

УДК 534-18

ВЛИЯНИЕ ЭКРАНИРОВАНИЯ НАСЫПНОЙ СРЕДЫ НА ДИНАМИКУ УДАРНО-ВОЛНОВОГО ИМПУЛЬСА

© 2025 И. К. Гималтдинов^a, А. С. Родионов^b, Р. Ф. Гизатуллин^c,
Е. Ю. Кочанова^d

Уфимский государственный нефтяной технический университет,
ул. Космонавтов, 1, г. Уфа 450064, Россия

E-mails: ^ailjas_g@mail.ru, ^bartrodionov@mail.ru, ^cgiz-renat@yandex.ru,
^dmoto8728@mail.ru

Поступила в редакцию 28.06.2025 г.; после доработки 16.07.2025 г.;
принята к публикации 17.09.2025 г.

Изучено влияние экранирования на динамику прохождения ударно-волнового импульса в песчаной насыпной среде. Показано, что экранирование насыпной среды приводит к более сильному уменьшению амплитуды импульса по сравнению с «открытой» насыпкой. Приведено сравнение с экспериментальными данными.

Ключевые слова: ударная труба, экранирование, распад разрыва, зернистая среда, метод контрольного объёма, численные расчёты, моделирование.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2025.28.303

ВВЕДЕНИЕ

Интерес исследователей к изучению распространения волн в пористых средах связан с решением проблем взрывобезопасности [1, 2], защиты сооружений от воздействия ударных волн [3, 4], вопросами сейсморазведки и т. д. [5, 6]. Экспериментальные исследования по изучению взаимодействия ударно-волновых импульсов с пористой средой проводятся в ударных трубах [7, 8]. Традиционно ударные трубы используются для исследования особенностей распространения ударной волны в различных средах, анализа волновых свойств этих сред по скорости ударных волн и изменению формы падающего (основного) импульса. В ударной трубе, оснащённой 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 предложено в работе [9]. При изучении распространения ударного импульса в насыпных средах было выявлено образование пиков при прохождении зондирующего (переотраженного) импульса, амплитуда которого превышает амплитуду падающего импульса в 3-4 раза. В работе [10], являющейся продолжением работы [9], на основе результатов, полученных при различных слоях насыпной среды, установлено, что в верхнем слое песка формируется пик, вдвое превышающий амплитуду импульса на поверхности; по мере прохождения в толщу песка амплитуда пика парадоксально нарастает; форма импульса существенно изменяется с увеличением толщины слоя, пик смещается с заднего фронта к переднему, значительно нарастая по амплитуде. Условия формирования пиков давления в зондирующем импульсе при последовательных нагрузлениях изначально неутрамбованного-рыхлого песка изучены в [11], показано, что в рыхлом песке пики не образуются, при последовательных нагрузлениях песок уплотняется, и это приводит к формированию пиков на зондирующем импульсе. Эффект усиления ударно-волнового воздействия на насыпку из песка исследован

в работе [12], где показано, что воздействие ударной волны амплитудой 1.0 Мпа создаёт волну напряжения в среде, приводящую к уплотнению скелета, что приводит к усилению амплитуды волны в 4-5 раз в верхнем слое песка.

Отметим некоторые исследования, проведённые в ударных трубах и посвящённые исследованию динамики взаимодействия ударно-волнового импульса (УВИ) со слоем экранированной насыпной среды. Взаимодействие ударной волны с гранулированным слоем сферических частиц в ударной трубе исследовано в [13]. Между пористым слоем и торцевой стенкой трубы располагалась «приторцевая» область газа. Рассмотрены две постановки задачи. В первом варианте структура и положение пористого слоя предполагались неизменными. Во втором — гранулированный слой разрушался под действием падающей ударной волны и превращался в подвижное облако частиц. Для обоих вариантов получены и проанализированы волновые структуры, которые возникают как перед пористым слоем гранулированных частиц, так и в приторцевой области между гранулированным слоем и торцевой стенкой ударной трубы. Установлено, что в обоих случаях, по сравнению с «пустой» трубой, наблюдается уменьшение импульса воздействия на торцевую поверхность ударной трубы, а в случае неразрушающего гранулированного слоя — и снижение абсолютного уровня давления. В работе [14] зернистый слой, на который падал УВИ, был покрыт на границе тонкой (10 мкм) полиэтиленовой пленкой для предотвращения фильтрации газа. Основываясь на небольшой разнице по форме сигналов с покрытым зернистым слоем и непокрытым, сделано утверждение, что пленка слабо влияет на условия удара, отмечено, что амплитуды сигналов в покрытом зернистом слое меньше, чем в непокрытом. Экспериментальному изучению эффективности системы песчаных барьеров для смягчения ударных волн посвящена работа [15]. Система песчаных барьеров сконструирована из кубической проволочной сетчатой опалубки, облицованной геотекстилем, и образует толстый защитный барьер, заполненный гранулированным материалом. В качестве гранулированного материала заполнения используются сухие песчаные частицы размером от микрометра до нескольких миллиметров (мелкие и крупные). Стеклянные шарики сферической формы также используются в качестве материала заполнения для изучения влияния формы частиц заполнения на поведение затухания. Рассматривается процесс затухания ударной волны песчаным барьером с геотекстильной облицовкой и без неё. Эксперименты проводятся с использованием обычной ударной трубы, где генерируются ударные волны с числом Маха в диапазоне 1,29–1,70. Экспериментальные результаты показывают, что наличие слоя геотекстиля вносит значительный вклад в затухание ударной волны.

В данной работе экспериментально и теоретически изучается влияние наличия мембраны, примыкающей к насыпной пористой среде на динамику прохождения ударно-волнового импульса, падающего из области газа. Проведено сравнение с экспериментальными данными.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Пусть в ударной трубе (см. рис. 1), оснащённой секцией насыпной среды (СНС), после разрыва диафрагмы между камерой высокого давления (КВД) и камерой низкого давления (КНД) формируется ударная волна [9, 10]. Требуется изучить динамику ударно-волнового импульса при прохождении СНС, если насыпная среда экранирована невесомой и абсолютно жёсткой мембраной, размещённой непосредственно на поверхности насыпной среды и препятствующей фильтрации газа.

Для описания движения в насыпной среде будем полагать, что она представляет с собой смесь контактирующих друг с другом твёрдых частиц и газа, заполняющего поровое пространство. Используя общепринятые допущения для описания таких смесей, примем следующую систему уравнений [4], состоящую из уравнений сохранения масс:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v_g}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s v_s}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

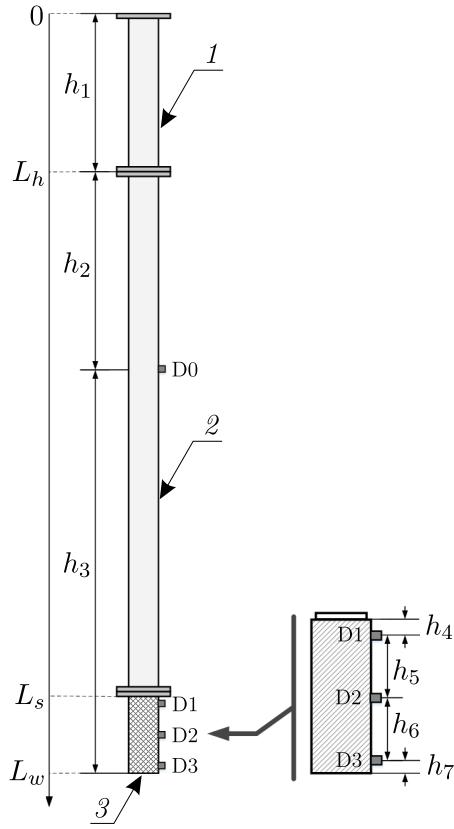


Рис. 1. Схематическое изображение ударной трубы:

