



УДК 539.3

Численное исследование взаимодействия ударной волны с проницаемым деформируемым гранулированным слоем

И. А. Модин, А. В. Кочетков, Е. Г. Глазова

Научно-исследовательский институт механики
Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского,
Россия, 603022, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 6.

Аннотация

Получены решения задач воздействия плоских ударных волн на деформируемый гранулированный слой. Исследуется трансформация волн при прохождении через упругопластический гранулированный слой с учетом и без учета изменения проницаемости слоя вследствие его деформации. При решении задач используется зависимость изменения проницаемости слоя от его сжатия, которая получена численно при моделировании сжатия симметричных фрагментов гранулированных слоев в пространственной постановке. Представлена математическая модель, описывающая в одномерном приближении взаимосвязанные процессы нестационарного деформирования плоских проницаемых гранулированных слоев, состоящих из шаровых частиц, и волновых процессов в поровом и окружающем газе. В основе модели лежат нелинейные уравнения динамики двух взаимопроникающих континуумов. В качестве межфазных сил учитываются силы сопротивления при обтекании газом шаровых частиц и силы трения Стокса. Численное решение уравнений проводится по модифицированной схеме С. К. Годунова, адаптированной к задачам динамики взаимопроникающих сред. Поверхности контакта чистого газа с пористым гранулированным слоем и поровым газом являются поверхностью разрыва пористости и проницаемости, на которых выполняются законы сохранения как на скачке пористости. Численная

Научная статья

© Коллектив авторов, 2022

© СамГТУ, 2022 (составление, дизайн, макет)

 Контент публикуется на условиях лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>)

Образец для цитирования

Модин И. А., Кочетков А. В., Глазова Е. Г. Численное исследование взаимодействия ударной волны с проницаемым деформируемым гранулированным слоем // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2022. Т. 26, № 1. С. 79–92. EDN: [FUXBZE](https://doi.org/10.14498/vsgtu1879). <https://doi.org/10.14498/vsgtu1879>.

Сведения об авторах

Иван Александрович Модин  <https://orcid.org/0000-0002-3561-4606>

кандидат технических наук; научный сотрудник; лаб. моделирования физико-механических процессов; e-mail: mianet@mail.ru

Анатолий Васильевич Кочетков  <https://orcid.org/0000-0001-7939-8207>

доктор физико-математических наук; профессор; каф. теоретической, компьютерной и экспериментальной механики; e-mail: kochetkov@mech.unn.ru

Елена Геннадьевна Глазова  <https://orcid.org/0000-0003-4351-889X>

кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник; лаб. динамики многокомпонентных сред; e-mail: glazova@mech.unn.ru

реализация контактных условий производится на основе решения задачи распада разрыва на скачке пористости. Численные исследования процессов нелинейного взаимодействия ударных волн с деформируемыми проницаемыми гранулированными слоями показали, что параметры проходящих и отраженных волн существенно зависят от степени обжатия гранулированных слоев. Поэтому оценку защитных свойств проницаемых преград при воздействии сильных ударных волн следует проводить с учетом изменения их проницаемости вследствие деформирования слоев.

Ключевые слова: ударная волна, гранулированный слой, проницаемость, взаимопроникающие континуумы, упругопластическое деформирование, схема Годунова.

Получение: 25 августа 2021 г. / Исправление: 26 декабря 2021 г. /

Принятие: 24 января 2022 г. / Публикация онлайн: 31 марта 2022 г.

Введение. Перспективным элементом, защищающим конструкции от импульсных воздействий, являются насыпные слои [1–3]. В научной литературе существует ряд работ, посвященных исследованию деформируемых пористых преград [4–22], где показано, что размещение слоя пористых насыпных слоев перед стенкой мишени уменьшает величины остаточного напряжения и энергии мишени и существенно снижает скорость приложенной нагрузки. Полученные результаты ограничиваются малыми нагрузками, которые не вызывают развитое пластическое течение или разрушение материала шариков [14, 15]. При этом предполагалось, что проницаемые элементы в процессе взаимодействия с ударными волнами испытывают малые деформации и их проницаемость не изменяется. В данной статье рассматривается процесс взаимодействия плоских ударных волн с деформируемыми упругопластическими гранулированными слоями, которые могут испытывать большие деформации, влияющие на их проницаемость.

1. Уравнения в одномерном приближении. Динамическое поведение гранулированного слоя с содержащимся поровым газом описывается на основе уравнений динамики двух взаимопроникающих континуумов, каждый из которых имеет свои скорости, напряжения (давления) и температуры. Одномерные уравнения динамики порового газа в форме законов сохранения массы, импульса и энергии имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_1 \rho_1^0)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta \rho_1^0 u_1)}{\partial t} &= 0, \quad \frac{\partial(\alpha_1 \rho_1^0 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\beta(p_1 + \rho_1^0 u_1^2))}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\alpha_1 \rho_1^0 \left(e_1 + \frac{u_1^2}{2} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \beta \left(\rho_1^0 u_1 \left(e_1 + \frac{u_1^2}{2} \right) + p_1 u_1 \right) \right\} &= 0, \\ p_1 &= (\gamma - 1) \rho_1^0 e_1, \quad T_1 = e_1 / c_{v1}(T_1). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь и далее нижний индекс 1 относится к газу; 2 — к твердой компоненте; t — время; x — координата; ρ_1^0 — истинная плотность газа; u — скорость; e — внутренняя энергия; c_{v1} — удельная теплоемкость; γ — показатель адиабаты газа; f , q — межфазные силы и тепловой поток, действующие на «элементарный узел» твердой компоненты со стороны порового газа; n — количество

таких узлов в единице объема смеси; α_i — объемные концентрации компонент; β — коэффициент проницаемости сечений. Коэффициент проницаемости принимается в виде отношения площади пор к общей площади элемента среды. Из системы (1) при $\alpha_1 = \beta = 1$ и $n = 0$ следуют уравнения газовой динамики для однородной среды.

