹ Институт механики им. Р. Р. Мавлютова
Уфимского федерального исследовательского центра
Российской академии наук, Уфа, Россия

² Уфимский государственный нефтяной технический
университет, Уфа, Россия

* E-mail: alfir@anrb.ru

** E-mail: iljas_g@mail.ru

*** E-mail: tuarya@yandex.ru

**** E-mail: giz-renat@yandex.ru

высокого давления (КВД), записывается в памяти компьютера. Расположение датчиков в ударной трубе и в секции насыпных сред (СНС) приведены на рис. 1. Чувствительная часть датчиков давления, диаметром 1.5 см, закреплена заподлицо с внутренней стенкой ударной трубы. Исследуемая среда представляла собой насыпку из песчинок, размеры которых находятся в диапазоне от 160 до 650 мкм, среднеарифметический размер 390 мкм [1].

Нагнетание воздуха в КВД приводит к разрыву диафрагмы из промасленной бумаги, разделяющей камеры высокого и низкого давлений. После разрыва диафрагмы в трубе формируется основная ударная волна, длительность импульса которой определяется длиной КВД.

В ударной трубе, оснащенной СНС, волна многократно переотражается от поверхности изучаемой насыпной среды и верхнего торца КВД. Переотраженные волны можно использовать для изучения изменений в среде, произошедших под воздействием основной ударной волны, т.е. как зондирующие импульсы. Следует отметить, что ударное нагружение, воздействующее на песчаную насыпку после разрыва диафрагмы, является многократным (рис. 1, датчики D0–D3), амплитуда волны заметно снижается за 10 переотражений (датчик D0), что означает, что насыпная среда “утапывается” последовательно уменьшающимися импульсами давления, формирующимися после разрыва диафрагмы. Однако зондирующий импульс, проходящий через 13 мс после основного, кардинально изменяет свою амплитуду и форму (датчик D1), что обусловлено изменением структуры насыпной среды (слой 2 см) во время воздействия основного импульса. При повторном нагружении, после замены диафрагмы, (около двух минут) волновая картина на всех датчиках идентична: все импульсы проходят как и в первый раз, никаких последствий от предыдущих воздействий не обнару-

живается, это означает, что распространение волн происходит в области упругой деформации песка.

Перед выполнением эксперимента насыпная среда уплотнялась методом утряски, проведение 6 экспериментов с заменой диафрагм не изменяло уровень насыпки. Чтобы более четко представлять формирующийся у поверхности песка импульс, датчик D1 был расположен непосредственно над поверхностью песка, рис. 2 (между поверхностью песка и центром датчика 0.75 см). Огибающая основного импульса p_0 (D0) практически не искажается (импульс p'_0 , D1), его амплитуда удваивается за счет сложения падающей и отраженной от поверхности насыпной среды волн. При отражении появляется высокочастотный дребзг. Зондирующий импульс p_1 (D0) у поверхности также почти удваивается (импульс p'_1 , D1). По сравнению с основным импульсом задний фронт растягивается. Амплитуда переотраженного импульса p_1 на 29% ниже амплитуды основного p_0 , аналогичное соотношение у поверхности песка для амплитуд зондирующего p'_1 и основного p'_0 импульсов 33%.

При насыпке песка с его утряской до верхнего края датчика воздействие основного импульса изменяет структуру слоя ($H = 0.75$ см) таким образом, что при распространении зондирующего импульса формируется пик на его заднем фронте. Аналогичным образом проводилось последовательное увеличение слоя насыпки на 1 см, пока толщина слоя над центром датчика D1 не достигла 7 см. Слои от 10 см до 13.5 см рассматривались относительно центра датчика D2.

Увеличение слоя насыпной среды приводит к постепенному смещению пика к переднему фронту импульса и росту его амплитуды. Максимальное значение достигается при величине слоя $8 \div 9$ см, дальнейшее увеличение слоя приводит к постепенному уменьшению амплитуды пика.