1 — камера высокого давления (КВД), 2 — камера низкого давления (КНД),
 3 — секция насыпной среды (СНС); h_k — расстояния между датчиками ($k = 1, 7$):
 $h_1 = 531$ мм; $h_2 = 655$ мм; $h_3 = 1365$ мм; $h_4 = 22$ мм; $h_5 = 105$ мм; $h_6 = 105$ мм; $h_7 = 26$ мм

импульсов

$$\frac{\partial \rho_g v_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g v_g^2}{\partial x} + \alpha_g \frac{\partial p_g}{\partial x} = -F_\mu - F_m, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_s v_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s v_s^2}{\partial x} + \alpha_s \frac{\partial p_g}{\partial x} = \frac{\partial \sigma_{s*}}{\partial x} + F_\mu + F_m, \quad (3)$$

и энергии газовой и дисперсной фаз

$$\frac{\partial \rho_g u_g}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g u_g v_g}{\partial x} + p_g \frac{\partial (\alpha_g v_g + \alpha_s v_s)}{\partial x} = (F_\mu + F_m)(v_g - v_s) - Q, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho_s u_s}{\partial t} + \frac{\partial \rho_s u_s v_s}{\partial x} - \sigma_{s*} e_{s*} = Q. \quad (5)$$

Скелет пористой среды будем считать вязкоупругим

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

$$\sigma_{s*} < 0, \quad e_{s*} \leq 0, \quad \sigma_{s*} = 0, \quad e_{s*} > 0.$$

Уравнение для продольной компоненты тензора приведённой скорости деформации твёрдой фазы примем в виде

$$\begin{aligned} e_{s*} &= \frac{d_s \xi_{s*}}{dt} \equiv \frac{\partial v_s}{\partial x} & \frac{d_i}{dt} &= \frac{\partial}{\partial t} + v_i \frac{\partial}{\partial x}, \\ E_{f*} &= \rho_{s0} D_{f*}^2, & E_{e*} &= \rho_{s0} D_{e*}^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Газ будем считать калорически совершенным, материал твёрдой фазы несжимаемым.

$$p_g = \rho_g^0 R T_g, \quad u_g = c_{vg} T_g, \quad (8)$$

$$\rho_s^0 = \text{const}, \quad u_s = c_s T_s, \quad (9)$$

$$\rho_i = \alpha_i \rho_s^0, \quad i = g, s, \quad \alpha_g + \alpha_s = 1.$$

здесь, ρ_i, v_i, u_i, T_i — приведённая плотность, массовая скорость, удельная внутренняя энергия и температура i -й фазы (нижние индексы $i = g, s$ соответствуют газу и твёрдой фазе), c_{vg} — удельная теплоёмкость газа при постоянном объёме, c_s — удельная теплоёмкость частиц; p_g — давление газовой фазы; R — газовая постоянная; σ_{s*}, ξ_{s*} — продольные компоненты тензоров приведённых напряжений и деформации твёрдой фазы пористой среды; E_{f*}, E_{e*} — динамический и статический модули упругости; D_{f*}, D_{e*} — продольные динамическая и статическая скорости звука в порошкообразной среде; F_μ, F_m — силы вязкого межфазного трения и «присоединённых масс», Q — интенсивность передачи тепла от газовой фазы к дисперсной в единице объёма смеси; t_{s0} — время релаксации напряжения в скелете порошкообразной среды при его вязкоупругом деформировании.

Составляющие силы межфазного взаимодействия задаются в виде [4, 16]

$$F_\mu = \frac{3}{4} \frac{\alpha_g \alpha_s}{d} C_d \rho_g^0 |v_g - v_s| (v_g - v_s), \quad F_m = \frac{\alpha_g \alpha_s}{2} C_m \rho_g^0 \left(\frac{dv_g}{dt} - \frac{dv_s}{dt} \right), \quad (10)$$

где d — диаметр частиц порошкообразной среды; C_d — коэффициент трения; C_m — коэффициент при силе «присоединённых масс», равный единице для зернистых сред с твёрдыми сферическими частицами [4]. Коэффициент трения сферических частиц в насыпных средах описывается на основе эмпирической формулы Эргана [4]

$$C_d = \frac{4}{3\alpha_g} \left(\frac{150(1 - \alpha_g)}{\alpha_g \text{Re}} + 1.75 \right), \quad \alpha_g \leq 0.55;$$

$$\text{Re} = \frac{(\rho_g^0 |v_g - v_s| d)}{\mu_g}, \quad \mu_g = \text{const}.$$

где Re — число Рейнольдса относительного движения фаз, μ_g — вязкость газовой фазы.

Интенсивность теплообмена фаз описывается зависимостью [4]

$$Q = \frac{6\alpha_s \lambda_g \text{Nu} (T_g - T_s)}{d^2}, \quad \lambda_g = \text{const},$$

где Nu — число Нуссельта, λ_g — теплопроводность газа. Число Нуссельта определяется следующей зависимостью [17]

$$\text{Nu} = \begin{cases} 2 + 0.106 \text{Re} \text{Pr}^{1/3}, & \text{Re} \leq 200, \\ 2.274 + 0.6 \text{Re}^{2/3} \text{Pr}^{1/3}, & \text{Re} > 200, \end{cases}$$

$$\text{Pr} = c_{pg} \mu_g / \lambda_g, \quad c_{pg} = \gamma c_{vg}, \quad \gamma = \text{const}.$$

Здесь γ и c_{pg} — показатель адиабаты и удельная теплоёмкость газа при постоянном давлении, Pr — число Прандтля газа.

2. НАЧАЛЬНЫЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

В момент времени $t = 0$ в камере высокого давления (КВД) ударной трубы (рис. 1) в области $(0 \leq x \leq L_h)$ содержится воздух при повышенном давлении. Ниже, в области $L_h < x < L_s$, находится камера низкого давления (КНД), заполненная воздухом при атмосферном

давлении. В секции насыпной среды (СНС) при $L_s \leq x < L_w$ находится слой песка, в порах которой также присутствует воздух. Тогда примем следующие начальные условия:

$$\begin{aligned} p &= p_{g1}, \quad \rho_g^0 = \rho_{g1}^0, \quad T_g = T_0, \quad v_g = 0, \quad \alpha_g = 1, \quad \alpha_s = 0, \quad (0 < x < L_h), \\ p &= p_0, \quad \rho_g^0 = \rho_{g0}^0, \quad T_g = T_0, \quad v_g = 0, \quad \alpha_g = 1, \quad \alpha_s = 0, \quad (L_h < x < L_s), \\ p_g &= p_0, \quad \rho_g^0 = \rho_{g0}^0, \quad T_g = T_0, \quad \alpha_g = \alpha_{g0}, \\ v_s &= 0, \quad \sigma_{s*} = 0, \quad \xi_{s*} = 0, \quad e_{s*} = 0, \quad \alpha_s = \alpha_{s0} = 1 - \alpha_{g0}, \quad (L_h < x < L_w) \end{aligned} \quad (11)$$

Нижний индекс «0» соответствует невозмущённым параметрам системы. Будем полагать, что поверхность песчаной насыпки экранирована невесомой мембраной незначительной толщины, которая препятствует фильтрации газа, тогда граничные условия при ($x = L_s$) запишутся в виде [18]:

$$\begin{aligned} p_g|_{x=L_s+0} - p_0 &= \alpha_g(p_g|_{x=L_s-0} - p_0), \\ \sigma_{s*}|_{x=L_s+0} &= \alpha_g p_g|_{x=L_s-0}, \\ (v_s - v_g)|_{x=L_s+0} &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