Уравнения динамического деформирования гранулированного слоя в одномерном приближении как скелета двухфазной среды имеют вид [14, 23]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\rho_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_2 u_2) &= 0, \\ \frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_2 u_2^2) &= n f, \\ \frac{\partial \sigma}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \sigma}{\partial x} &= \frac{\partial f_n}{\partial \varepsilon} \frac{\partial u_2}{\partial x}.\end{aligned}\quad (2)$$

Здесь σ , ε — напряжение и деформация, ρ_2 — приведенная плотность гранулированного слоя ($\rho_2 = \alpha_2 \rho_2^0$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$). Закон связи между напряжением и деформацией имеет вид $\sigma = f_n(\varepsilon, \sigma^*)$. Параметры, отмеченные верхним индексом *, представляют собой максимальные значения, достигнутые частицей при нагружении в соответствующем направлении, они необходимы для описания разгрузки частиц среды, испытывающей необратимые деформации. Конкретный вид уравнения состояния определяется по результатам экспериментальных исследований сжатия гранулированных слоев. При взаимодействии твердого и газового компонентов в качестве межфазных сил учитываются: силы сопротивления частичек твердой фазы при их обтекании поровым газом; силы Стокса вязкого трения, а также конвективный теплообмен через межфазную поверхность [23]. Твердая фаза как скелет высокопористой среды может сильно сжиматься в процессе деформации, поэтому параметры α_1 , β будут зависеть от степени ее сжатия. Конкретный вид этих зависимостей определяется численными исследованиями деформирования фрагментов гранулированного слоя в трехмерной постановке [24].

Поверхности контакта чистого газа с пористым гранулированным слоем являются поверхностью разрыва пористости и проницаемости. Как показали исследования [25–27], на контактных границах «чистый газ» — «поровый газ» должны выполняться специальные условия, как на скачке пористости:

$$\begin{aligned}\rho_5^0 u_5 &= \beta \rho_4^0 u_4, \\ \rho_5^0 u_5^2 + \beta p_5 &= \beta(\rho_4^0 u_4^2 + p_4) \\ \rho_5^0 u_5 \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_5}{\rho_5^0} + \frac{u_5^2}{2} \right) &= \beta \rho_4^0 u_4 \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{p_4}{\rho_4^0} + \frac{u_4^2}{2} \right).\end{aligned}\quad (3)$$

Уравнения (3) отражают законы сохранения массы, импульса и энергии на скачке. Индекс 5 относится к параметрам со стороны «чистого газа», индекс 4 — к параметрам со стороны порового газа.

Построенная нелинейная математическая модель описывает процессы взаимодействия проницаемых деформируемых гранулированных слоев с ударными волнами. Модель учитывает изменение пористости среды и ее проницаемости от степени деформации гранулированного слоя. Численное решение уравнений (1), (2) производится с помощью схемы С. К. Годунова [28],

адаптированной к задачам динамики взаимопроникающих сред. Численная реализация контактных условий (3) производится на основе решения задачи распада разрыва на скачке пористости [25, 27].

2. Постановка задачи. Постановка задачи показана на рис. 1. Расчетная область включает в себя три подобласти: воздух, гранулированный слой, воздух. Подвижный деформируемый гранулированный слой размещается в подобласти 2 от $x = x_2$ до $x = x_3$, таким образом, начальная толщина гранулированного слоя составляет $H = x_3 - x_2 = 0.017$ м. Коэффициент проницаемости слоя принимается равным $\alpha = 0.215$, начальные параметры порового газа $p_0 = 0.1$ МПа, $\rho_0 = 1.23$ кг/м³, $u_0 = 0$.

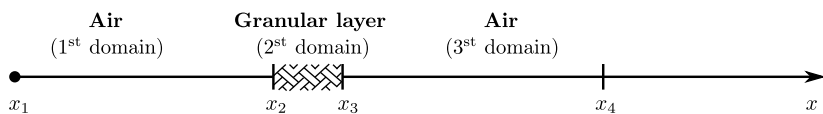


Рис. 1. Постановка задачи численного моделирования
[Figure 1. Numerical modeling problems]

Координаты границ подобластей имеют следующие значения: $x_1 = -0.2$ м, $x_2 = 0$ м, $x_3 = 0.017$ м, $x_4 = 0.217$ м. В первой подобласти задаются параметры, соответствующие параметрам газа (воздуха) за фронтом набегающей плоской ударной волны. На искусственных границах подобластей газа $x = x_1$ и $x = x_4$ ставятся условия по давлению, соответствующие начальным условиям по этим подобластям. Размеры расчетных областей (подобласти 1 и 2) выбраны из условий, чтобы волновые возмущения от гранулированного слоя не отразились от искусственных границ и не исказили численное решение в течение интервала времени 0.4 мс, когда уже сформированы отраженные и прошедшие ударные волны в газе.