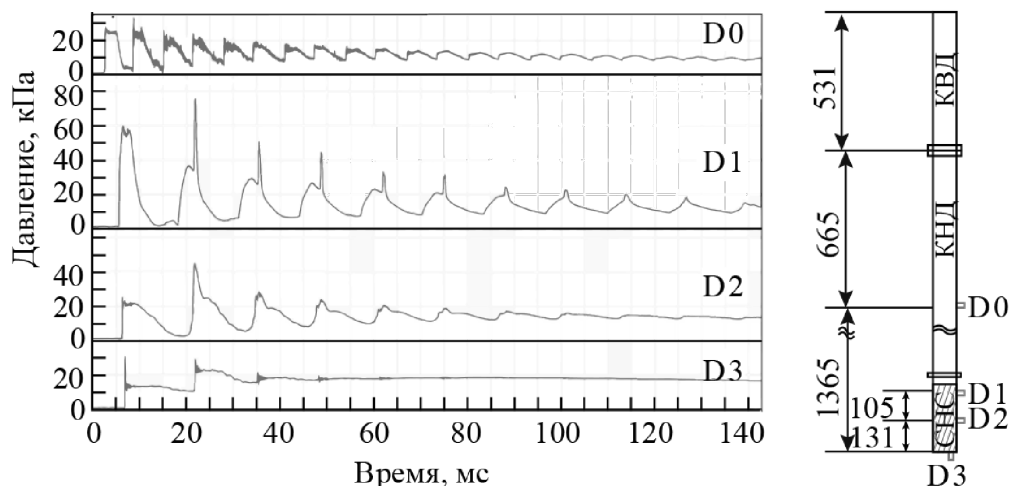


Рис. 1. Эпюры многократно переотражающегося импульса давления в ударной трубе, оснащенной СНС и пьезоэлектрическими датчиками D0–D3.