На торцах трубы заданы следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} v_g &= 0, \quad (x = 0), \\ v_s &= 0. \quad (x = L_w). \end{aligned} \quad (13)$$

3. МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для численного решения системы уравнений (1)–(13) введена равномерная пространственная сетка размерности N с границами в точках, $i = \overline{0, N}$. Скорости газа и скелета заданы на границах ячеек в точках x^i , а все остальные параметры — в центре ячеек в точках $x_i = x^i - h/2$, где h — шаг по координате. Использована неявная схема, основанная на методе контрольного объёма [19, 20]. Уравнения (1)–(7) аппроксимируются с первым порядком точности по времени и вторым по пространству, которые решаются итерационной процедурой в каждом шаге по времени. Шаг по времени подчиняется следующему условию:

$$\tau \leq \frac{h}{\max(D_f, C_g)},$$

где C_g — скорость звука в воздухе.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РАСЧЁТОВ

В результате распада разрыва в КНД формируется ударно-волновой импульс амплитудой около 13 кПа и протяжённостью 1.3 м (см. рис. 2(а), $t = 1.0$ мс), протяжённость импульса по времени составляет приблизительно 4 мс. В область КВД распространяется волна разрежения. Скорость газа за УВИ составляет около 31 м/с (см. рис. 2(б)).

Параметры расчёта: $p_0 = 0.101$ МПа, $T_0 = 300$ К, $\gamma = 1.4$, $R = 287$ Дж/(кг·К), $c_{vg} = 720$ м²/(с²·К), $\mu_g = 1.81 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), $\lambda_g = 0.0258$ кг·м/(с²·К), $\alpha_g = 0.39$, $\rho_s^0 = 2700$ кг/м³, $c_s = 560$ м²/(с²·К), $D_{f*} = 200$ м/с, $D_{e*} = 0$ м/с, $t_{s0} = 4 \cdot 10^{-5}$, $d = 1$ мм, $\Delta p_0 = 28$ кПа/

После достижения УВИ границы «газ–экранированная насыпная среда» ($x = L_s$) формируется нестационарная отражённая ударная волна в «чистом» газе. В насыпной среде образуется волна напряжения. Возникновение ударной волны в «чистом» газе обусловлена волнами сжатия, образующимися в результате торможения набегающего потока на границе экранированной насыпной среды. Распространяясь в сторону, противоположную движению падающей

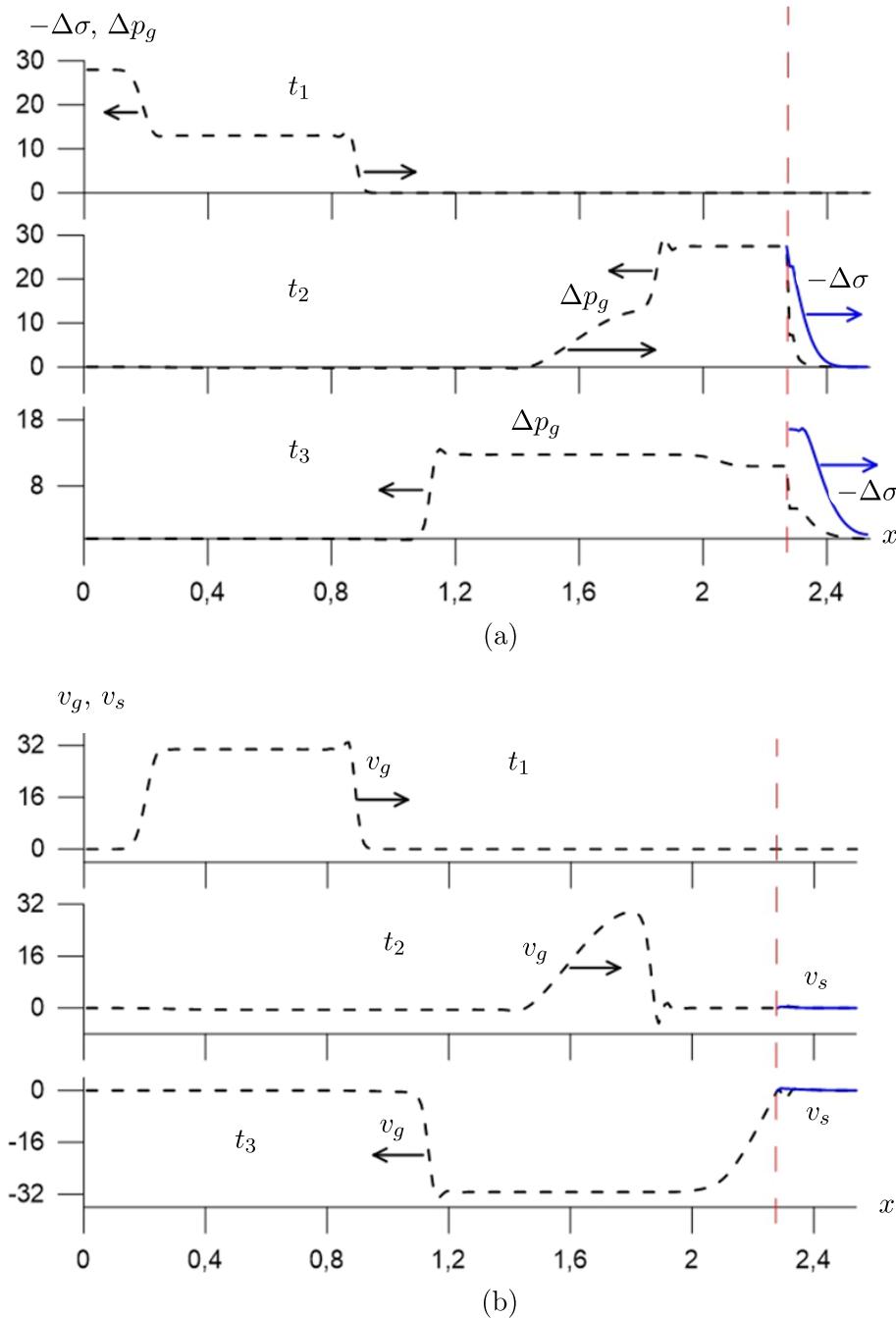


Рис. 2. Расчёты профилей полного напряжения ($-\Delta\sigma = -\sigma_* + \Delta p_g$, сплошные линии) и давления в газе ($\Delta p_g = p_g - p_0$, пунктирные линии) при взаимодействии УВИ с экранированной насыпкой для моментов времени $t_1 = 1.0$ мс, $t_2 = 6.0$ мс, $t_3 = 8.0$ мс (а); профили скоростей газа v_g и скелета v_s в те же моменты времени (б)

волны, система догоняющих друг друга волн сжатия постепенно порождает отражённую ударную волну в газе. Давление газа за отражённой ударной волной стремится к давлению отражения от жёсткой неподвижной стенки и достигает значения 27 кПа ($t = 6.0$ мс). Отражённая волна в момент времени 8.0 мс имеет амплитуду 13 кПа, скорость газа за отражённым УВИ составляет около 31 м/с. Экранирование пористой среды на границе исключает фильтрацию газа, но тем не менее, воздействие УВИ на экранированную насыпку приводит к инициированию в ней «быстрой» и «медленной» волн (рис. 2, $t = 6.0$ и 8.0 мс). Амплитуда «быстрой»

волны в момент $t = 8.0$ мс достигает значения 17 кПа, а «медленной» — 5 кПа, при этом скорости скелета и газа ничтожно маленькие.

