

УДК 539.3

DOI: 10.32326/1814-9146-2020-82-3-353-363

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ДЕФОРМИРУЕМЫМ ПРОНИЦАЕМЫМ ГРАНУЛИРОВАННЫМ СЛОЕМ\*

© 2020 г. Глазова Е.Г., Турыгина И.А., Модин И.А.

*Научно-исследовательский институт механики  
Национального исследовательского Нижегородского государственного  
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

glazova@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 19.03.2020*

Представлена математическая модель, описывающая в одномерном приближении взаимосвязанные процессы нестационарного деформирования плоских проницаемых гранулированных слоев, состоящих из шаровых частиц, и волновой динамики 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 газа вне пор с пористым гранулированным слоем и поровым газом являются поверхностью разрыва пористости и проницаемости, на которых выполняются законы сохранения как на скачке пористости. Численная реализация контактных условий производится на основе решения задачи распада разрыва на скачке пористости. 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 также численно при моделировании сжатия симметричных фрагментов гранулированных слоев в пространственной постановке. 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.

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

---

\* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант №18-38-00157 мол\_а).

## Введение

Одними из перспективных элементов, защищающих конструкции от импульсных воздействий, являются насыпные слои [1–3]. Существует ряд научных публикаций, посвященных исследованию деформируемых пористых насыпных слоев в виде шариков или гранул [4–15], где показано, что размещение слоя пористых насыпных слоев перед стенкой мишени уменьшает величины остаточного напряжения и энергии мишени и существенно уменьшает скорость приложенной нагрузки. Полученные результаты ограничиваются малыми нагрузками, которые не вызывают развитое пластическое течение или разрушение материала шариков [14, 15]. При этом предполагалось, что проникаемые элементы в процессе взаимодействия с ударными волнами испытывают малые деформации и их проницаемость не изменяется. В настоящей статье рассматривается процесс взаимодействия плоских ударных волн с деформируемыми упругопластическими гранулированными слоями, которые могут испытывать большие деформации, влияющие на их проницаемость.

## 1. Основные уравнения

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:

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

Уравнения динамического деформирования гранулированного слоя, как скелета двухфазной среды, имеют вид:

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

Здесь нижний индекс 1 относится к газу, 2 – к твердому компоненту,  $t$  – время,  $x$  – координата,  $p$  – давление,  $T$  – температура,  $\rho_1^0$  – истинная плотность газа,  $u$  – скорость,  $e$  – внутренняя энергия,  $c_v$  – удельная теплоемкость,  $\gamma$  – показатель адиабаты газа,  $f$  – межфазные силы, действующие на «элементарный узел» твердого компо-

нента со стороны порового газа,  $n$  – количество таких узлов в единице объема смеси,  $\alpha_i$  ( $i = 1, 2$ ) – объемные концентрации компонентов,  $\beta$  – 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. В (2)  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  – напряжение и деформация,  $\rho_2$  – 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 звездочкой, 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 [16]. Твердая фаза, как скелет высокопористой среды, может сильно сжиматься в процессе деформации, параметры  $\alpha_1$ ,  $\beta$  будут зависеть от степени ее сжатия. Конкретный вид этих зависимостей определяется численными исследованиями деформирования фрагментов гранулированного слоя [17].

Поверхности контакта газа вне пор с пористым гранулированным слоем являются поверхностью разрыва пористости и проницаемости. Как показали исследования [18–20], на контактных границах газ вне пор – 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 газа вне пор, 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 [21], адаптированной к задачам динамики взаимопроникающих сред. Численная реализация контактных условий (3) производится на основе решения задачи распада разрыва на скачке пористости [18, 20].