Коэффициент проницаемости принимается в виде отношения площади пор к общей площади элемента среды. В третьей подобласти — покоящийся газ с начальными параметрами, как и во второй подобласти. Показатель адиабаты газа во всех подобластях $\gamma = 1.4$. Решение получено на разностной сетке с размером ячеек 0.0005 м. Гранулированный слой предполагается деформируемым. Кривые одноосного сжатия имеют вид, характерный для пористых материалов [29], и в переменных «давление — плотность» показаны на рис. 2. Пунктиром показана разгрузочная ветвь, принимаемая в виде прямой линии, с тангенсом угла наклона (квадрат скорости звука) равным $2.9 \cdot 10^5$ м²/с². В начальный момент времени слой покоится, деформации слоя отсутствуют, его начальная плотность равна 680 кг/м³, давление — 0.1 МПа. Уменьшение проницаемости слоя при его сжатии с начального значения $\alpha = 0.215$ происходит по линейному закону (рис. 3). Вид зависимости изменения проницаемости от плотности установлен по результатам численного моделирования трехмерных задач упругопластического сжатия симметричных фрагментов гранулированных слоев [30].

В области $x < 0$ в качестве начальных условий задаются постоянные параметры за фронтом набегающей плоской ударной волны (УВ) в направлении оси Ox . Эти параметры определяются числом Маха ударного фронта M_0

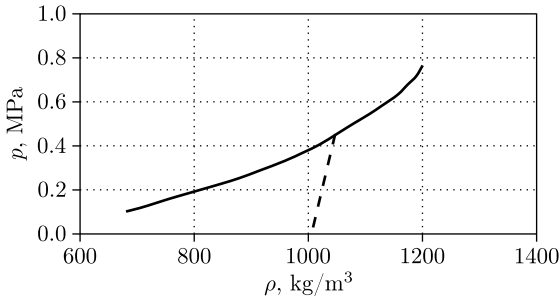


Рис. 2. Изменение плотности относительно давления
[Figure 2. Change in density relative to pressure]

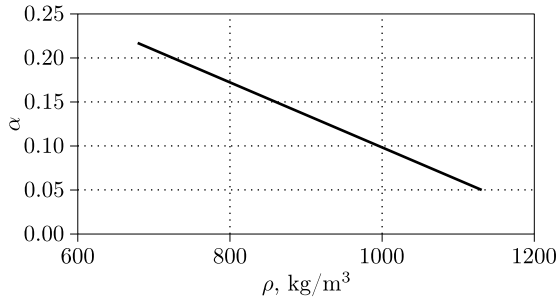


Рис. 3. Изменение проницаемости
[Figure 3. Permeability change]

и вычисляются согласно формулам [31]:

$$\begin{aligned} \frac{p_{sw}}{p_0} &= \frac{2\gamma M_0^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}, & \frac{\rho_{sw}}{\rho_0} &= \frac{(\gamma + 1)M_0^2}{(\gamma - 1)M_0^2 + 2}, \\ \frac{T_{sw}}{T_0} &= \frac{(2\gamma M_0^2 - (\gamma - 1))((\gamma - 1)M_0^2 + 2)}{(\gamma + 1)^2 M_0^2}, \\ \frac{u_{sw}}{a_0} &= \frac{2}{\gamma + 1} \left(M_0 - \frac{1}{M_0} \right), \end{aligned}$$

где γ — показатель адиабаты, $M_0 = u_0/a_0$, a_0 — скорость звука перед УВ.

Рассматривались три варианта задания интенсивности набегающей УВ. В первом варианте полагалось $p_{sw} = 0.3$ МПа, $\rho_{sw} = 2.596$ кг/см³, $u_{sw} = 292.5$ м/с. На рис. 4–6 представлены распределения давлений, плотностей и скоростей в газе по расчетной области задачи ($-0.1 \text{ м} < x < 0.1 \text{ м}$) в момент времени $t = 0.2$ мс, когда формируются отраженные и проходящие через гранулированный слой ударные волны. Видно, что амплитуда давления отраженной волны в газе (кривые 1) более чем в 2 раза превышает амплитуду падающей ударной волны. Проходящая волна также является нелинейной с амплитудой 0.136 МПа (кривая 3). Наибольшие давления образуются в поровом газе гранулированной среды с амплитудами, на порядок превышающими амплитуду набегающей, отраженной и проходящей волны (кривая 2). Распределения скорости и плотности подтверждают нелинейный характер протекающих процессов (рис. 5, 6). Хорошо видны характерные скачки всех

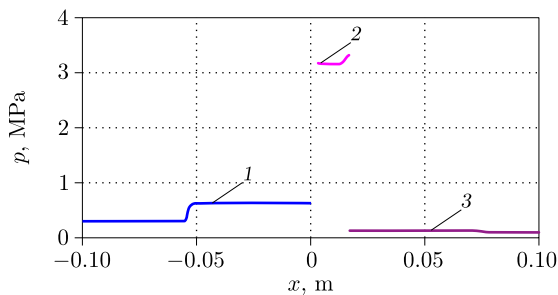


Рис. 4. Распределение давления по расчетной области при $t = 0.2$ мс
[Figure 4. Pressure distribution by computational domain ($t = 0.2$ ms)]