Для сравнения динамики взаимодействия УВИ с экранированной насыпной средой и без экранирования на рис. 3 приведены распределения полного напряжения и давления в газе (а), скорости газа и скелета (б) для «открытой» насыпки для моментов 6.0 и 8.0 мс, для момента 1.0 мс профили такие же, как на рис. 1.

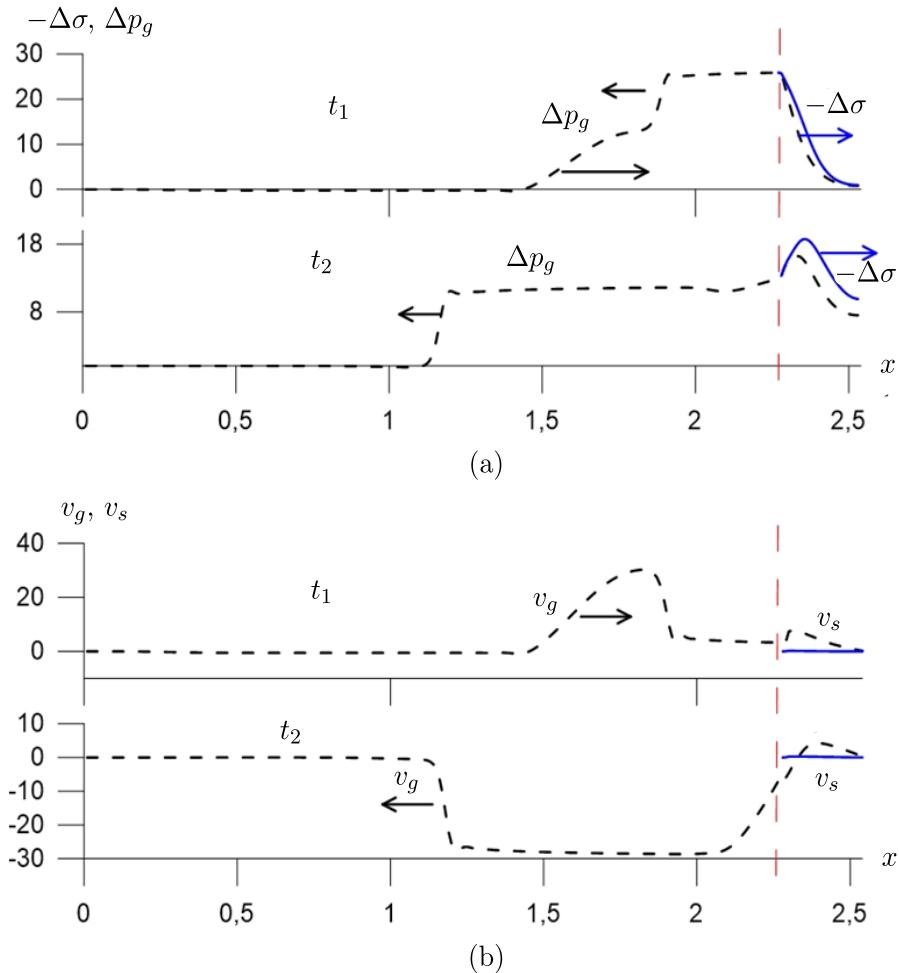


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, но насыпная среда «открыта» (не экранирована), параметры расчёта такие же как для рис. 2

Для «открытой» насыпной среды, в отличие от экранированной, амплитуды и скорости «быстрой» и «медленной» волн для момента $t = 6.0$ мс практически одинаковы (см. рис. 3(а)), скорость газа в СНС достигает значения 8.3 м/с, скорость скелета — 0.2 м/с.

Сопоставление экспериментальных (а) и расчётных (б) «осциллограмм» для экранированной насыпки приведены рис. 4.

В экспериментах секция насыпной среды послойно заполнялась песком, с сильной утруской и умеренной трамбовкой, пористость уплотнённого таким образом песка составила 39,2%.

Средний размер песчинок 0.5 мм. Нагнетание воздуха в КВД при некотором давлении приводит к разрыву диафрагмы из кальки. Отметим, что давление разрыва в экспериментах является нерегулируемым параметром, поэтому амплитуда начального давления в КВД в экспериментах и расчётах для случая экранированной насыпки — 28 кПа, для «открытой» — 32 кПа.

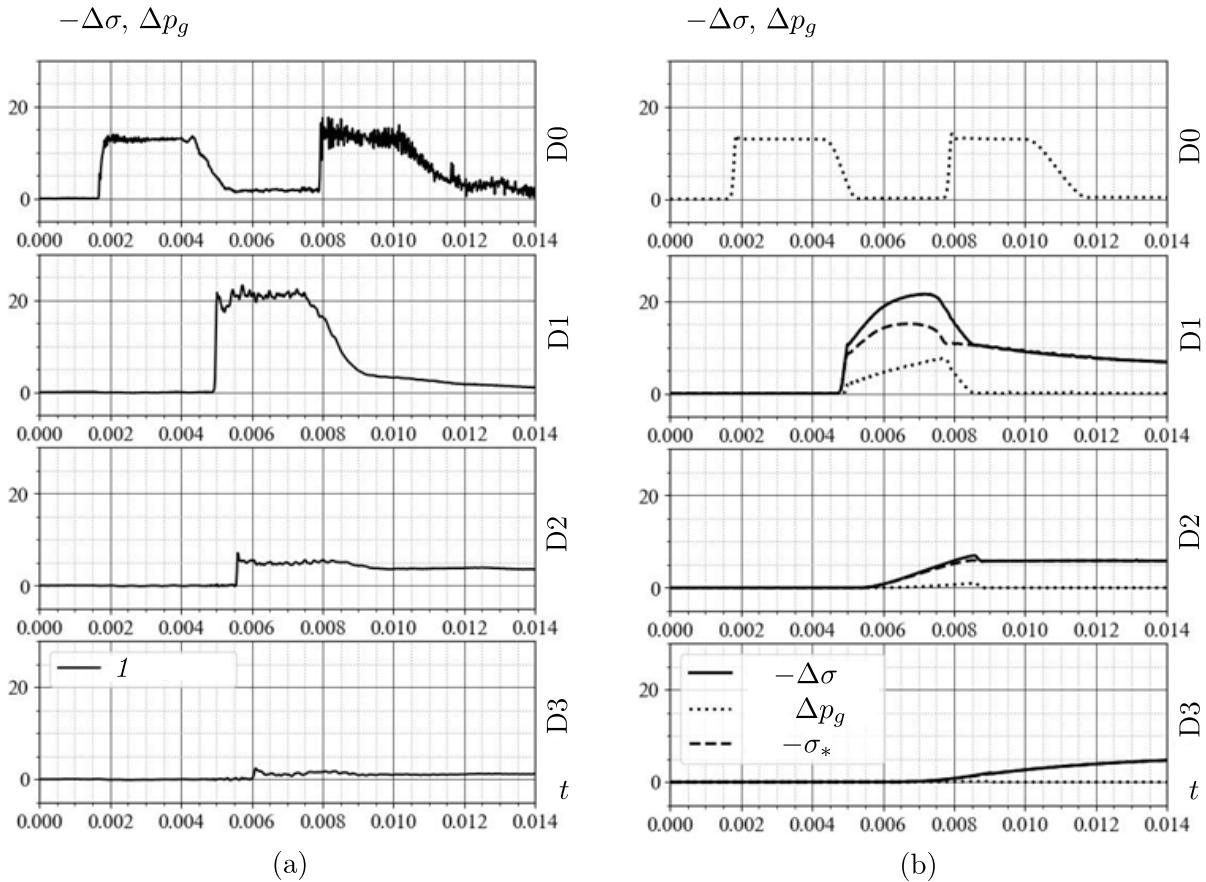


Рис. 4. Экспериментальные (а, 1) и расчётные (б) «осциллограммы» полного напряжения, давления в газе и приведённого напряжения (сплошные, пунктирные и штриховые линии соответственно) по данным датчиков D0–D1 (см. рис. 1) для случая экранирования насыпной среды. Параметры расчёта такие же, как для рис. 2

