

Влияние мембраны на прохождение ударно-волнового импульса в песке

© А.Т. Ахметов^{1,2}, И.К. Гималтдинов², Р.Ф. Гизатуллин², Д.Р. Богданов^{1,2}, М.А. Азаматов³

¹ Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия

² Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

³ Салым Петролеум Девелопмент Н.В., Москва, Россия

E-mail: iljas_g@mail.ru

Поступило в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 12 августа 2025 г.

Принято к публикации 17 августа 2025 г.

Экспериментально исследовано влияние экранирования песчаной насыпки алюминиевой фольгой (мембраной) на эволюцию ударно-волновых импульсов. Эксперименты проведены на ударной трубе, оснащенной секцией насыпной среды. Изучено влияние экранирования на динамику прохождения основного и зондирующих импульсов в уплотненной песчаной насыпной среде. Обнаружено, что экранирование практически не изменяет форму распространяющегося основного импульса, в то же время оно существенно изменяет форму проходящих зондирующих импульсов.

Ключевые слова: ударная труба, ударно-волновой импульс, песчаная насыпная среда, экранирующая фольга, зондирующий импульс.

DOI: 10.61011/PJTF.2025.24.61752.8093

Исследование распространения ударно-волновых импульсов (УВИ) в пористых средах представляет значительный интерес для решения прикладных задач, включая обеспечение взрывобезопасности технологических процессов [1], проектирование защитных конструкций от динамических нагрузок [2,3], а также совершенствование методов сейсмической разведки [4]. Экспериментальные исследования динамики УВИ в пористых средах традиционно проводятся в ударных трубах, позволяющих регистрировать параметры падающих и переотраженных волн [5]. Подход, предложенный в работе [6], предполагает использование переотраженных импульсов для зондирования изменений в среде после первичного воздействия УВИ. Данная методика выявила парадоксальное явление: амплитуда переотраженного импульса в насыпном песке может превышать основной импульс в 3–4 раза, причем максимум давления смещается к переднему фронту волны по мере углубления в среду [7].

Несмотря на давнюю историю изучения акустических свойств пористых сред, остаются неисследованными эффекты, связанные с влиянием экранирования пористой среды металлическими мембранами. В настоящей работе впервые анализируется влияние алюминиевой фольги, которая плотно прилегает к насыпке из песка, на характеристики основного и переотраженных импульсов в насыпном песке. Проводится сравнение с предыдущими экспериментами [6,7] с открытой поверхностью песка.

Эксперименты проводились на ударной трубе (рис. 1), состоящей из камеры высокого давления и камеры низкого давления, разделенных диафрагмой, при разрыве которой формируется ударная волна, и секции насыпных сред [6]. Нагнетание воздуха в камеру высокого давления приводит к разрыву диафрагмы из промасленной бумаги двух типов: калька и „Снегурочка“

(бумага ксерографическая для офисной техники). Профили давления, сформировавшегося и распространяющегося импульса регистрируются акустическими пьезоэлектрическими датчиками типа ЛХ 610 с частотным диапазоном 3–10 000 Hz [7]. Амплитуда ударной волны однозначно связана с давлением разрыва диафрагмы. Секция насыпных сред послойно заполнялась песком (размеры песчинок в диапазоне от 160 до 650 μm , среднеарифметический размер 390 μm [6]) с сильной утруской и умеренной трамбовкой, пористость уплотненного таким образом песка составила 39.2 %, что соответствует плотности 1590 kg/m^3 . В ударной трубе, оснащенной секцией насыпных сред, волна многократно переотражается от поверхности изучаемой насыпной среды и верхнего торца ударной трубы. Первый переотраженный импульс, который падает на поверхность песка через 13 ms после основного, имеет при прохождении в толще песка форму, качественно отличную от формы основного на тех же глубинах. Поскольку эти изменения вызваны кратковременным преобразованием структуры песка после воздействия основного импульса, переотраженный импульс, форма которого обусловлена этими структурными изменениями, назван зондирующим [6].