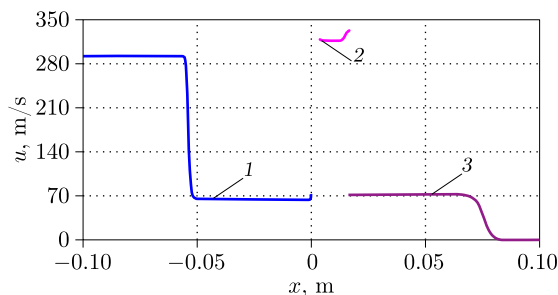


Рис. 5. Распределение скорости по расчетной области при $t = 0.2$ мс
[Figure 5. Speed distribution by computational domain ($t = 0.2$ ms)]

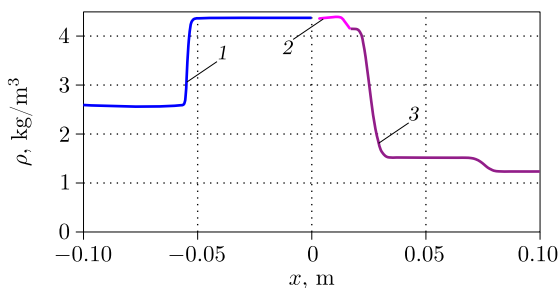


Рис. 6. Распределение плотности по расчетной области при $t = 0.2$ мс
[Figure 6. Density distribution by computational domain ($t = 0.2$ ms)]

параметров на границах гранулированного слоя, что соответствует физике протекающих явлений [14].

На рис. 7, 8 представлены распределения давлений и плотностей по гранулированному слою (твердой фазе) в моменты времени $t = \{0.1; 0.2; 0.3\}$ мс. Здесь цифрой 1 отмечено распределение полей в момент времени $t = 0.1$ мс; цифрой 2 — $t = 0.2$ мс; цифрой 3 — $t = 0.3$ мс.

Процессы волнообразования в твердой фазе также носят нелинейный характер. Скорости распространения возмущений по твердой фазе значительно меньше, чем по поровому газу. Вследствие нелинейности происходит некоторое усиление амплитуды, распространяющейся по слою волны (кривые 3). В распространяющейся по твердой фазе волне наблюдается уплотнение слоя в 1.76 раза, что приводит к существенному изменению его проницаемости (рис. 3). Для оценки влияния изменения проницаемости при сжатии грану-

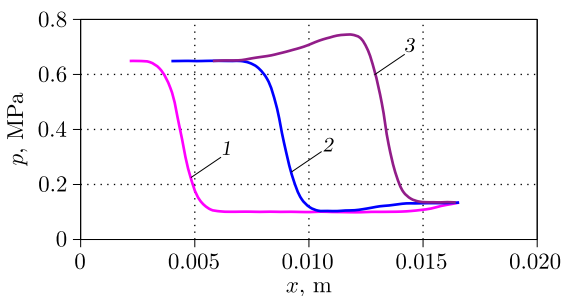


Рис. 7. Распределение давления по расчетной области в твердой фазе слоя
[Figure 7. Pressure distribution by computational domain]

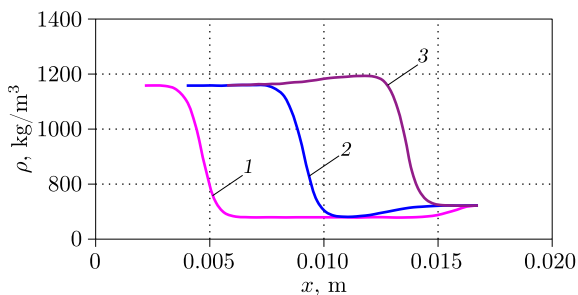


Рис. 8. Распределение плотности по расчетной области в твердой фазе слоя
[Figure 8. Density distribution by computational domain]

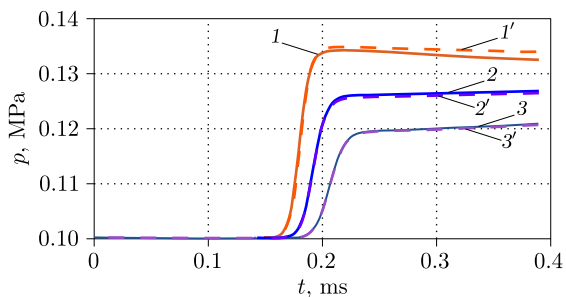


Рис. 9. Изменение давления проходящих волн
[Figure 9. Pressure change of passing waves]

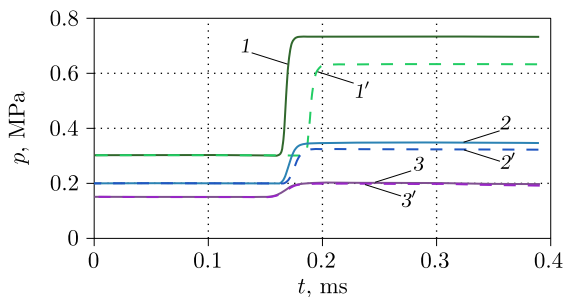


Рис. 10. Изменение давления отраженных волн
[Figure 10. Reflected wave pressure change]

лированного слоя на параметры проходящих и отраженных волн ниже приводится сравнительный анализ численных решений с учетом и без учета изменения его проницаемости вследствие деформирования.

Для этого проведены расчеты взаимодействия гранулированного слоя с набегающими УВ различной амплитуды: $p_{sw} = 0.3$ МПа, $p_{sw} = 0.2$ МПа, $p_{sw} = 0.15$ МПа.

На рис. 9, 10 представлены временные зависимости давлений проходящих (рис. 9) и отраженных (рис. 10) волн в точках на удалении $-3H$ и $3H$ от границ слоя.