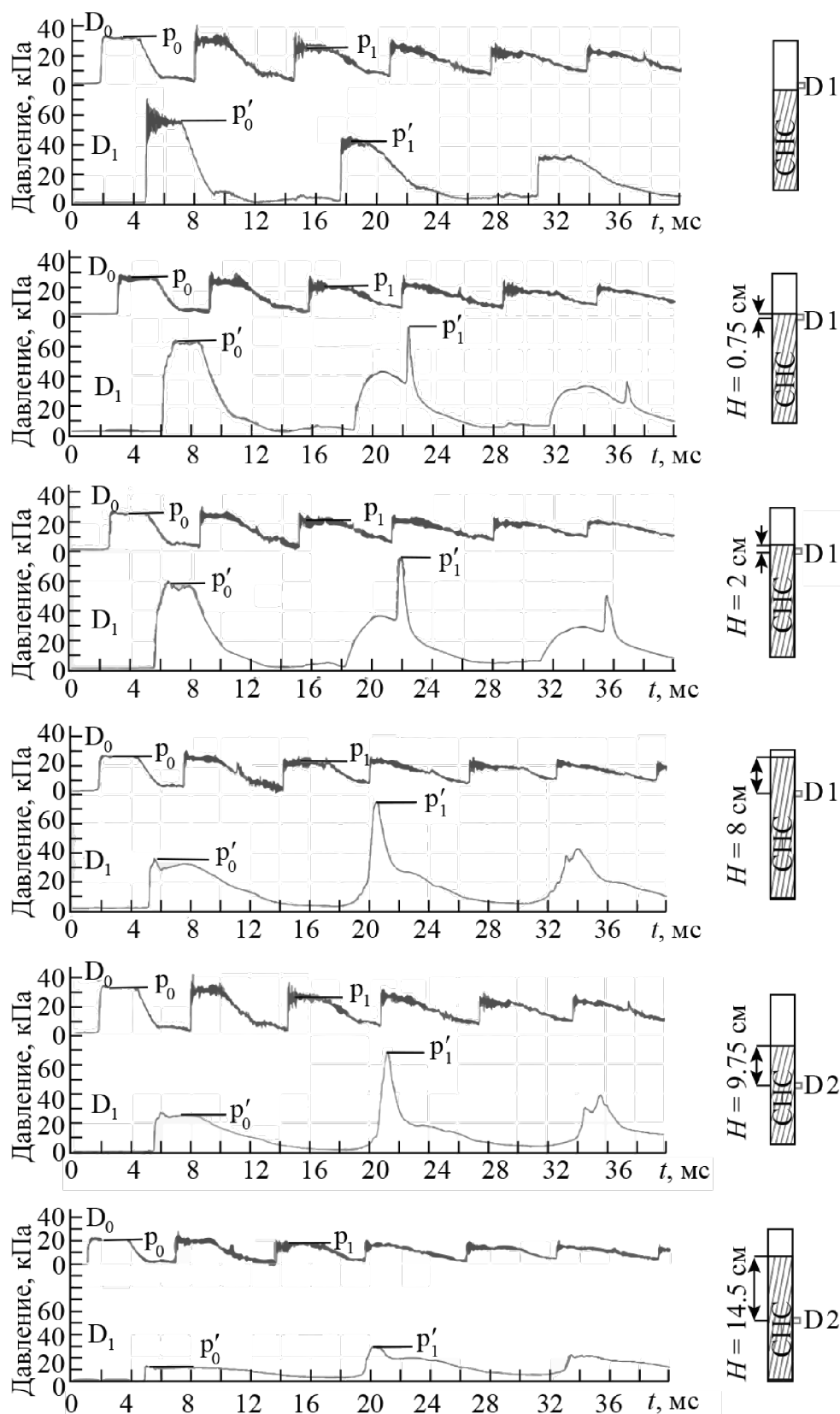


Рис. 2. Эпюры ударных импульсов на датчиках D0, D1, D2 по мере увеличения слоя песчаной насыпки. Справа приведено схематичное расположение слоя песка относительно датчиков.

Поскольку амплитуды основного и зондирующего импульсов у поверхности насыпной среды отличаются на треть, для их количественного сравнения с изменением амплитуд основного и зондирующего

импульсов от величины проходимого слоя мы нормировали амплитуды давления на датчиках D1 и D2 к значению амплитуд соответствующих импульсов на датчике D0:

$$K = \frac{p'_1}{p_1} / \frac{p'_0}{p_0}$$

есть коэффициент усиления, обусловленного структуризацией песка при прохождении основного импульса. Зависимость коэффициента усиления от величины слоя приведена на рис. 3. Экспериментальные точки достаточно хорошо аппроксимируются квадратичной функцией, максимум которой лежит в диапазоне $8.0 \div 12$ см, нормированная амплитуда зондирующего импульса в 3.5 раза превышает нормированную амплитуду основного импульса. Амплитуда зондирующего импульса возрастает вдвое по сравнению с ее значением у поверхности песка.

Чтобы иметь представление об упругих свойствах насыпной среды, проводились измерения скоростей распространения основного ударно-волнового импульса в верхней части СНС, между датчиками D1, D2 (V_1); в нижней части между D2, D3 (V_2); также определялась средняя скорость между D1 и D3 (V_3), рис. 4. Погрешность метода измерения скорости связана с измерением расстояния между датчиками и временными координатами переднего фронта импульсов на соответствующих датчиках, она составляла не более 1%. Общая погрешность во многом определяется случайными параметрами: наиболее значительное отклонение — давление разрыва диафрагмы 69 ± 13 кПа (18%) при определении погрешности усредненных параметров, погрешностью определения пористости 0.39 ± 0.005 . Скорость ударных импульсов в воздухе 374 ± 6 м/с (2%). Скорость ударных волн определяется амплитудой разрыва диафрагмы: при разбросе амплитуды разрыва диафрагмы 18%, разброс в скоростях 2%.