Амплитуды ударно-волновых импульсов, сформировавшихся при использовании диафрагм из кальки (15 kPa) и бумаги „Снегурочка“ (30 kPa), в среднем различались вдвое. Для характеристики переднего фронта импульсов удобно использовать крутизну фронта [6] $P_i = (\Delta p / \Delta t)_{\text{max}}$, $[P_i] = \text{kPa/ms}$, где i соответствует выбранной эпюре, которая берется в точке максимального нарастания давления на фронте. Значения крутизны приведены на эпюрах давления слева от импульсов (рис. 2). В зависимости от условий разрыва диафрагмы, которые отличаются друг от друга, крутизна основного

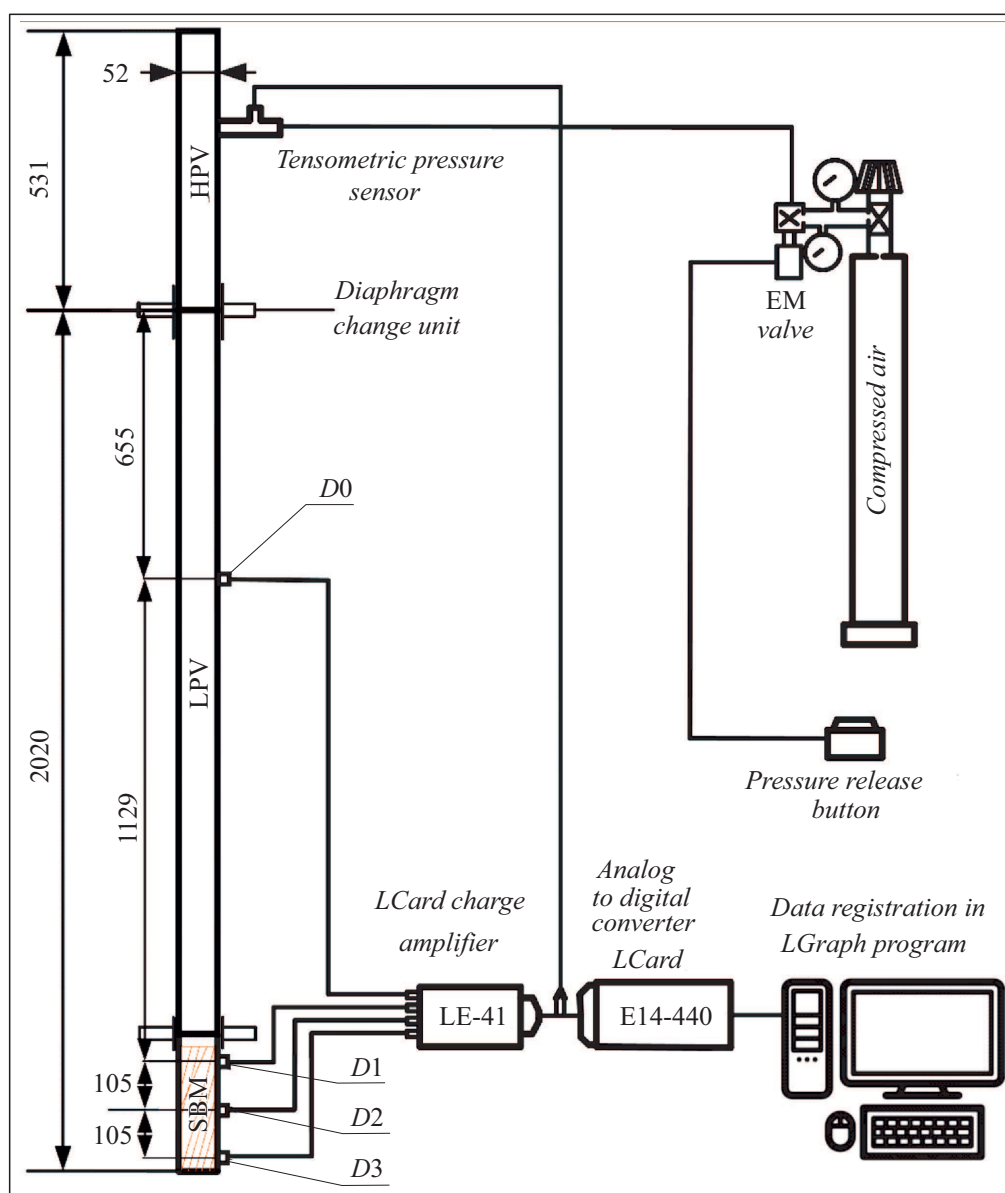


Рис. 1. Ударная труба, геометрические размеры (в mm) и расположение диафрагмы, уровня насыпной среды и пьезоэлектрических датчиков давления D0, D1, D2, D3. Внутренний диаметр всех секций 52 mm [6].