## 2. Постановка задачи численного моделирования

Постановка задачи показана на рис. 1. Расчетная область состоит из трех подобластей: воздух, гранулированный слой, воздух. Координаты границ подобластей (м):  $x_1 = -0,2$ ,  $x_2 = 0$ ,  $x_3 = 0,017$ ,  $x_4 = 0,217$ . В первой подобласти задаются параметры, соответствующие параметрам газа (воздуха) за фронтом набегающей плоской ударной волны:  $p_{yv} = 0,3$  МПа,  $\rho_{yv} = 2,596$  кг/см<sup>3</sup>,  $u_{yv} = 292,5$  м/с. Вторая подобласть – под-

вижный деформируемый гранулированный слой толщиной  $H = 0,017$  м с коэффициентом проницаемости  $\alpha = 0,215$  и начальными параметрами порового газа  $p_0 = 0,1$  МПа,  $\rho_0 = 1,23$  кг/м<sup>3</sup>,  $u_0 = 0$ ; начальные параметры твердого компонента  $p_0 = 0,1$  МПа,  $\rho_0 = 680$  кг/м<sup>3</sup>,  $u_0 = 0$ . Третья подобласть – покоящийся газ с начальными параметрами, как во второй подобласти. Показатель адиабаты газа во всех подобластях  $\gamma = 1,4$ .

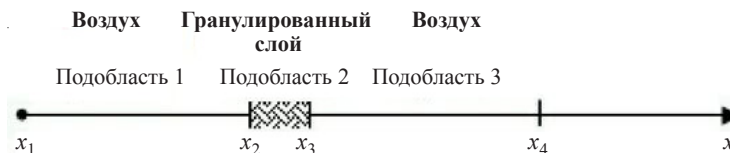


Рис. 1

Решение получено на разностной сетке с размером ячеек  $5 \cdot 10^{-4}$  м. Гранулированный слой предполагается деформируемым. Кривые одноосного сжатия имеют вид, характерный для пористых материалов [22], и в переменных давление–плотность показаны на рис. 2. Штриховой линией показана разгрузочная ветвь, принимаемая в виде прямой линии. В начальный момент времени слой покоится, деформации слоя отсутствуют, его начальная плотность равна  $680$  кг/м<sup>3</sup>, давление  $0,1$  МПа.

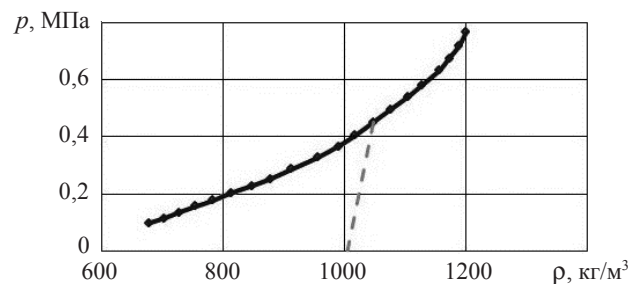


Рис. 2

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 [23].

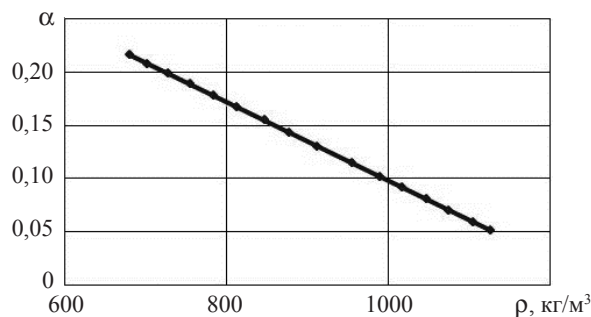


Рис. 3

В области  $x < 0$  в качестве начальных условий задаются постоянные параметры за фронтом набегающей плоской ударной волны в направлении оси  $Ox$ . Эти параметры определяются числом Маха ударного фронта  $M_0$  и вычисляются согласно формулам [24]:

$$\frac{p_{yв}}{p_0} = \frac{2\gamma M_0^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1},$$

$$\frac{\rho_{yв}}{\rho_0} = \frac{(\gamma + 1)M_0^2}{(\gamma - 1)M_0^2 + 2},$$

$$\frac{T_{yв}}{T_0} = \frac{(2\gamma M_0^2 - (\gamma - 1))((\gamma - 1)M_0^2 + 2)}{(\gamma + 1)^2 M_0^2},$$

$$\frac{u_{yв}}{a_0} = \frac{2}{\gamma + 1} \left( M_0 - \frac{1}{M_0} \right),$$

где  $\gamma$  – показатель адиабаты,  $M_0 = u_0/a_0$ ,  $a_0$  – скорость звука перед ударной волной.

