

Эволюция ударных волн в насыпной среде из песка при увеличении водосодержания

Р.Ф. Гизатуллин¹, А. Ф. Мухаметзянов²

¹Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа, Россия

²Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

Ударная труба состоит из камеры высокого давления (КВД) и камеры низкого давления (КНД), разделенных тонкой диафрагмой на две части. [1]. В наших экспериментах использовалась ударная труба с пьезоэлектрическими датчиками, регистрирующими импульсы давления в КНД и тензометрическим датчиком, который регистрирует уровень давления разрыва в КВД (рис.1).

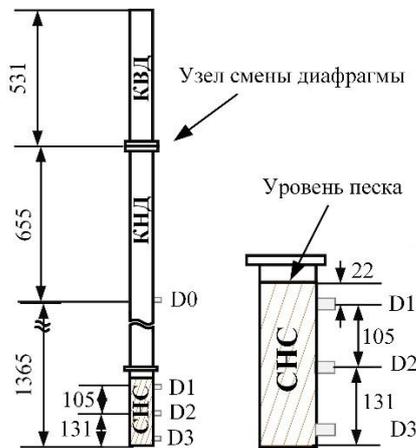


Рис. 1. Ударная труба и расположение датчиков.

Нагнетание воздуха в КВД до давления 60 кПа приводит к разрыву диафрагмы, в нашем случае из кальки, разделяющей КВД и КНД. После разрыва диафрагмы в трубе формируется ударная волна. Эпюра ее давления регистрируется датчиком D0. Волна распространяется вдоль по трубе до столкновения с препятствием, далее отражается, малая доля проходит в препятствие.

В работе изучаются ударно-волновые свойства насыпной среды из песка, поры которого насыщены водой. Водогазонасыщенная среда помещается в секцию насыпных сред (СНС). Эксперимент проводился для песка с влажностью в диапазоне от 0 до 85%. Нулевая влажность соответствует насыпкам, высушенным в вакуумном шкафу. При наполнении мы добивались одинаковой пористости за счет утряски и частичной трамбовки. Пористость во всех экспериментах составила 40,5 %, соответственно высота насыпной среды находилась на одном и том же уровне. Амплитуда ударной волны определяется давлением разрыва диафрагмы. Давление разрыва Δp_0 в экспериментах составляла 38 ± 4 кПа.

Рассмотрим эпюры давления датчиков D1, D2 и D3, расположенных под поверхностью песчаной насыпки на глубине 22 мм, 127 мм и 158 мм соответственно (рис.2). Первый импульс назовем «основным», а переотраженный импульс «зондирующим» [2]. По изменению условий прохождения, формирования основного и зондирующего импульсов, их поглощению и генерации колебательных процессов по мере увеличения водонасыщенности можно условно выделить 6 диапазонов.

В сухом песке после воздействия основного импульса, на зондирующем импульсе, формируются пики (D1 и D2), амплитуды, которых превышают амплитуду основного импульса (рис.2 А). Этот процесс происходит потому, что первый импульс изменил структуру песка и произошла перегруппировка песчинок. Для объяснения формирования пика в работе [2] предложена физическая модель. Под давлением импульса сжатия насыпная среда сжимается пока есть импульс избыточного давления. После прохождения импульса происходит разгрузка, верхний слой насыпки после сжатия релаксирует, «расширяясь» в течение 13 мс. При прохождении импульса переотраженной волны через «разрыхленный» слой частицы песка ускоряются, к моменту завершения импульса «натякаются» на менее возмущенный слой, их торможение приводит к образованию пика давления на фоне импульса.

При уровне водонасыщенности от 0 до 4% (1-й диапазон) основной импульс на всех датчиках проходит до дна. Четко наблюдается пик на заднем фронте зондирующего импульса. При 4% влажности на нижнем датчике (D3) появляются осцилляции (волновые пачки). Таким образом, даже небольшое количество влаги – 2%, «скрепляет» насыпную среду. О чем свидетельствует уменьшение пика зондирующего импульса.

При уровне водонасыщенности 6% ударная волна не доходит до нижнего датчика, энергия импульса переформируется в высокочастотные колебания. Зондирующий импульс сглаживается, пик практически исчезает (D1). По мере распространения импульс преобразуется в волновой пакет в виде цуга. При 10% до нижнего датчика импульс доходит только в виде пульсаций. (рис.2 В) Таким образом, диапазон водонасыщенности от 6 до 12 % (2-й диапазон) характеризуется тем, что пик зондирующего импульса исчезает и появляются осцилляции на уровне датчика D2.