импульса в песке на уровне датчиков D1 и D2 в экспериментах с открытой насыпкой меняется в диапазоне от 200 до 1000 kPa/ms. Крутизна зондирующего импульса заметно ниже, менее 200 kPa/ms, что является признаком разрыхления насыпной среды. Прохождение двух сантиметров песка (от поверхности до датчика D1) приводит к незначительному уменьшению амплитуды и крутизны фронта. Крутизна основного импульса на датчике D1 — $P_{1a} = 250$ kPa/ms. Зондирующий импульс доходит до датчика D1 через 13 ms после начала воздействия основного импульса, крутизна его фронта невелика ($P_{2a} = 15$ kPa/ms, эпюра 2a); это, по всей видимости, связано с разрыхлением песка при отражении основного импульса от поверхности. На заднем фронте зондиру-

ющего импульса формируется пик [6] с амплитудой, превышающей в 1.5 раза амплитуду основного импульса, со значительной крутизной 120 kPa/ms. Похожую форму с пиком на заднем фронте имеет и второй зондирующий импульс (эпюра 3a). Примечательно, что время формирования пика зондирующего импульса на датчике D1 практически совпадает с временем формирования пика на датчике D2, вершины пиков формируются практически одновременно.

При вдвое большей амплитуде УВИ — 30 kPa (рис. 2, b) — значения крутизны фронтов падающих и отраженных импульсов, сформировавшихся в воздухе, кратно превышают значения при малой амплитуде (рис. 2, a, b). Отметим, что при большей амплитуде