Рассматривались три варианта задания интенсивности набегающей ударной волны. В первом варианте полагалось:  $p_{yв} = 0,3$  МПа,  $\rho_{yв} = 2,596$  кг/см<sup>3</sup>,  $u_{yв} = 292,5$  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 отраженной волны более чем в 2 раза превышает амплитуду падающей ударной волны. Проходящая волна также является нелинейной с амплитудой 0,136 МПа.

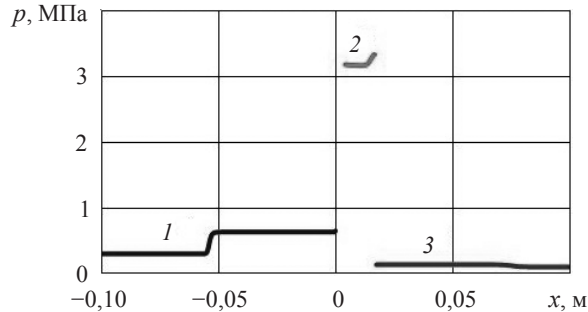


Рис. 4

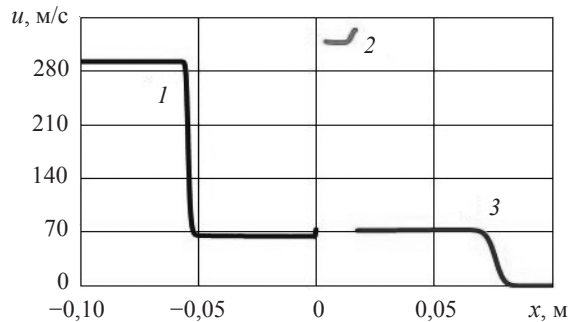


Рис. 5

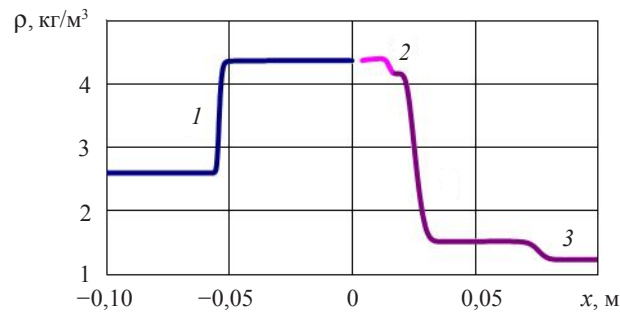


Рис. 6

Наибольшие давления образуются в поровом газе гранулированной среды с амплитудами, на порядок превышающими амплитуду набегающей волны. Распределения скорости и плотности подтверждают нелинейный характер протекающих процессов.

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. На рисунках цифрой 1 отмечено распределение полей в момент времени  $t = 0,1$  мс, цифрой 2 – в момент  $t = 0,2$  мс, цифрой 3 – в момент  $t = 0,3$  мс.