Для экранирования песчаной насыпки использовали алюминиевую фольгу, предотвращающую фильтрацию воздуха в песчаную насыпную среду. После разрыва диафрагмы в КНД формируется ударно-волновой импульс. Профиль давления сформировавшегося импульса амплитудой 12 кПа регистрируется датчиком D0 (см. рис. 4(а)). Амплитуда ударной волны однозначно связана с давлением разрыва диафрагмы. Сформировавшийся импульс распространяется по трубе, при взаимодействии с поверхностью песка амплитуда импульса удваивается и в насыпную среду проникает импульс удвоенной амплитудой, рис. 3(а) (датчик D1), причём над датчиком D1 расположена слой песка толщиной 22 мм, амплитуда УВИ уменьшается на 15%.

Известно [4, m18], что полное напряжение в пористой среде, регистрируемое пьезоэлектрическими датчиками, складывается из приведённого напряжения в скелете и давления в насыщающем поровое пространство флюиде. На рис. 4(б) показаны расчётные осциллограммы давления Δp_g , приведённого напряжения в скелете $-\sigma_*$ и полного напряжения $-\Delta\sigma = -\sigma_* + \Delta p_g$.

Из сравнительного анализа экспериментальных и расчётных осциллограмм, следует, что есть хорошее согласие по амплитудам волн, соответствующих датчикам D0–D2 (см. рис. 4). Необходимо отметить, что основной вклад в полное напряжение на всех осциллограммах (D1–D3) вносит приведённое напряжение, вклад давления газа мал. Фронт УВИ для расчётных осциллограмм на всех датчиках более пологий по сравнению с экспериментальными. Расхождение формы импульсов, а именно переднего фронта, в песке может быть связано с неоднородной утрамбовкой песка или неоднородностью по размерам.

Для датчика D3, амплитуда осциллограммы, полученной в эксперименте приблизительно 2 кПа и импульс постепенно затухает, а амплитуда расчётных осциллограмм постепенно повышается до 5 кПа.

Расчётные осциллограммы скорости газа v_g для датчиков D0–D3 и скорости скелета v_s для датчиков D1–D3 для случая экранированной песчаной насыпки приведены на рис. 5.

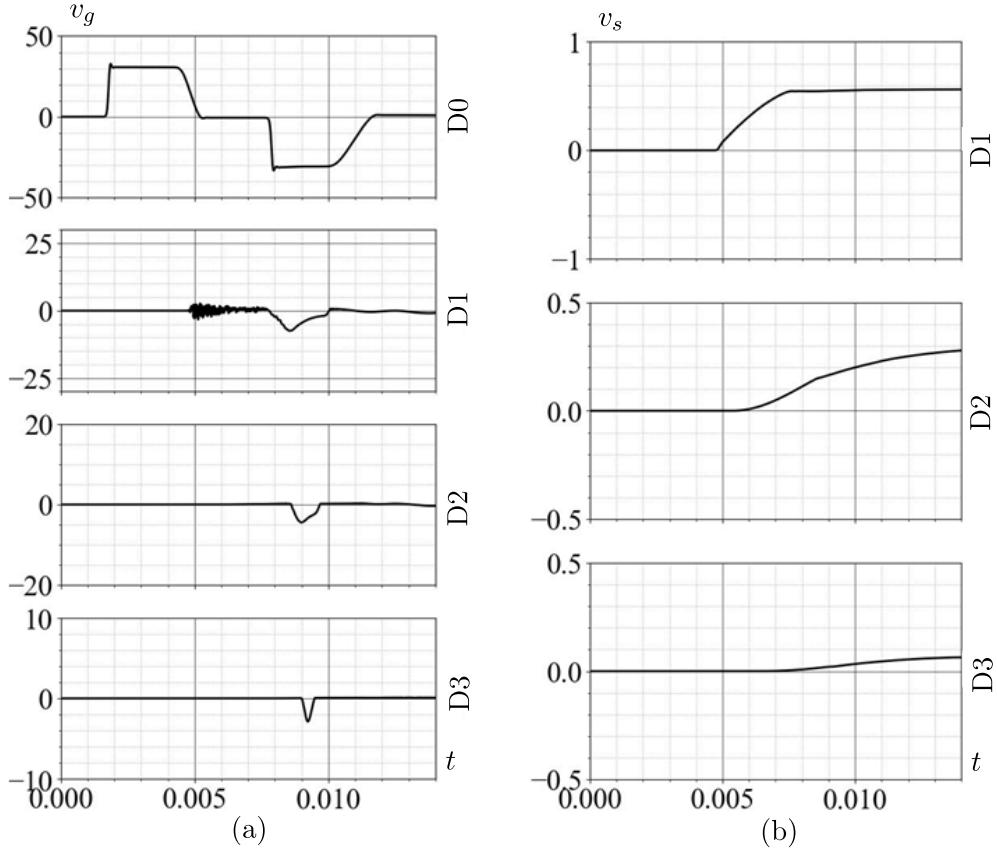


Рис. 5. Осциллограммы скоростей газа (а) и скелета (б)

Скорость газа v_g за падающим и отражённым УВИ, «регистрируемое» датчиком D0 около 31 м/с (рис. 5, D0). Интересным является то, что значения скоростей газа на датчиках D1–D3 (рис. 5) являются отрицательными. Это происходит из-за того, что под действием ударного импульса происходит сжатие насыпной среды, далее происходит его растяжение, так как нет фильтрации на границе растяжение приводит к появления движения газа с отрицательной скоростью.

Скорость скелета v_s на всех трёх датчиках D1–D3 плавно увеличивается: на датчике D1 достигает значения 0.6 м/с, на D2 – 0.3 м/с, D3 – 0.07 м/с.

На рис. 6 представлено сопоставление экспериментальных (а) и расчётных (б) осциллограмм для «открытой» песчаной насыпной среды.