Цифрами 1 и 1' отмечено решение, полученное при параметрах газа за фронтом плоской ударной волны: $p_{sw} = 0.3$ МПа. Цифрами 2 и 2' — решение, полученное при параметрах газа за фронтом плоской ударной волны: $p_{sw} = 0.2$ МПа. Цифрами 3 и 3' — решение, полученное при параметрах газа за фронтом плоской ударной волны: $p_{sw} = 0.15$ МПа. Сплошные линии (1, 2, 3) соответствуют решению с учетом изменения коэффициента проницаемости, пунктирные линии (1', 2', 3') — решению с постоянным коэффициентом проницаемости 0.215. Влияние учета изменения проницаемости особо заметно на параметрах отраженных волн, и это влияние возрастает с ростом амплитуды набегающей волны. Эта же закономерность проявляется и для проходящих волн, но в меньшей мере.

Закключение. Численные исследования процессов нелинейного взаимодействия ударных волн с деформируемыми проницаемыми гранулированными слоями показали, что параметры проходящих и отраженных волн зависят от степени обжатия гранулированных слоев, более существенна эта зависимость для проходящих волн. Поэтому оценку защитных свойств проницаемых преград при воздействии сильных ударных волн следует проводить с учетом изменения их проницаемости вследствие деформирования. Разработанные математическая и численная модели позволяют получать параметры отраженных и проходящих волн через проницаемые гранулированные слои с учетом изменения проницаемости от степени деформационного сжатия слоя.

Конкурирующие интересы. Заявляем, что в отношении авторства и публикации этой статьи конфликта интересов не имеем.

Авторский вклад и ответственность. И. А. Модин — проведение численных расчетов и экспериментальных исследований, обработка и анализ результатов, работа с черновиком и переработанным вариантом рукописи. А. В. Кочетков — идея исследования, формулировка целей и задач исследования, визуализация и верификация результатов. Е. Г. Глазова — проведение численных расчетов, визуализация и верификация результатов, работа с черновиком и переработанным вариантом рукописи. Авторы несут полную ответственность за предоставление окончательной рукописи в печать. Окончательная версия рукописи была одобрена всеми авторами.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ № 20-79-00108).

Библиографический список

1. Гельфанд Б. Е., Сильников М. В. *Фугасные эффекты взрывов*. СПб.: Полигон, 2002. 272 с.
2. Гельфанд Б. Е., Губанов А. В., Тимофеев Е. И. Взаимодействие воздушных ударных волн с пористым экраном // *Изв. АН СССР. МЖГ*, 1983. № 4. С. 79–84.

3. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., et al. Mechanism of compressive stress formation during weak shock waves impact with granular materials // *Experiments in Fluids*, 1997. vol. 22, no. 6. pp. 507–518. <https://doi.org/10.1007/s003480050078>.
4. Glam B., Igra O., Britan A., Ben-Dor G. Dynamics of stress wave propagation in a chain of photoelastic discs impacted by a planar shock wave; Part I, experimental investigation // *Shock Waves*, 2007. vol. 17, no. 1. pp. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00193-007-0094-x>.
5. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., et al. Experimental investigation of the interaction between weak shock waves and granular layers // *Experiments in Fluids*, 1997. vol. 22, no. 5. pp. 432–443. <https://doi.org/10.1007/s003480050069>.
6. Britan A., Ben-Dor G. Shock tube study of the dynamical behavior of granular materials // *Int. J. Multiphase Flow*, 2006. vol. 32, no. 5. pp. 623–642. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.01.007>.
7. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Development of a general approach for predicting the pressure fields of unsteady gas flows through granular media // *J. Appl. Phys.*, 2006. vol. 99, no. 9, 093519. <https://doi.org/10.1063/1.2197028>.
8. Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Head-on collision of a planar shock wave with a granular layer // *AIP Conf. Proc.*, 1997. vol. 370, no. 1. pp. 971–974. <https://doi.org/10.1063/1.50571>.
9. Levy A., Ben-Dor G., Sorek S. Numerical investigation of the propagation of shock waves in rigid porous materials: development of the computer code and comparison with experimental result // *J. Fluid Mech.*, 1996. vol. 324. pp. 163–179. <https://doi.org/10.1017/S0022112096007872>.
10. Britan A., Ben-Dor G., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Gas filtration during the impact of weak shock waves on granular layers // *Int. J. Multiphase Flow*, 1997. vol. 23, no. 3. pp. 473–491. [https://doi.org/10.1016/s0301-9322\(96\)00088-2](https://doi.org/10.1016/s0301-9322(96)00088-2).
11. Sadd M. H., Shukla A., Mei H., Zhu C. Y. The effect of voids and inclusions on wave propagation in granular materials / *Micromechanics and Inhomogeneity*. New York: Springer, 1990. pp. 367–383. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8919-4_23.
12. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Shock waves attenuation by granular filters // *Int. J. Multiphase Flow*, 2001. vol. 27, no. 4. pp. 617–634. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(00\)00048-3](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(00)00048-3).
13. Альтшулер Л. В., Кругликов Б. С. Затухание сильных ударных волн в двухфазных и гетерогенных средах // *ПМТФ*, 1984. №5. С. 24–29.
14. Губайдуллин А. А., Дудко Д. Н., Урманчиев С. Ф. Моделирование взаимодействия воздушной ударной волны с пористым экраном // *Физика горения и взрыва*, 2000. Т. 36, №4. С. 87–96.
15. 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.
16. Кочетков А. В., Леонтьев Н. В., Модин И. А., Савихин А. О. Исследование деформационных и прочностных свойств металлических плетеных сеток // *Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика*, 2018. №52. С. 53–62. <https://doi.org/10.17223/19988621/52/6>.
17. Брагов А. М., Жегалов Д. В., Константинов А. Ю., Кочетков А. В., Модин И. А., Савихин А. О. Экспериментальное исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при динамическом и квазистатическом нагружении // *Вестник ПНИПУ. Механика*, 2016. №3. С. 252–262. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.3.17>.
18. Balandin V. V., Kochetkov A. V., Krylov S. V., Modin I. A. Numerical and experimental study of the penetration of a package of woven metal grid by a steel ball // *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019. vol. 1214, 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1214/1/012004>.