Для уплотнения песчаной насыпки использовался метод утряски (интенсивные удары по стенкам СНС) и умеренной трамбовки. По мере увеличения уровня насыпной среды скорость основного ударно-волнового импульса, как в нижней части (V_2), так и в верхней (V_1), постепенно растет (рис. 4), это свидетельствует о возрастании упругости насыпной среды за счет многократных утрясок перед каждым экспериментом, которые производились при открытой СНС. По мере увеличения уровня насыпанного песка повышается роль несколько больших амплитуд вибрации стенок трубы у открытого торца цилиндра, что привело к большему уплотнению песка в верхней части и отразилось на величине скорости на последних трех точках V_1 . Скорость в нижней части СНС постепенно возрастала, что, по всей видимости, обусловлено уплотнением нижних слоев за счет прохождения мелких песчинок с верхних слоев в нижние при каждой вибрационной утряске.

Для объяснения причины усиления ударных волн и формирования пиков давления при прохождении зондирующих импульсов было высказано предположение, что после воздействия основного импульса происходит разрыхление слоя песка. Зондирующий импульс, проходя через этот разрыхленный слой [9], ускоряет песчинки, они добавляют свои импульсы к количеству движения прошедшего ударно-волнового импульса, это приводит к формированию пика. При этом надо учесть, что рыхлый слой песка хуже отражает и, соответственно, пропускает большую долю интенсивности импульса по сравнению с утрамбованным, т.е. происходит не только формирование пика импульса, но и лучшее прохождения энергии волны после разрыхления песка.

Обозначим через R_1 и R_2 соответствующие волновые сопротивления воздуха и гетерогенной среды:

$$R_1 = \rho_1 C_1, \quad R_2 = \rho_2 C_2.$$

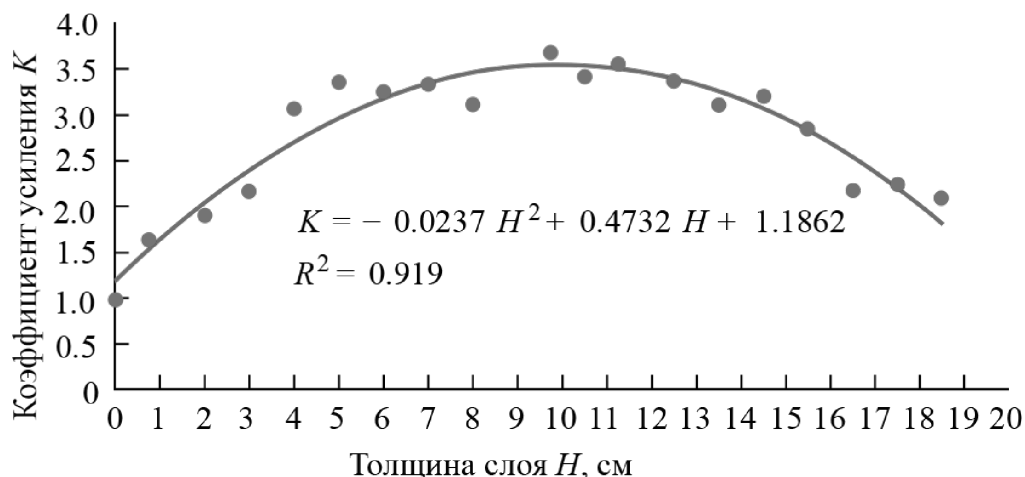


Рис. 3. Зависимость отношений нормированных амплитуд давления зондирующего импульса к основному (K) от толщины слоя песка (H).