Диапазон водонасыщенности от 15 до 25 % (3-й диапазон) (рис.2 С) характеризуется формированием пика зондирующего импульса иной природы и появлением на датчиках D2 и D3 колебательных пачек и гармонических колебаний на всем диапазоне между основным, переотраженным и дважды переотраженным импульсами.

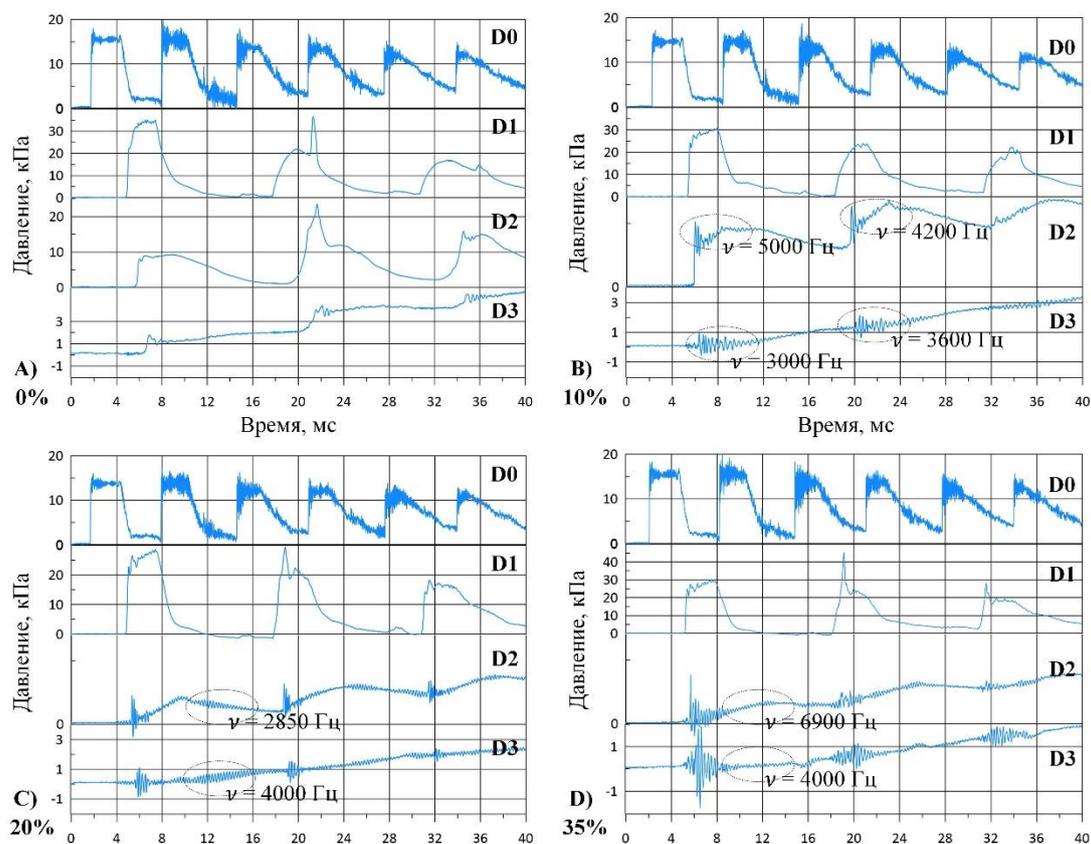


Рис. 2. Эпюры давления ударной волны в песке на датчиках D0 – D3 при водонасыщенности 0 – 25%: А) 0%; В) 10%; С) 20%; D) 35%.

Для диапазона 30-45% (4-й диапазон) характерно постепенное увеличение амплитуды пика зондирующего импульса (D1). При водонасыщенности 35 % амплитуда зондирующего почти вдвое превышает амплитуду основного импульса (рис.2 D). На датчиках D2 и D3 сигнал представлен в виде волновой пачки. Зондирующий импульс на этих датчиках практически не проявляется (рис.3 А).

При влажности 50 - 70% (5-й диапазон) на датчике D2 снова, как и при влажности 0-25%, появляется «ступенька» (рис.3 В). Высокочастотные осцилляции несколько сглаживаются. До дна секции (датчик D3) импульсы доходят только в виде цуга (волновой пачки). Таким образом, можно сказать, что улучшилась акустическая проводимость среды.

При уровне водонасыщенности 75 % и более (6-й диапазон) картина кардинально меняется (рис.3 С). На датчиках D1 и D2 импульсы полностью сглаживаются, высокочастотные колебания исчезают. Мы видим, что в этом диапазоне влагосодержания, импульсы четко проходят до дна секции насыпных сред. То есть насыпная среда стала акустически прозрачной. Если сравнить эпюры давления при 75% и 85% на датчиках D1-D3, можно сказать сигнал при более высокой водонасыщенности проходит намного лучше, так как амплитуда давления как основного, так и зондирующего импульса при 85% значительно выше (рис.3 D).