19. Modin I. A., Kochetkov A. V., Leontiev N. V. Numerical simulation of quasistatic and dynamic compression of a granular layer // *AIP Conf. Proc.*, 2019. vol. 2116, 270003. <https://doi.org/10.1063/1.5114277>.
20. Игумнов Л. А., Казаков Д. А., Шишулин Д. Н., Модин И. А., Жегалов Д. В. Экспериментальные исследования высокотемпературной ползучести титанового сплава ВТ6 в условиях сложного напряженного состояния под воздействием агрессивной среды // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2021. Т. 25, № 2. С. 286–302. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1850>.
21. Telegin S. V., Kirillova N. I., Modin I. A., Suleimanov E. V. Effect of particle size distribution on functional properties of $\text{Ce}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{2-d}$ ceramics // *Ceramics Intern.*, 2021. vol. 47, no. 12. pp. 17316–17321. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.043>.
22. Kochetkov A. V., Modin I. A., Poverennov E. Y. Numerical study of elastoplastic dynamic compression of metal braided grid // *AIP Conf. Proc.*, 2021. vol. 2371, 050005. <https://doi.org/10.1063/5.0060905>.
23. Глазова Е. Г., Кочетков А. В. Численное моделирование взаимодействия деформируемых газопроницаемых пакетов сеток с ударными волнами // *ПМТФ*, 2012. № 3. С. 11–19.
24. Кочетков А. В., Леонтьев Н. В., Модин И. А. Деформационные свойства насыпного слоя из свинцовых шариков // *Проблемы прочности и пластичности*, 2017. Т. 79, № 4. С. 413–424. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2017-79-4-413-424>.
25. Яушев И. К. Распад произвольного разрыва в канале со скачком площади сечения // *Изв. СО АН СССР. Техн. науки*, № 8, вып. 2, 1967. С. 109–120.
26. Крайко А. Ф., Миллер Л. Г., Ширковский И. А. О течениях газа в пористой среде с поверхностями разрыва пористости // *ПМТФ*, 1982. № 1. С. 111–118.
27. Дулов В. Г., Лукьянов Г. А. *Газодинамика процессов истечения*. Новосибирск: Наука, 1984. 234 с.
28. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я., Крайко А. Н., Прокопов Г. П. *Численное решение многомерных задач газовой динамики*. М.: Наука, 1976. 400 с.
29. Брагов А. М., Константинов А. Ю., Кочетков А. В., Модин И. А., Савихин А. О. Экспериментальное исследование деформационных свойств насыпного слоя из свинцовых шариков при динамическом и квазистатическом нагружении // *Вестник ПНИПУ. Механика*, 2017. № 4. С. 5–16. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.4.02>.
30. Кочетков А. В., Леонтьев Н. В., Модин И. А., Турыгина И. А., Чекмарев Д. Т. Численное моделирование деформирования гранулированного слоя при сжатии // *Проблемы прочности и пластичности*, 2018. Т. 80, № 3. С. 359–367. <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2018-80-3-359-367>.
31. Баженова Т. В., Гвоздева Л. Г. *Нестационарные взаимодействия ударных волн*. М.: Наука, 1977. 204 с.

MSC: 74E20, 74J99

Numerical simulation of the interaction of a shock wave with a permeable deformable granulated layer

I. A. Modin, A. V. Kochetkov, E. G. Glazova

Research Institute of Mechanics,

National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod,

23, korp. 6, pr. Gagarina, Nizhny Novgorod, 603022, Russian Federation.

Abstract

The article presents a mathematical model that describes, in a one-dimensional approximation, the interconnected processes of unsteady deformation of flat permeable granular layers. The model consists of solid particles and wave processes in pore and surrounding gas. The model is based on nonlinear equations of dynamics of two interpenetrating continua. As interfacial forces, drag forces are taken into account when gas flows around ball particles and friction forces. The numerical solution of the equations is carried out according to the modified scheme of S. K. Godunov, adapted to the problems of the dynamics of interpenetrating media. The contact surfaces of pure gas with the porous granular layer and pore gas are the surface of the fracture of porosity and permeability. The numerical implementation of contact conditions is based on the solution of the problem of disintegration of a gap at a jump in porosity. Solutions are obtained for the effects of plane shock waves on a deformable granular layer. We study the transformation of waves passing through an elastoplastic granular layer with and without taking into account changes in the permeability of the layer. When solving problems, the dependence of the change in the permeability of a layer on its compression is used, which is also obtained numerically when modeling the compression of symmetric fragments of granular layers in a spatial setting. Numerical studies of the processes of nonlinear interaction of shock waves

Research Article

© Authors, 2022

© Samara State Technical University, 2022 (Compilation, Design, and Layout)

 The content is published under the terms of the [Creative Commons Attribution 4.0 International License](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Please cite this paper in press as:

Modin I. A., Kochetkov A. V., Glazova E. G. Numerical simulation of the interaction of a shock wave with a permeable deformable granulated layer, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ., Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2022, vol. 26, no. 1, pp. 79–92. <https://doi.org/10.14498/vsgtu1879> (In Russian).