Из сравнительного анализа рис. 4 и 6 следует, что для экранированной насыпки амплитуда импульса, проходящего 22 мм снижается на 15% по сравнению с насыпкой с открытой поверхностью, кроме этого, есть существенная разница в показании датчика D2, например, амплитуда импульса на этом датчике для экранированной насыпки приблизительно равна 5 кПа, а для «открытой» в три раза больше – 15 кПа (см. рис. 4(а) и 6(а) датчик D2). На уровне датчика D3 в экспериментах независимо «открытая» насыпка или экранированная импульс практически полностью затухает – амплитуда импульса около 2 кПа. Амплитуда импульса расчётной осциллограммы полного напряжения на датчике D3, в случае «открытой» насып-

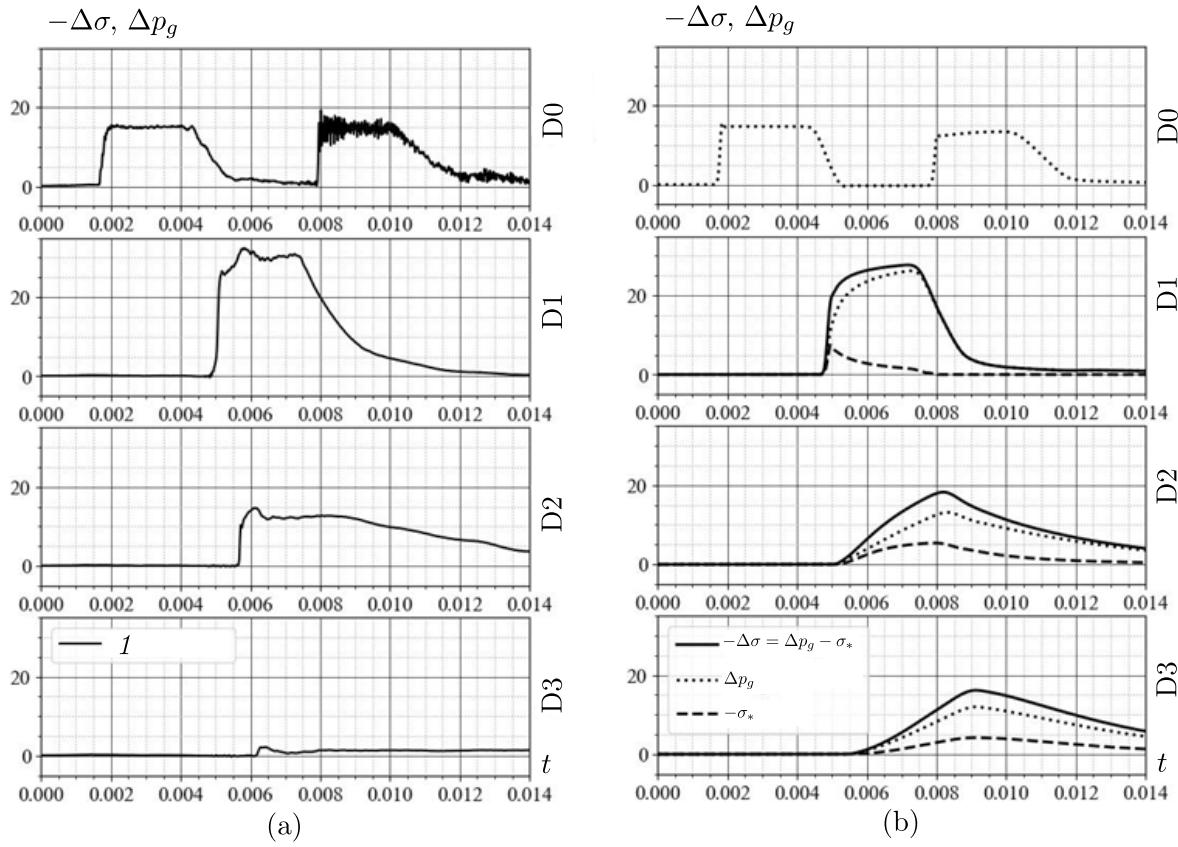


Рис. 6. То же, что и на рис. 4, но для «открытой» насыпки, $\Delta p_0 = 32$ кПа, остальные параметры расчёта такие же как для рис. 2

ки, почти в три раза превышает амплитуду импульса, полученного в эксперименте (рис. 6(b)), датчик D3), что, вероятно, связано с неоднородностью утрамбовки песка при экспериментах.

Из расчётных осциллограмм (рис. 6(b)) следует, что в случае «открытой» песчаной насыпки давление в газе играет основную роль в формировании полного напряжения по сравнению с приведённым напряжением, а в случае экранированной насыпки, наоборот, приведённое напряжение вносит основной вклад в полное напряжение (рис. 4(b)).

Скорость газа за УВИ в случае «открытой» насыпки для датчика D0 по форме идентична скорости в случае экранированной насыпки. Из-за фильтрации газа на границе $x = L_s$, для случая «открытой» насыпки скорость газа за падающим импульсом для датчиков D1-D3 больше нуля (рис. 7(a)) в отличие от скорости газа в случае экранированной насыпки (рис. 4(a)).

Максимальные значения скоростей газа на датчиках D1, D2, D3 равны 15.0, 5.0, 3.0 м/с соответственно. Профили скорости скелета v_s для «открытой» насыпки имеют вид импульса в отличии от профилей скорости для экранированной среды (рис. 5, рис. 7(b)). Максимальное значение скоростей скелета 0.4, 0.21, 0.05 м/с соответственно на уровне датчиков D1, D2 и D3.

Для того, чтобы иметь представление об упругости насыпной среды, проведены измерения скоростей распространения ударно-волновых импульсов по эпюрам давления. Были измерены значения скоростей УВИ во всем слое песка — V (между датчиками D1 и D3), в верхнем слое — V_1 (D1 и D2) и нижнем — V_2 (D2 и D3) для случаев «открытой» и экранированной мембранный из фольги, рис. 8.

Относительная погрешность измерения скорости в экспериментах была незначительна, поскольку измерения расстояния и времени производятся с большой точностью. Но прямые измерения времени прохождения импульсов связаны с определением точки начала нарастания распространяющегося импульса, большие погрешности возникают при плавном нарастании

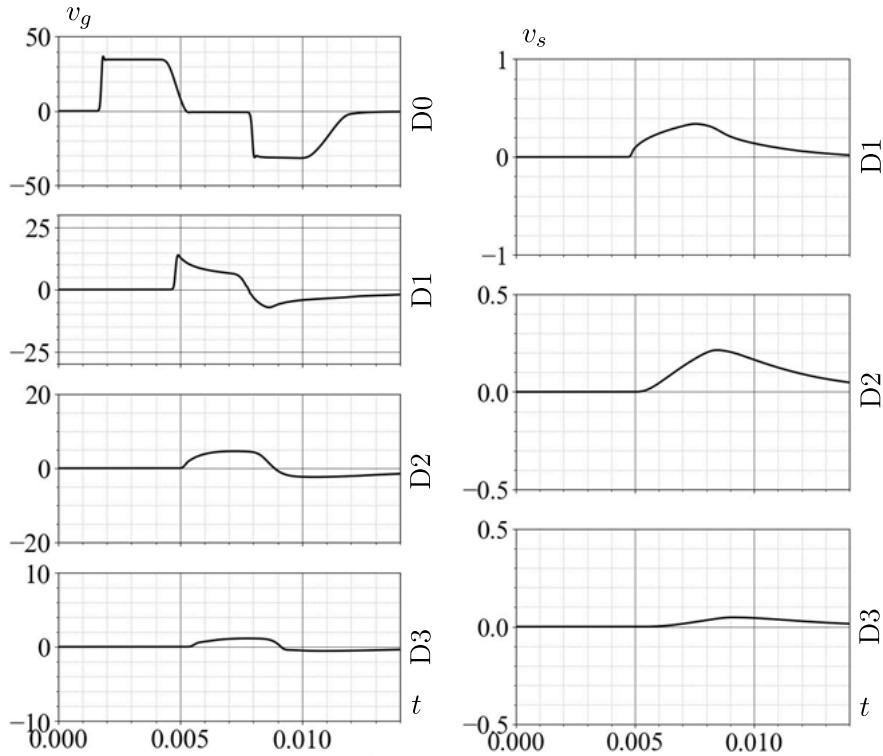


Рис. 7. То же, что и на рис. 5, но для «открытой» насыпки.