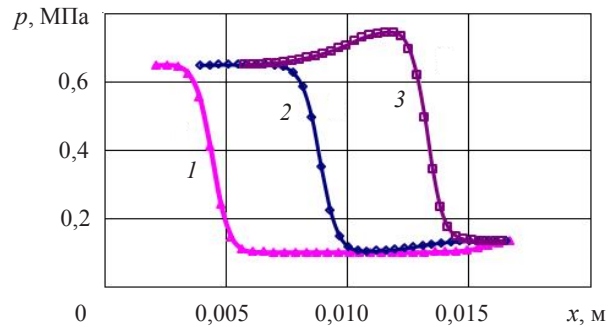


Рис. 7

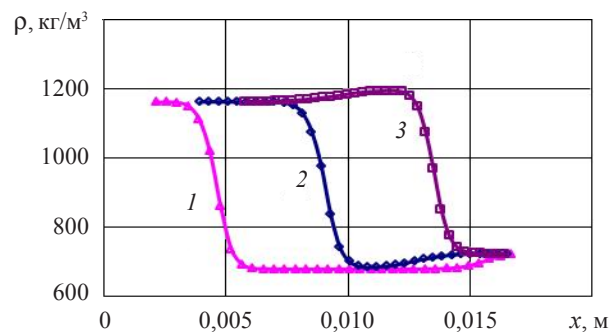


Рис. 8

Процессы волнообразования в твердой фазе также нелинейны. Происходит некоторое увеличение 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 (см. рис. 3). Для оценки влияния изменения проницаемости при сжатии гранулированного слоя на пара-

метры проходящих и отраженных волн приводится сравнительный анализ численных решений с учетом и без учета изменения его проницаемости вследствие деформирования. Для этого проведены расчеты взаимодействия гранулированного слоя с набегающими ударными волнами с различными амплитудами  $p_{ув}$ : 0,3, 0,2 и 0,15 МПа.

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

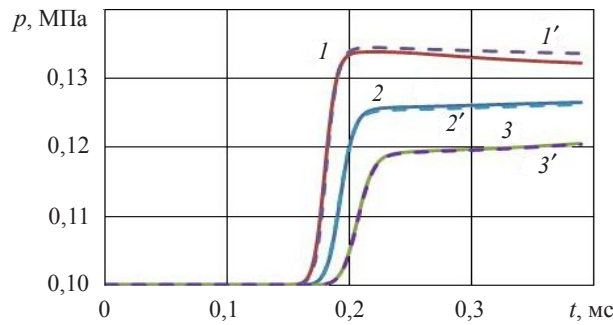


Рис. 9

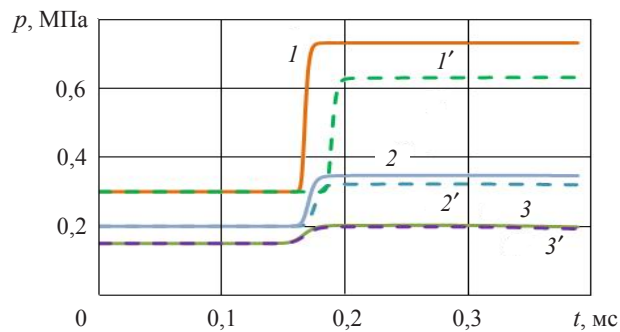


Рис. 10

Цифрами  $1$  и  $1'$  отмечено решение, полученное при параметрах газа за фронтом плоской ударной волны  $p_{ув} = 0,3$  МПа; цифрами  $2$  и  $2'$  – решение, полученное при параметрах газа за фронтом плоской ударной волны  $p_{ув} = 0,2$  МПа; цифрами  $3$  и  $3'$  – решение, полученное при параметрах газа за фронтом плоской ударной волны  $p_{ув} = 0,15$  МПа. Сплошные линии соответствуют решению с учетом изменения коэффициента проницаемости, штриховые линии – решению с постоянным коэффициентом проницаемости 0,215.

В таблице 1 показаны амплитудные значения волн с учетом и без учета изменения проницаемости.

Таблица 1

$p_{ув}$ , МПа	Проходящая волна с учетом/без учета изменения проницаемости, МПа	Отраженная волна с учетом/без учета изменения проницаемости, МПа	Проходящая волна, отличие в %	Отраженная волна, отличие в %
0,3	0,1326 / 0,1339	0,7330 / 0,6325	0,98	15,8
0,2	0,1264 / 0,1261	0,3477 / 0,3220	0,24	7,39
0,15	0,1202 / 0,1200	0,2003 / 0,1954	0,17	2,45

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.

### Заключение

Разработанные математическая и численная модели позволяют получать параметры отраженных и проходящих через проницаемые гранулированные слои волн с учетом изменения проницаемости в зависимости от степени деформационного сжатия слоя.