Authors' Details:

Ivan A. Modin  <https://orcid.org/0000-0002-3561-4606>

Cand. Techn. Sci.; Researcher; Lab. of Simulation of Physical and Mechanical Processes; e-mail: mianet@mail.ru

Anatoliy V. Kochetkov  <https://orcid.org/0000-0001-7939-8207>

Dr. Phys. & Math. Sci.; Professor; Dept. of Theoretical, Computer and Experimental Mechanics; (Institute of Information Technology, Mathematics and Mechanics UNN); e-mail: kochetkov@mech.unn.ru

Elena G. Glazova  <https://orcid.org/0000-0003-4351-889X>

Cand. Phys. & Math. Sci.; Senior Researcher; Lab. of Dynamics of Multicomponent Media (Research Institute of Mechanics UNN); e-mail: glazova@mech.unn.ru

with deformable permeable granular layers have shown that the parameters of transmitted and reflected waves substantially depend on the degree of compression of the granular layers. Assessment of the protective properties of permeable barriers when exposed to strong shock waves should be carried out taking into account changes in their permeability due to deformation layers.

Keywords: shock wave, granular layer, permeability, interpenetrating continua, elastoplastic deformation, Godunov scheme.

Received: 25th August, 2021 / Revised: 26th December, 2021 /

Accepted: 24th January, 2022 / First online: 31st March, 2022

Competing interests. We declare that we have no conflicts of interest in the authorship and publication of this article.

Authors' contributions and responsibilities. I.A. Modin: Numerical calculations; Experimental research; Processing and verification of results; Writing — original draft and review & editing. A.V. Kochetkov: Idea of study; Formulation of research goals and aims; Visualization and verification of results. E.G. Glazova: Numerical calculations; Visualization and verification of results; Writing — original draft and review & editing. The authors are absolutely responsible for submit the final manuscript to print. Each author has approved the final version of manuscript.

Funding. This study was supported by the Russian Science Foundation (RSF 20–79–00108).

References

1. Gelfand B. E., Silnikov M. V. *Fugasnye efekty vzryvov* [The Explosive Effects of Explosions]. St. Petersburg, Polygon, 2002, 272 pp. (In Russian)
2. Gel'fand B. E., Gubanov A. V., Timofeev E. I. Interaction of shock waves in air with a porous screen, *Fluid Dyn.*, 1983, vol. 18, no. 4, pp. 561–566. <https://doi.org/10.1007/BF01090621>.
3. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., et al. Mechanism of compressive stress formation during weak shock waves impact with granular materials, *Experiments in Fluids*, 1997, vol. 22, no. 6, pp. 507–518. <https://doi.org/10.1007/s003480050078>.
4. Glam B., Igra O., Britan A., Ben-Dor G. Dynamics of stress wave propagation in a chain of photoelastic discs impacted by a planar shock wave; Part I, experimental investigation, *Shock Waves*, 2007, vol. 17, no. 1, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1007/s00193-007-0094-x>.
5. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., et al. Experimental investigation of the interaction between weak shock waves and granular layers, *Experiments in Fluids*, 1997, vol. 22, no. 5, pp. 432–443. <https://doi.org/10.1007/s003480050069>.
6. Britan A., Ben-Dor G. Shock tube study of the dynamical behavior of granular materials, *Int. J. Multiphase Flow*, 2006, vol. 32, no. 5, pp. 623–642. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2006.01.007>.
7. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Development of a general approach for predicting the pressure fields of unsteady gas flows through granular media, *J. Appl. Phys.*, 2006, vol. 99, no. 9, 093519. <https://doi.org/10.1063/1.2197028>.
8. Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Head-on collision of a planar shock wave with a granular layer, *AIP Conf. Proc.*, 1997, vol. 370, no. 1, pp. 971–974. <https://doi.org/10.1063/1.50571>.
9. Levy A., Ben-Dor G., Sorek S. Numerical investigation of the propagation of shock waves in rigid porous materials: development of the computer code and comparison