Параметры расчёта как для рис. 6

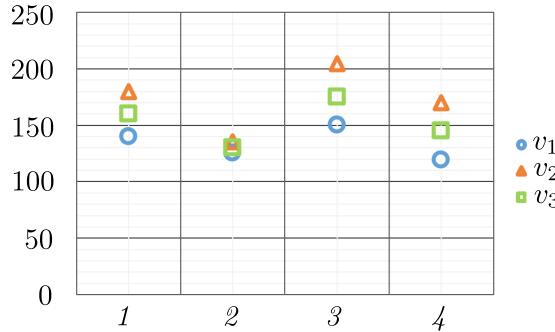


Рис. 8. Значения экспериментальных и расчётных значений скоростей ударно-волновых импульсов в насыпной среде из песка; V_1 — средняя скорость между датчиками D1–D3,

V_2 и V_3 — соответственно между D1–D2 и D1–D3;

1 — открытая, эксперимент; 2 — открытая, расчёт;

3 — фольга, эксперимент; 4 — фольга, расчёт

давления. Поэтому при усреднении трёх измерений возникают заметные отклонения, тем не менее, среднеквадратичное отклонение не превышает 10 м/с. В нижней части насыпной среды скорости больше, по сравнению с их значениями в верхней части. Это свидетельствует о том, что в нижней части СНС плотность песка выше, так как при утруске нижний слой уплотняется больше, поскольку сверху просыпаются мелкие песчинки, что приводит к увеличению упругости нижнего слоя.

Экранирование фольгой значительно увеличивает скорость, хотя волна распространяется только по скелету пористой среды. В верхнем слое скорость увеличивается сильнее, чем в нижнем, и это приводит к уменьшению разницы между скоростями в верхней и нижней слоях при наличии фольги. Значение скорости импульса при экранировании фольгой больше,

чем для «открытой» насыпки, что, скорее всего, связано с компактированием скелета песчаной насыпки в отсутствии амортизирующей роли воздуха.

Авторы благодарят А. Т. Ахметова, зав. лаб. «Экспериментальная гидродинамика» института механики им. Р. Р. Мавлютова УФИЦ РАН, за полезные обсуждения результатов экспериментов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнительный анализ эпзор давления УВИ, проходящих в «открытую» и экранированную песчаную насыпку, позволяет сделать следующие выводы:

В песчаной насыпной среде наличие экранирующей фольги практически не сказывается на форме распространяющегося в ней УВИ, но его амплитуда меньше по сравнению с амплитудой УВИ для насыпки с «открытой» поверхностью, что обусловлено исключением потока газа в песчаную насыпку.

Значение скорости импульса при экранировании фольгой больше, чем для «открытой» насыпки, что связано с компактированием скелета песчаной насыпки в отсутствии амортизирующей роли воздуха.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 24-11-00274, <https://rscf.ru/project/24-11-00274/>). Других источников финансирования проведения или руководства данным конкретным исследованием не было.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балапанов Д.М., Урманчеев С.Ф. Роль межфазных взаимодействий при газовой детонации в инертной пористой среде // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, № 13. С. 71–80.
2. Уткин П.С., Чупров П.А. Численное моделирование распространения зондирующих импульсов в плотной засыпке гранулированной среды // Компьютерные исследования и моделирование, 2024. Т. 16, № 6, С. 1361–1384
3. Мирова О.А., Баженова Т.В., Голуб В.В. Влияние экрана из гранулированного материала на многократное отражение плоской ударной волны внутри замкнутого объёма // Теплофизика высоких температур. 2020. Т. 58, № 1. С. 144–147; DOI: 10.31857/S0040364420010135
4. Болдырева О.Ю., Губайдуллин А.А., Дудко Д.Н., Кутушев А.Г. Численное исследование передачи ударно-волновой нагрузки экранируемой плоской стенке через слой порошкообразной среды и разделяющий их воздушный зазор // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 1. С. 132–142. - EDN OIHGZJ.
5. Дучков А.Д., Дучков А.А., Дугаров Г.А., Дробчик А.Н. Скорости ультразвуковых волн в песчаных образцах, содержащих воду, лёд или гидраты метана и тетрагидрофурана (лабораторные измерения) // Доклады АН. 2018. Т. 478, № 1. С. 94–99.
6. Мейрманов А.М. Метод двухмасштабной сходимости Нгуэтсэнга в задачах фильтрации и сейсмоакустики в упругих пористых средах // Сиб. мат. журн. 2007. Т. 48, № 3. С. 645–667.
7. Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н., Фролов С.М. Передача ударно-волновой нагрузки насыпным средам // Прикл. механика и техн. физика. 1988. № 2. С. 115–121.
8. Донцов В.Е., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Распространение волн давления в газонасыщенной пористой среде // Акустический журн. 1994. Т. 40, № 4. С. 683–685.

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 Журн. техн. физики. 2022. Т. 48, № 1. С. 23–26.
10. Ахметов А.Т., Гималтдинов И.К., Мухаметзянов А.Ф., Гизатуллин Р.Ф. Эффект усиления ударных волн в насыпных средах // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. 2024. Т. 519, № 1. С. 41–46; DOI: 10.31857/S2686740024060076
11. Ахметов А. Т., Гималтдинов И. К., Мухаметзянов А. Ф. Выявление условий формирования пиков давления в зондирующем импульсе // Инженерно-физ. журн. 2025. Т. 98, № 1. С. 190–196.
12. Padmanabha Vivek, Thallak G. Sitharam Laboratory scale investigation of stress wave propagation and vibrational characteristics in sand when subjected to air-blast loading // Inter. J. Impact Engrg. 2018. V 114. P. 169–181.
13. Булович С.В., Масюкевич А.В. Экспериментальное исследование взаимодействия ударной волны со слоем проницаемого материала // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2019. Т. 12. № 4. С. 135–144.
14. Britan A. Ben-Dor G. Elperin T. Igra O. Jiang J. Mechanism of compressive stress formation during weak shock waves impact with granular materials // Experiments in Fluids. 1997. N 22. P. 507–518; 10.1007/s003480050078.
15. Vivek P., Sitharam T.G. Shock Wave Attenuation by Geotextile Encapsulated Sand Barrier Systems // Geotextiles and Geomembranes. 2017. V. 45. P. 149.
16. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.:Наука, 1987.
17. Чудновский А.Ф. Теплообмен в дисперсных средах. М.: Гостехиздат, 1954.
18. Губайдуллин А.А., Болдырева О.Ю., Дудко Д.Н. Взаимодействие акустических волн с пористым слоем // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16, № 3. С. 455–470.
19. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энерготомиздат, 1984.
20. Ильясов А.М., Моисеев К.В., Урманчеев С.Ф. Численное моделирование термоконвекции жидкости с квадратичной зависимостью вязкости от температуры // Сиб. журн. индустр. математики. 2005. Т. 8, № 4. С. 51–59.

UDC 534-18

THE INFLUENCE OF BULK MEDIUM SHIELDING ON THE DYNAMICS OF A SHOCK WAVE IMPULSE

© 2025 I. K. Gimaltdinov^a, A. S. Rodionov^b, R. F. Gizatullin^c,
E. Yu. Kochanova^d

*Ufa State Petroleum Technological University,
ul. Kosmonavtov, 1, Ufa 450064, Russia*

E-mails: ^ailjas_g@mail.ru, ^bartrodionov@mail.ru, ^cgiz-renat@yandex.ru,
^dmoto8728@mail.ru

Received 28.06.2025, revised 16.07.2025, accepted 17.09.2025

Abstract. The effect of shielding on the dynamics of the shock-wave pulse propagation in a sandy bulk medium is studied. It is shown that shielding of the bulk medium leads to a stronger decrease in the pulse amplitude compared to «open» fill. A comparison with experimental data is given.