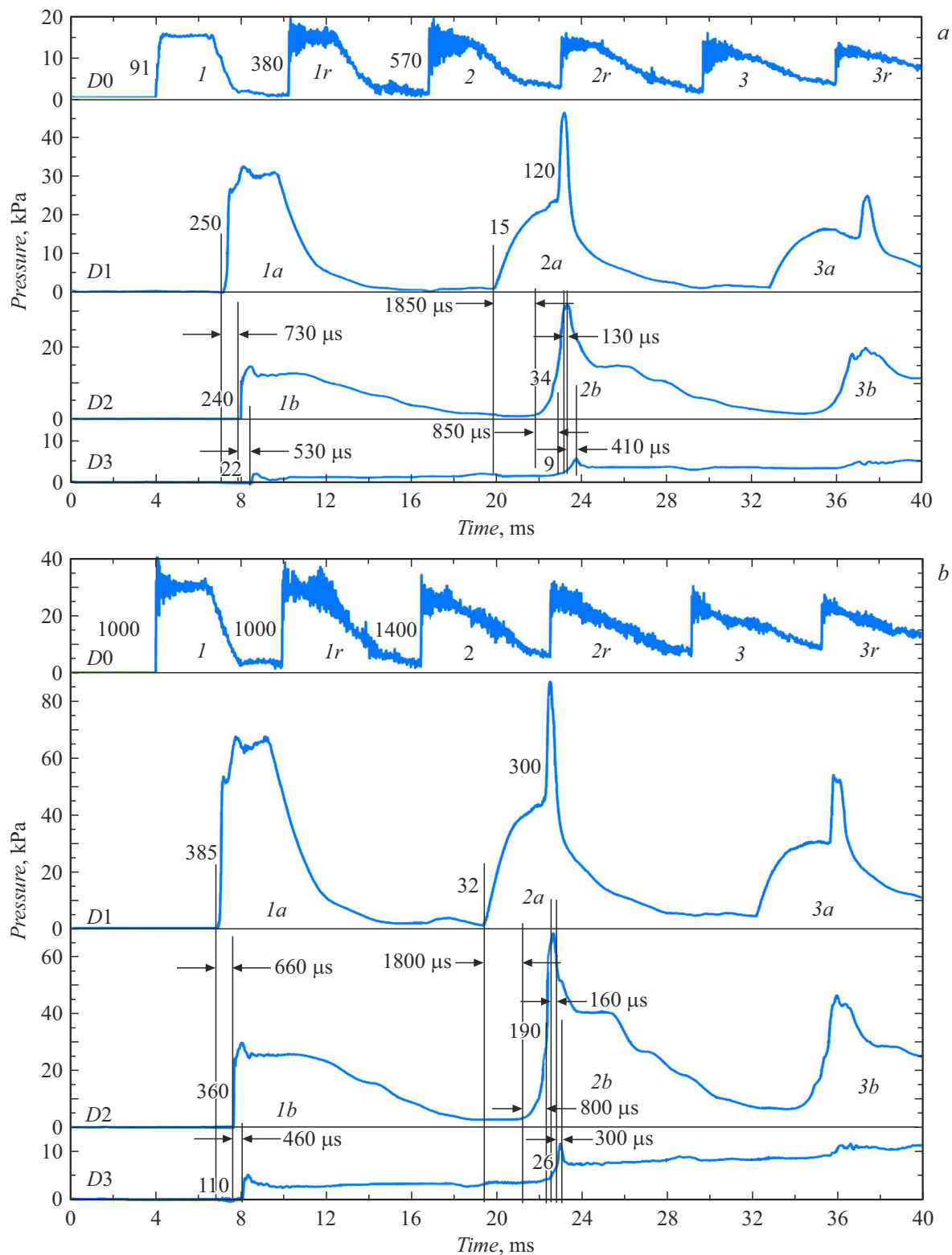


Рис. 2. Основной и зондирующие ударно-волновые импульсы в насыпной среде из песка (датчики D0–D3). Части *a* и *b* соответствуют диафрагмам из кальки и бумаги „Снегурочка“ (у передних фронтов импульсов приведены значения крутизны в kPa/ms).

значения крутизны фронтов импульсов, проходящих слой песка, выше (рис. 2, *b*, $D1-D3$). На датчике $D2$ формируется пик на переднем фронте одновременно с пиком на датчике $D1$, временное расстояние между пиками $160\text{ }\mu\text{s}$, что соответствует скорости 660 m/s .

В песчаной насыпке после воздействия основного импульса [6,7] на зондирующем импульсе формируются пики ($D1$ и $D2$), амплитуды которых превышают амплитуду основного импульса (рис. 2, *a, b*). Есть две основные гипотезы образования пиков. Согласно первой, в течение прохождения падающего основного ударного импульса насыпная среда сжимается, после отражения импульса происходит разгрузка, верхний слой насыпки релаксирует, среда становится более рыхлой по сравнению с исходным состоянием, и все это сказывается на поведении зондирующего импульса: он идет по более рыхлой среде, в результате чего формируется пик. Согласно второй гипотезе, прохождение через верхний слой песчаной насыпки падающего импульса сопровождается фильтрацией газа в этот слой. Когда действие падающего импульса прекращается, проникший в песок газ вырывается из песка, и это приводит к разрыхлению верхнего слоя насыпки.

Чтобы проверить гипотезы, алюминиевую фольгу толщиной $8.0 \pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$, массой 0.046 g , диаметр которой на 4 mm больше диаметра трубы, поместили (плотно) на поверхность песка. Края фольги загнули в виде корытца, такая конструкция практически полностью экранирует насыпную среду от проникновения потока воздуха в песок во время действия УВИ. Сравнение характеристик основных импульсов на рис. 2 и 3 показывает, что значения крутизны импульсов в песчаной насыпке, накрытой фольгой, на датчике $D1$ (эпюра $1a$ на рис. 3, *a*) практически вдвое больше, а их амплитуда на 17% меньше, чем в случае песка с открытой поверхностью (эпюра $1a$ на рис. 2, *a*). Значительно большая крутизна свидетельствует о том, что песок, экранированный фольгой, ведет себя как более жесткая среда по сравнению с открытой насыпной средой.

Отметим, что в случае экранированной насыпки наблюдается двухступенчатый рост зондирующего импульса, передний фронт в течение $400\text{ }\mu\text{s}$ идет как в мягкой среде с малой крутизной 10 kPa/ms (эпюра $2a$ на рис. 3, *a*, $D1$), даже меньшей по сравнению с крутизной переднего фронта первого зондирующего импульса в открытом песке (эпюра $2a$ на рис. 2, *a*, $D1$). Далее с крутизной 670 kPa/ms импульс на переднем фронте резко возрастает за $90\text{ }\mu\text{s}$, достигая значения, почти вдвое превышающего амплитуду основного импульса. После воздействия первого зондирующего импульса второй зондирующий импульс формируется таким же по форме, как и его предшественник, с такой же небольшой особенностью ступенчатого роста с крутизной 8 и 680 kPa/ms (эпюра $3a$, рис. 3, *a*, $D1$). Эта особенность, вероятно, обусловлена образованием верхнего слоя взрыхленного песка под фольгой при отражении основного импульса. Сигналы на датчике $D2$ характеризуются резким

ростом импульса на переднем фронте, причем значения крутизны ($230, 490\text{ kPa/ms}$, эпюры $2b, 3b$) и амплитуды зондирующих импульсов значительно выше (160 kPa/ms) аналогичных параметров основного импульса ($1b$). Это указывает на то, что насыпная среда под фольгой становится значительно жестче по сравнению со средой с открытой поверхностью. При падении зондирующего импульса во взрыхленном слое он распространяется с малой скоростью и ускоряет песчинки этого слоя. Более глубокие слои уплотнены, и на этой жесткой насыпной среде разогнанные песчинки вместе с ударным импульсом формируют пик на переднем фронте.