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.

### Список литературы

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. Механика жидкости и газа*. 1983. №4. С. 79–84.
3. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J.P. Mechanism of compressive stress formation during weak shock waves impact with granular materials. *Experiments in Fluids*. 1997. Vol. 22. P. 507–518. DOI: 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. Iss. 1-2. P. 1–14.
5. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J.P. Experimental investigation of the interaction between weak shock waves and granular layers. *Experiments in Fluids*. 1997. Vol. 22. Iss. 5. P. 432–443.
6. Britan A., Ben-Dor G. Shock tube study of the dynamical behavior of granular materials. *International Journal of Multiphase Flow*. 2006. Vol. 32. No 5. P. 623–642.
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. *Journal of Applied Physics*. 2006. Vol. 99. No 9. P. 1–16. DOI: 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 Conference Proceedings*. 1997. Vol. 370. P. 971–974. DOI: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. *Journal of Fluid Mechanics*. 1996. Vol. 324. P. 163–179. DOI: <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. *International Journal of Multiphase Flow*. 1997. Vol. 23. No 3. P. 473–491.
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*. Eds. G.J. Weng, M. Taya, H. Abé. Springer-Verlag, 1989. P. 367–383.
12. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Shock waves attenuation by granular filters. *International Journal of Multiphase Flow*. 2001. Vol. 27. No 4. P. 617–634. DOI: 10.1016/S0301-9322(00)00048-3.



13. Альтшулер Л.В., Кругликов Б.С. Затухание сильных ударных волн в двухфазных и гетерогенных средах. *Прикладная механика и техническая физика*. 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. Глазова Е.Г., Кочетков А.В. Численное моделирование взаимодействия деформируемых газопроницаемых пакетов сеток с ударными волнами. *Прикладная механика и техническая физика*. 2012. Т. 53. №3 (313). С. 11–19.
17. 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.
18. Яушев И.К. Распад произвольного разрыва в канале со скачком площади сечения. *Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук*. 1967. №8-2. С. 109–120.
19. Крайко А.Н., Миллер Л.Г., Ширковский И.А. О течениях газа в пористой среде с поверхностями разрыва пористости. *Прикладная механика и техническая физика*. 1982. №1. С. 111–118.
20. Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. *Газодинамика процессов истечения*. Новосибирск: Наука, 1984. 234 с.
21. *Численное решение многомерных задач газовой динамики*. Под ред. С.К. Годунова. М.: Наука, 1976. 400 с.
22. 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. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.02.
23. 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.
24. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. *Нестационарные взаимодействия ударных волн*. М: Наука, 1977. 273 с.