- p>with experimental result,
- J. Fluid Mech.*
- , 1996, vol. 324, pp. 163–179.
- <https://doi.org/10.1017/S0022112096007872>
- .
10. Britan A., Ben-Dor G., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Gas filtration during the impact of weak shock waves on granular layers, *Int. J. Multiphase Flow*, 1997, vol. 23, no. 3, pp. 473–491. [https://doi.org/10.1016/s0301-9322\(96\)00088-2](https://doi.org/10.1016/s0301-9322(96)00088-2).
 11. Sadd M. H., Shukla A., Mei H., Zhu C. Y. The effect of voids and inclusions on wave propagation in granular materials, In: *Micromechanics and Inhomogeneity*. New York, Springer, 1990, pp. 367–383. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-8919-4_23.
 12. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Shock waves attenuation by granular filters, *Int. J. Multiphase Flow*, 2001, vol. 27, no. 4, pp. 617–634. [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(00\)00048-3](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(00)00048-3).
 13. Al'tshuler L. V., Kruglikov B. S. Attenuation of strong shock waves in two-phase and heterogeneous media, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1984, vol. 25, no. 5, pp. 672–676. <https://doi.org/10.1007/BF00909366>.
 14. Gubaidullin A. A., Dudko D. N., Urmanceev S. F. Modeling of the interaction between an air shock wave and a porous screen, *Combust. Explos. Shock Waves*, 2000, vol. 36, no. 4, pp. 496–505. <https://doi.org/10.1007/BF02699481>.
 15. Boldyreva O. Yu., Gubaidullin A. A., Dudko D. N., Kutushev A. G. Numerical study of the transfer of shock-wave loading to a screened flat wall through a layer of a powdered medium and a subsequent air gap, *Combust. Explos. Shock Waves*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 114–123. <https://doi.org/10.1007/s10573-007-0016-3>.
 16. Kochetkov A. V., Leont'ev N. V., Modin I. A., Savikhin A. O. Study of the stress-strain and strength properties of the metal woven grids, *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Matematika i Mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics], 2018, no. 52, pp. 53–62 (In Russian). <https://doi.org/10.17223/19988621/52/6>.
 17. Bragov A. M., Zhegalov D. V., Konstantinov A. Yu., Kochetkov A. V., Modin I. A., Savikhin A. O. Experimental study of deformation properties of a package of woven metal mesh under dynamic and quasi-static stressing, *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2016, no. 3, pp. 252–262 (In Russian). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2016.3.17>.
 18. Balandin V. V., Kochetkov A. V., Krylov S. V., Modin I. A. Numerical and experimental study of the penetration of a package of woven metal grid by a steel ball, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2019, vol. 1214, 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1214/1/012004>.
 19. Modin I. A., Kochetkov A. V., Leontiev N. V. Numerical simulation of quasistatic and dynamic compression of a granular layer, *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2116, 270003. <https://doi.org/10.1063/1.5114277>.
 20. Igumnov L. A., Kazakov D. A., Shishulin D. N., Modin I. A., Zhegalov D. V. Experimental studies of high-temperature creep of titanium alloy VT6 under conditions of a complex stress state under the influence of an aggressive medium, *Vestn. Samar. Gos. Tekhn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki* [J. Samara State Tech. Univ., Ser. Phys. Math. Sci.], 2021, vol. 25, no. 2, pp. 286–302 (In Russian). <https://doi.org/10.14498/vsgtu1850>.
 21. Telegin S. V., Kirillova N. I., Modin I. A., Suleimanov E. V. Effect of particle size distribution on functional properties of $\text{Ce}_{0.9}\text{Y}_{0.1}\text{O}_{2-\delta}$ ceramics, *Ceramics Intern.*, 2021, vol. 47, no. 12, pp. 17316–17321. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.03.043>.
 22. Kochetkov A. V., Modin I. A., Poverennov E. Y. Numerical study of elastoplastic dynamic compression of metal braided grid, *AIP Conf. Proc.*, 2021, vol. 2371, 050005. <https://doi.org/10.1063/5.0060905>.
 23. Glazova E. G., Kochetkov A. V. Numerical simulation of interaction of deformable gas-permeable packets of grids with shock waves, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 2012, vol. 53, no. 3, pp. 316–323. <https://doi.org/10.1134/S0021894412030029>.
 24. Kochetkov A. V., Leont'ev N. V., Modin I. A. Deformational properties of a filling layer of lead balls, *Problems of Strength and Plasticity*, 2017, vol. 79, no. 4, pp. 413–424 (In Russian). <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2017-79-4-413-424>.

25. Yaushev I. K. Decay of an arbitrary discontinuity in a channel with a jump in the cross-sectional area, In: *Izv. Sibirsk. Otdel. Akad. Nauk SSSR. Tekhn. Nauki*, no. 8, issue 2, 1967, pp. 109–120 (In Russian).
26. Kraiko A. F., Miller L. G., Shirkovskii I. A. Gas flow in a porous medium with porosity discontinuity surfaces, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1982, vol. 23, no. 1, pp. 104–110. <https://doi.org/10.1007/BF00911987>.
27. Dulov V. G., Lukyanov G. A. *Gazodinamika protsessov istecheniia [Gas Dynamics of Processes of the Expiration]*. Novosibirsk, Nauka, 1984, 234 pp. (In Russian)
28. Godunov S. K., Zabrodin A. V., Ivanov M. Ya., Kraiko A. N., Prokopov G. P. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoi dinamiki* [Numerical solution of multidimensional problems of gas dynamics]. Moscow, Nauka, 1976, 400 pp. (In Russian)
29. Bragov A. M., Konstantinov A. U., Kochetkov A. V., Modin I. A., Savikhin A. O. Experimental study of deformation properties of a bulk layer from plumbum balls under dynamic and quasistatic loading, *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2017, no. 4, pp. 16–27 (In Russian). <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.4.02>.
30. Kochetkov A. V., Leontiev N. V., Modin I. A., Turygina I. A., Chekmarev D. T. Numerically modeling deformation of a granular bed loaded in compression, *Problems of Strength and Plasticity*, 2018, vol. 80, no. 3, pp. 359–367 (In Russian). <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2018-80-3-359-367>.
31. Bazhenova T. V., Gvozdeva L. G. *Nestatsionarnye vzaimodeistviia udarnykh voln [Unsteady Interactions of Shock Waves]*. Moscow, Nauka, 1977, 204 pp. (In Russian)