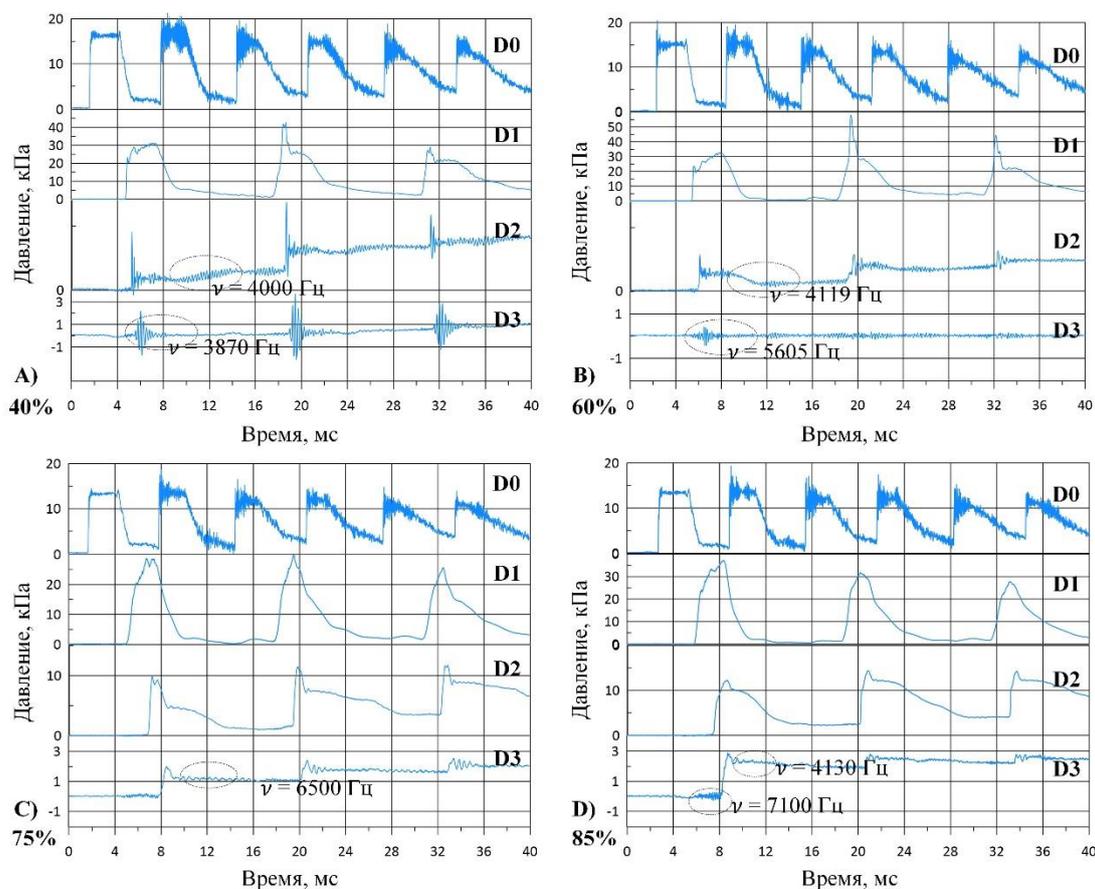


Рис. 3. Эпюры давления ударной волны в песке на датчиках D0 – D3 при водонасыщенности 40 – 85%:

А) 40%; В) 60%; С) 75%; D) 85%.

Заключение.

1) В сухом песке при прохождении зондирующего импульса происходит формирование пика на глубине 2 см от поверхности, а на глубине 12,7 см амплитуда пика превосходит амплитуду основного импульса более чем в 2 раза.

2) Амплитуда формирующегося пика давления (датчик D1) при прохождении зондирующего импульса по мере увеличения водонасыщенности растет и, при влажности выше 12 процентов, превышает амплитуду основного импульса. При влажности 45% - превышает вдвое. При дальнейшем увеличении водонасыщенности амплитуды основного и зондирующего импульсов постепенно выравниваются.

3) По мере увеличения влажности, падающий и зондирующий импульс возбуждают осцилляции на уровне датчиков D3 и D4

4) При водосодержании 75% и выше, среда становится «акустически прозрачной».

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

Список литературы

1. Зельдович Б., Райзер Ю. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – Рипол Классик, 2013.
2. Ахметов А.Т., Гималудинов 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.