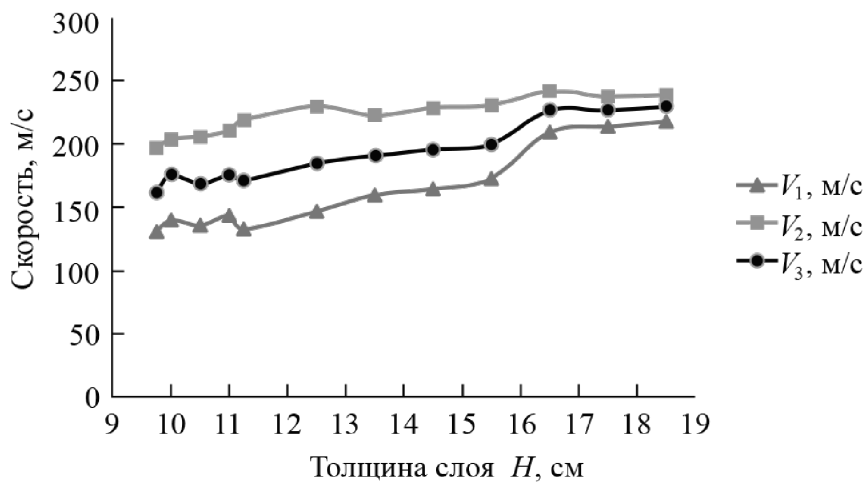


Рис. 4. Зависимость скорости основного ударного импульса от толщины слоя песка над датчиком.

Коэффициенты отражения и прохождения звуковой волны по интенсивности имеют вид [10, 11]

$$r_J = \left(\frac{R_2 - R_1}{R_2 + R_1} \right)^2, \quad t_J = \frac{4R_1 R_2}{(R_2 + R_1)^2}.$$

Волновое сопротивление рыхлого песка обозначим R'_2 , в этом случае коэффициенты отражения r'_J и прохождения t'_J по интенсивности имеют вид

$$r'_J = \left(\frac{R'_2 - R_1}{R'_2 + R_1} \right)^2, \quad t'_J = \frac{4R_1 R'_2}{(R'_2 + R_1)^2}.$$

Отношение коэффициентов прохождения по интенсивности

$$\frac{t'_J}{t_J} = \frac{R'_2 (R_2 + R_1)^2}{R_2 (R'_2 + R_1)^2}.$$

Учитывая, что $R_2 \gg R_1$ и $R'_2 \gg R_1$, получим

$$\frac{t'_J}{t_J} = \frac{R_2}{R'_2} = \frac{\rho_2 C_2}{\rho'_2 C'_2},$$

т.е. отношение коэффициентов прохождения по интенсивности рыхлой и уплотненной пористых сред равно отношению их волновых сопротивлений.

Для того чтобы определить волновое сопротивление рыхлого песка, был проведен дополнительный эксперимент с неуплотненной насыпкой с пористостью 0.45, скорость ударно-волнового импульса в верхней части СНС между датчиками D1–D2 84 м/с. В уплотненном за счет утряски песке пористость — 0.4, скорость — 120 м/с, тогда для отношения коэффициентов по интенсивности получим

$$\frac{t'_J}{t_J} = \frac{0.6}{0.55} \cdot \frac{120}{84} = 1.6.$$

В рассмотренном случае коэффициент прохождения по интенсивности в рыхлый песок больше, чем в уплотненный, в 1.6 раза. Это означает, что после разрыхления песка при воздействии ударно-волнового импульса у приходящего после него зондирующего импульса большая доля интенсивности

пройдет в насыпную среду. Но, к сожалению, этого недостаточно для объяснения механизма формирования пиков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено, что ударно-волновой импульс малой амплитуды 20–35 кПа, воздействуя на уплотненную песчаную насыпную среду, изменяет ее структуру так, что зондирующий импульс, проходящий по ней непосредственно после (13 мс) основного импульса, кардинально изменяет свою амплитуду и форму.