#### References

1. Gelfand B.E., Silnikov M.V. *Fugasnye efekty vzryvov [The Explosive Effects of Explosions]*. St. Petersburg. Poligon Publ. 2002. 272 p. (In Russian).
2. Gelfand B.E., Gubanov A.V., Timofeev E.I. Vzaimodeystviye vozdushnykh udarnykh voln s poristym ekranom [Interaction of air shock waves with a porous screen]. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid Dyn.]*. 1983. No 4. P. 79–84 (In Russian).
3. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J.P. Mechanism of compressive stress formation during weak shock waves impact with granular materials. *Exp. Fluids*. 1997. Vol. 22. P. 507–518. DOI: 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 1: Experimental investigation. *Shock Waves*. 2007. Vol. 17. Iss. 1-2. P. 1–14.
5. Ben-Dor G., Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J.P. Experimental investigation of the interaction between weak shock waves and granular layers. *Exp. Fluids*. 1997. Vol. 22. Iss. 5. P. 432–443.
6. Britan A., Ben-Dor G. Shock tube study of the dynamical behavior of granular materials. *Int. J. Multiph. Flow*. 2006. Vol. 32. No 5. P. 623–642.
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. P. 1–16. DOI: 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 Conference Proceedings*. 1997. Vol. 370. P. 971–974. DOI: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. P. 163–179. DOI: <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. Multiph. Flow.* 1997. Vol. 23. No 3. P. 473–491.
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*. Eds. G.J. Weng, M. Taya, H. Abé. Springer-Verlag. 1989. P. 367–383.
12. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Shock waves attenuation by granular filters. *Int. J. Multiph. Flow.* 2001. Vol. 27. No 4. P. 617–634. DOI: 10.1016/S0301-9322(00)00048-3.
13. Altshuler L.V., Kruglikov B.S. Zatukhanie silnykh udarnykh voln v dvukhfaznykh i geterogennykh sredakh [Damping of strong shock waves in two-phase and heterogeneous media]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]*. 1984. No 5. P. 24–29 (In Russian).
14. Gubaidullin A.A., Dudko D.N., Urmancheev S.F. Modeling of the interaction between an air shock wave and a porous screen. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2000. Vol. 36. No 4. P. 496–505.
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. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2007. Vol. 43. No 1. P. 114–123.
16. Glazova E.G., Kochetkov A.V. Numerical simulation of interaction of deformable gaspermeable packets of grids with shock waves. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.* 2012. Vol. 53. No 3. P. 316–323.
17. Kochetkov A.V., Leontyev N.V., Modin I.A. Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya deformiruemykh gazopronitsaemykh paketov setok s udarnymi volnami [Deformational properties of a filling layer of lead balls]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2017. Vol. 79. No 4. P. 413–424 (In Russian).
18. Yaushev I.K. Raspad proizvolnogo razryva v kanale so skachkom ploshchadi secheniya [The decay of an arbitrary discontinuity in a channel with a jump in the cross-sectional area]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Akademii nauk SSSR. Seriya tekhnicheskije nauki [Proceedings of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Technical Sciences Series]*. 1967. No 8-2. P. 109–120 (In Russian).
19. Kraiko A.N., Miller L.G., Shirkovsky I.A. O techeniyakh gaza v poristoy srede s poverkhnostyami razryva poristosti [On gas flows in a porous medium with porosity fracture surfaces]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [J. Appl. Mech. Tech. Phys.]*. 1982. No 1. P. 111–118 (In Russian).
20. Dulov V.G., Lukyanov G.A. *Gazodinamika protsessov istecheniya [Gas Dynamics of the Expiration Processes]*. Novosibirsk. Nauka Publ. 1984. 234 p. (In Russian).
21. *Chislennoye resheniye mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki [Numerical Solution of Multidimensional Problems of Gas Dynamics]*. Ed. S.K. Godunov. Moscow. Nauka Publ. 1976. 400 p. (In Russian).
22. Bragov A.M., Konstantinov A.U., Kochetkov A.V., Modin I.A., Savikhin A.O. Eksperimentalnoe issledovanie deformatsionnykh svoystv nasypnogo sloya iz svintsovykh sharikov pri dinamicheskom i kvazistaticheskom nagruzhении [Experimental study of deformation properties of a bulk layer from plumbum balls under dynamic and quasistatic loading]. *Vestnik PNIPU. Mekhanika [PNRPU Mechanics Bulletin]*. 2017. No 4. P. 16–27 (In Russian).
23. Kochetkov A.V., Leontiev N.V., Modin I.A., Turygina I.A., Chekmarev D.T. Chislennoye modelirovaniye deformirovaniya granulirovannogo sloya pri szhatii [Numerical modeling of granular layer deformation under compression]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2018. Vol. 80. No 3. P. 359–367 (In Russian).
24. Bazhenova T.V., Gvozdeva L.G. *Nestatsionarnyye vzaimodeystviya udarnykh voln [Unsteady Interactions of Shock Waves]*. Moscow. Nauka Publ. 1977. 204 p. (In Russian).

**MODELING THE INTERACTION OF A SHOCK WAVE  
WITH A DEFORMABLE PERMEABLE GRANULAR LAYER**

**Glazova E.G., Turygina I.A., Modin I.A.**

*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University  
of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

This 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 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.

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