При воздействии на эту же уплотненную насыпную среду с той же экранирующей фольгой УВИ с амплитудой (рис. 3, *b*), вдвое превышающей предыдущую (рис. 3, *a*), форма эпюр основного импульса практически такая же. Зондирующий импульс формируется без пиков с крутизной фронта 660 kPa/ms , вдвое меньшей крутизны основного импульса (1050 kPa/ms). При воздействии импульса с вдвое большей амплитудой нет условий для разрыхления верхнего слоя песка при отражении. После поджатия основным импульсом скелет в течение 13 ms приходит в исходное состояние, поэтому второй и третий зондирующие импульсы проходят аналогично основному.

Обнаруживается качественное различие: при прохождении зондирующего импульса сформировался пик (но не на заднем, а на переднем фронте) с большей крутизной при отражении УВИ малой амплитуды (рис. 3, *a*). Следует отметить, что при удвоенной амплитуде УВИ (рис. 3, *b*) описанный пик не формируется, крутизна фронта зондирующего импульса вдвое меньше крутизны фронта основного импульса, в то время как в случае малой амплитуды крутизна фронта возрастала от импульса к импульсу. Соотношения амплитуд основного и зондирующего импульсов, если не учитывать высоту пика, несильно различаются для обеих амплитуд.

Таким образом, при экранировании фольгой исчезают пик на заднем фронте и его усиление с глубиной при малых и больших амплитудах УВИ. Это свидетельствует о справедливости второй гипотезы, согласно которой эффект усиления обусловлен проникновением газовой фазы во время воздействия УВИ в уплотненную песчаную насыпную среду.

В заключение отметим следующее.

— В песчаной насыпной среде наличие экранирующей мембраны из фольги практически не сказывается на форме распространяющегося в ней основного импульса, при этом амплитуда импульса, проходящего в песок, на 15% ниже, чем амплитуда импульса в открытой насыпной среде. Это обусловлено исключением прохождения УВИ по поровому пространству насыпной среды и импульсной фильтрации газа в уплотненный песок.

— Основным импульс давления приводит к сжатию песчаной насыпной среды и формированию тонкого разрыхленного слоя под экранирующей фольгой при