Анализируя результаты, полученные при различных слоях насыпной среды, можно дать следующую интерпретацию об эволюции зондирующего импульса:

- 1) в верхнем слое песка формируется пик, вдвое превышающий амплитуду импульса на поверхности;
- 2) по мере прохождения в толщу песка амплитуда пика парадоксально нарастает, в отличие от амплитуды основного импульса, которая уменьшается, различие достигает 3.5 раза;
- 3) форма импульса существенно изменяется с увеличением толщины слоя, пик смещается с заднего фронта к переднему, значительно нарастая по амплитуде.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке госзадания № 124030400064-2 (FMRS-2024-0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметов А.Т., Гималудинов И.К., Ситдикова Л.Ф., Азаматов М.Ш., Султангареев Ю.С., Хайретдинов Т.Д. О влиянии влагосодержания на распространение ударных волн слабой ин-

- тенсивности в насыпных средах // Инженерно-физический журнал. 2021. Т. 94. № 2. С. 418–423.
2. Дучков А.Д., Дучков А.А., Дугаров Г.А., Дробчик А.Н. Скорости ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду, лед или гидраты метана и тетрагидрофурана (лабораторные измерения) // ДАН. 2018. Т. 478. № 1. С. 94–99.
 3. Купер К.Э., Дробчик А.Н., Дучков А.А., Дугаров Г.А., Шарафутдинов М.Р. Исследование структуры газогидратных отложений методами рентгеновской томографии и акустического зондирования // Инженерно-физический журнал. 2022. Т. 95. № 7. С. 1815–1820.
 4. Дучков А.Д., Дугаров Г.А., Дучков А.А., Дробчик А.Н. Лабораторные исследования скорости и поглощения ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду/лед, гидраты метана и тетрагидрофурана // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 2. С. 230–242.
 5. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю. Волны в пористой среде со слоем, содержащим газовый гидрат // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61. № 4(362). С. 31–38.
 6. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Скорость и поглощение линейных волн в пористых средах, насыщенных газом и его гидратом // Прикладная механика и техническая физика. 2022. Т. 63. № 4(374). С. 56–63.
 7. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Методика численного моделирования волновых процессов в неоднородной гидратосодержащей пористой среде // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2022. Т. 8. № 3(31). С. 59–71.
 8. Ахметов А.Т., Азаматов М.А., Мухаметзянов А.Ф. Изменение структуры ударных волн в насыпных средах при переотражении // Многофазные системы. 2020. Т. 15. №. 1–2. С. 10.
 9. Ахметов А.Т., Гималтдинов И.К., Азаматов М.А., Мухаметзянов А.Ф., Богданов Д.Р. Зондирование водогазонасыщенных насыпных сред переотраженными волнами непосредственно после воздействия ударной волны // Письма в Журнал технической физики. 2022. Т. 48. № 1. С. 23–26.
 10. Зацепин А.Ф. Акустический контроль. В 2 ч. Ч. 1. Введение в физику акустического контроля. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. 88 с.
 11. Исакович М.А. Общая акустика. М.: Наука, 1973. 496 с.

EFFECT OF AMPLIFICATION OF SHOCK WAVES IN BULK MEDIA

A. T. Akhmetov^a, I. K. Gimaltdinov^b, A. F. Mukhametzyanov^b, R. F. Gizatullin^a

^aMavlyutov Institute of Mechanics Ufa Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia

^bUfa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

Presented by Academician of the RAS R. I. Nigmatulin

It is well known that shock waves in sandy environments are absorbed, i.e. as they pass through the bulk medium, their amplitude decreases. In shock tubes, as a rule, the results of the impact of shock wave pulses on an object are studied, leading to a change in the shape and amplitude of the pulse that characterizes the medium. In a shock tube equipped with a section of bulk media, the wave is repeatedly reflected from the surfaces of the porous medium under study and the upper end of the tube. The amplitude and shape of the reflected wave differs insignificantly from the main pulse. At the same time, the amplitude of the re-reflected wave propagating in the sand immediately after exposure (13 ms) to the main pulse increases more than three times compared to the amplitude of the main pulse at this depth. Compared to its value at the sand surface, the amplitude in the sand thickness becomes almost twice as high. The maximum amplification of the amplitude of a reflected wave in a bulk medium increases with increasing layer through which the pulse passes to a certain depth, and then begins to decrease.

Keywords: sand fill, shock tube, shock wave pulse, main pulse, probing pulse, pressure peak, bulk medium layer