Keywords: shock tube, shielding, fracture decay, granular medium, control volume method, numerical calculations, modeling.

DOI: 10.33048/SIBJIM.2025.28.303

REFERENCES

1. Balapanov D.M., Urmancheev S.F. Rol' mezhfaznykh vzaimodeistvii pri gazovoi detonatsii v inertnoi poristoi srede [The role of interphase interactions in gas detonation in an inert porous medium]. *Pis'ma v Zhurn. Tech. Fiziki* [Lett. J. Tech. Phys.], 2010, Vol. 36, No. 13, pp. 71–80 (in Russian).
2. Utkin P.S., Chuprov P.A. Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zondiruyushchikh impul'sov v plotnoi zasypke granulirovannoi sredy [Numerical modeling of the propagation of sounding pulses in a dense packing of a granular medium]. *Komp'yuternye Issledovaniya i Modelirovanie* [Comput. Research and Modeling], 2024, Vol. 16, No. 6, pp. 1361–1384 (in Russian).
3. Mirova O.A., Bazhenova T.V., Golub V.V. Vliyanie ekrana iz granulirovannogo materiala na mnogokratnoe otrazhenie ploskoi udarnoi volny vnutri zamknutogo ob'ema [Influence of a screen made of granular material on the multiple reflection of a plane shock wave inside a closed volume]. *Teplofiz. Vysokikh Temperatur* [Thermophys. High Temperatures.], 2020, Vol. 58, No. 1, pp. 144–147 (in Russian). - DOI 10.31857/S0040364420010135. - EDN EJMNKJ.
4. Boldyreva O.Yu., Gubaidullin A.A., Dudko D.N., Kutushev A.G. Chislennoe issledovanie peredachi udarno-volnovoi nagruzki ekraniruemoi ploskoi stenke cherez sloi poroshkoobraznoi sredy i razdelyayushchii ikh vozдушnyi zazor [Numerical investigation of the shock-wave load transfer to a shielded flat wall through a layer of powdered medium and the air gap separating them]. *Fizika Gorenija i Vzryva* [Phys. Gorenje Explosion], 2007, Vol. 43, No. 1, pp. 132–142 (in Russian). - EDN OIHGZJ.
5. Duchkov A.D., Duchkov A.A., Dugarov G.A., Drobchik A.N. Skorosti ul'trazvukovykh voln v peschanykh obraztsakh, soderzhashchikh vodu, led ili gidratty metana i tetragidrofuranu (laboratornye izmereniya) [Velocities of ultrasonic waves in sand samples containing water, ice, or hydrates of methane and tetrahydrofuran (laboratory measurements)]. *DAN*, 2018, Vol. 478, No. 1, pp. 94–99 (in Russian).

6. Meirmanov A.M. Metod dvukhmasshtabnoi skhodimosti Nguetsenga v zadachakh fil'tratsii i seismoakustiki v uprugikh poristykh sredakh [Nguetseng's two-scale convergence method in problems of filtration and seismoacoustics in elastic porous media]. *Sib. Mat. Zhurn.*, 2007, Vol. 48, No. 3, pp. 645–667 (in Russian).
7. Gelfand B.E., Medvedev S.P., Polenov A.N., Frolov S.M. Peredacha udarno-volnovoi nagruzki nasypnym sredam [Transfer of shock-wave load to bulk media]. *Prikl. Mekh. Tekhn. Fiz.* [Appl. Mechanics Tech. Phys.], 1988, No. 2, pp. 115–121 (in Russian).
8. Dontsov V.E., Nakoryakov V.E., Pokusaev B.G. Rasprostranenie voln davleniya v gazonasyshchennoi poristoi srede [Propagation of pressure waves in a gas-saturated porous medium]. *Akusticheskii Zhurn.* [Acoustic J.], 1994, Vol. 40, No. 4, pp. 683–685 (in Russian).
9. Akhmetov A.T., Gimaltdinov I.K., Azamatov M.A., Mukhametzyanov A.F., Bogdanov D.R. Zondirovanie vodogazonasyshchenykh nasypnykh sred pereotrazhennymi volnami neposredstvenno posle vozdeistviya udarnoi volny [Probing of water-gas-saturated bulk media by re-reflected waves immediately after the impact of a shock wave]. *Pis'ma v Zhurn. Tekhn. Fiziki* [Lett. J. Tech. Physics.], 2022, Vol. 48, No. 1, pp. 23–26 (in Russian).
10. Akhmetov A.T., Gimaltdinov I.K., Mukhametzyanov A.F., Gizatullin R.F. Effekt usileniya udarnykh voln v nasypnykh sredakh [Effect of shock wave amplification in bulk media]. *Dokl. RAN. Fizika, Tekhn. Nauki*, 2024, Vol. 519, No. 1, pp. 41–46 (in Russian); DOI: 10.31857/S2686740024060076.
11. Akhmetov A.T., Gimaltdinov I.K., Mukhametzyanov A.F. Vyavlenie uslovii formirovaniya pikov davleniya v zondiruyushchem impul'se [Identifying the conditions for the formation of pressure peaks in a sounding pulse]. *Inzhenerno-Fiz. Zhurn.* [Engrg. Phys. J.], 2025, Vol. 98, No. 1, pp. 190–196 (in Russian).
12. Padmanabha Vivek, Thallak G. Sitharam Laboratory scale investigation of stress wave propagation and vibrational characteristics in sand when subjected to air-blast loading. *Internat. J. Impact Engrg.*, 2018, Vol. 114, pp. 169–181.
13. Bulovich S.V., Masyukevich A.V. Eksperimental'noe issledovanie vzaimodeistviya udarnoi volny so sloem pronitsaemogo materiala [Experimental study of the interaction of a shock wave with a layer of permeable material]. *Nauchno-Tekhn. Vedomosti SPbGPU. Fiz.-mat. nauki* [Scientific Techn. Bull. SPbGPU. Phys. Math. Sci.], 2019, Vol. 12, No. 4, pp. 135–144 (in Russian).
14. Britan A. Ben-Dor G. Elperin T. Igra O. Jiang J. Mechanism of compressive stress formation during weak shock waves impact with granular materials. *Experiments in Fluids*, 1997, Vol. 22, pp. 507–518; DOI: 10.1007/s003480050078.
15. Vivek P., Sitharam T.G. Shock Wave Attenuation by Geotextile Encapsulated Sand Barrier Systems. *Geotextiles and Geomembranes*, 2017, Vol. 45, p. 149.
16. Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznykh sred. [Dynamics of multiphase media]. Moscow: Nauka, 1987 (in Russian).
17. Chudnovskii A.F. Teploobmen v dispersnykh sredakh [Heat transfer in disperse media]. Moscow: Gostekhizdat, 1954 (in Russian).
18. Gubaidullin A.A., Boldyreva O.Yu., Dudko D.N. Vzaimodeistvie akusticheskikh voln s poristym sloem [Interaction of acoustic waves with a porous layer]. *Teplofiz. Aeromekhanika*, 2009, Vol. 16, No. 3, pp. 455–470 (in Russian).
19. Patankar S. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. Washington: Hemisphere Publ. Corp., 1980
20. Iljasov A.M., Moiseev K.V., Urmacheev S.F. Chislennoe modelirovaniye termokonvektsii zhidkosti s kvadratichnoi zavisimost'yu vyazkosti ot temperatury [Numerical modeling of thermoconvection of a fluid with a quadratic dependence of viscosity on temperature]. *Sib. Zhurn. Indust. Mat.*, 2005, Vol. 8, No. 4(24), pp. 51–59 (in Russian).