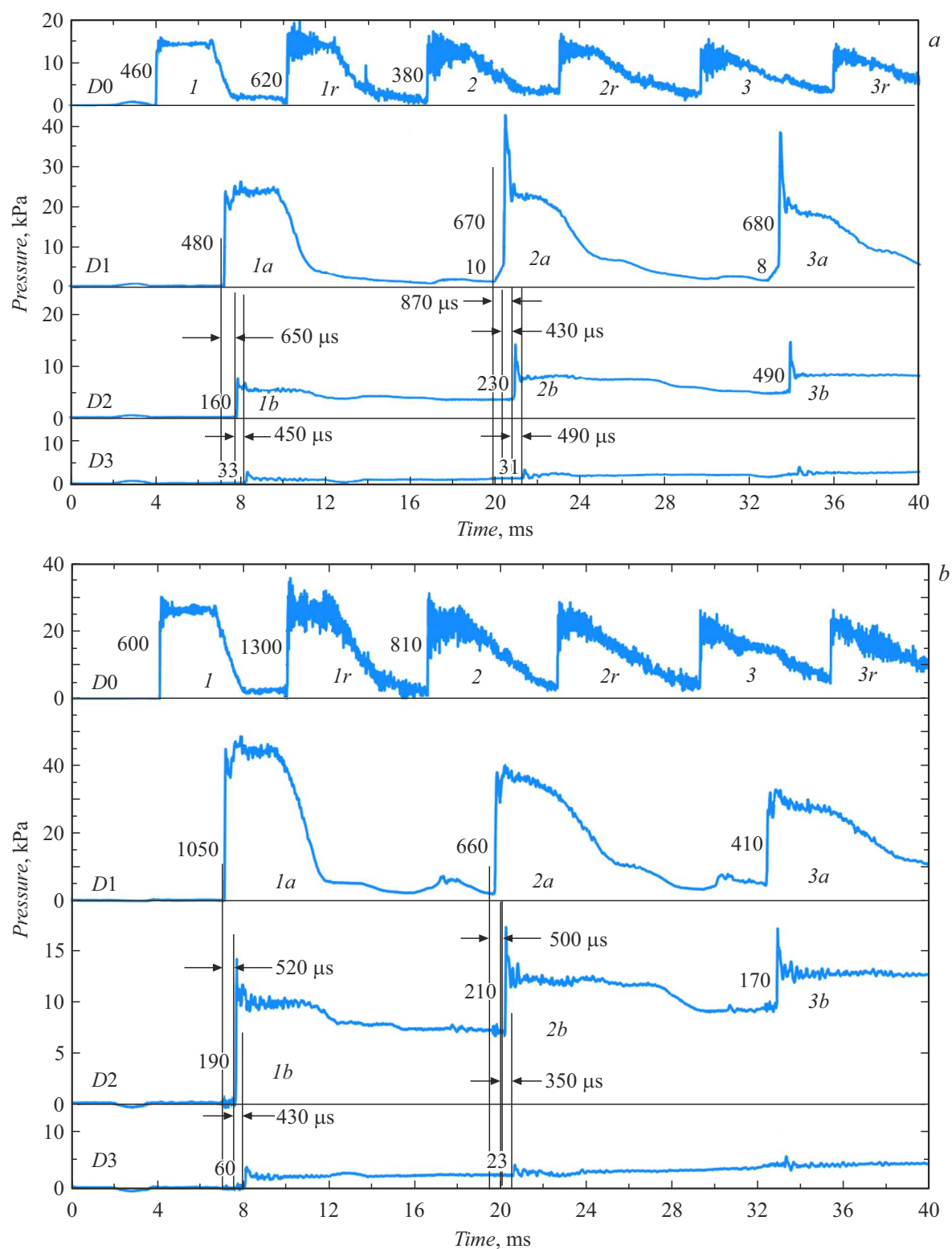


Рис. 3. То же, что на рис. 2, поверхность песка экранирована алюминиевой фольгой (мембраной).

отражении УВИ, состояние поджата сохраняется до прихода зондирующего импульса.

— Двухступенчатый рост зондирующего импульса на переднем фронте обусловлен ударным сжатием раз-

рыхленного слоя песка над поджатой, ставшей более жесткой, уплотненной насыпной средой, крутизна пика многократно (в 6 раз) превышает крутизну пика зондирующего импульса в открытой насыпной среде.

Финансирование работы

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] П.С. Уткин, П.А. Чупров, Компьютерные исследования и моделирование, **16** (6), 1361 (2024). DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-6-1361-1384
- [2] О.Ю. Болдырева, А.А. Губайдуллин, Д.Н. Дудко, А.Г. Кутушев, Физика горения и взрыва, **43** (1), 132 (2007). https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17012282_40129678.pdf [O.Yu. Boldyreva, A.A. Gubaidullin, D.N. Dudko, A.G. Kutushev, Combust. Explos. Shock Waves, **43** (1), 114 (2007). DOI: 10.1007/s10573-007-0016-3].
- [3] Д.М. Балапанов, С.Ф. Урманчеев, Письма в ЖТФ, **36** (13), 71 (2010). <https://journals.ioffe.ru/articles/14075> [D.M. Balapanov, S.F. Urmancheev, Tech. Phys. Lett., **36** (7), 618 (2010). DOI: 10.1134/S1063785010070102].
- [4] А.Д. Дучков, А.А. Дучков, Г.А. Дугаров, А.Н. Дробчик, ДАН, **478** (1), 94 (2018). DOI: 10.7868/S086956521801019X [A.D. Duchkov, A.A. Duchkov, G.A. Dugarov, A.N. Drobchik, Dokl. Earth Sci., **478** (1), 74 (2018). DOI: 10.1134/S1028334X18010014].
- [5] В.Е. Донцов, В.Е. Накоряков, Б.Г. Покусаев, Акуст. журн., **40** (4), 683 (1994). http://www.akzh.ru/pdf/1994_4_683-685.pdf
- [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 [A.T. Akhmetov, I.K. Gimaltdinov, M.A. Azamatov, A.F. Mukhametzyanov, D.R. Bogdanov, Tech. Phys. Lett., **48**, 97 (2022). DOI: 10.1134/S1063785022040022].
- [7] А.Т. Ахметов, И.К. Гималтдинов, А.Ф. Мухаметзянов, Р.Ф. Гизатуллин, Докл. РАН. Физика, техн. науки, **519** (1), 41 (2024). DOI: 10.31857/S2686740024060076