

УДК 539.3

## ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА НАСЫПНОГО СЛОЯ ИЗ СВИНЦОВЫХ ШАРИКОВ\*

© 2017 г. Кочетков А.В.<sup>1</sup>, Леонтьев Н.В.<sup>2</sup>, Модин И.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт механики

Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

kochetkov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 26.09.2017

Приводятся результаты статического исследования сжатия насыпных слоев из металлических шариков, являющихся перспективным демпфирующим элементом, защищающим конструкции от импульсных воздействий. При высоких параметрах воздействия гранулированные слои как высокопористые среды деформируются необратимым образом. С целью определения деформационных и прочностных характеристик производилось статическое сжатие насыпной среды на испытательной машине Zwick Amsler HA 100. Получена экспериментальная диаграмма деформирования одноосного сжатия гранулированного слоя из свинцовых шариков при статическом нагружении в широком диапазоне нагрузки до ликвидации свободной пористости. Диаграмма имеет нелинейный и необратимый характер. Проведено численное моделирование нагружения симметричных фрагментов слоя для двух вариантов регулярной упаковки шариков – тетраэдральной и кубической. В обоих вариантах наблюдается развитое пластическое течение материала, заполняющего поры, вплоть до полного компактирования. Расчетные диаграммы деформирования, как и экспериментальные, являются существенно нелинейными и необратимыми. Поведение экспериментальной кривой качественно соответствует поведению расчетных кривых. Эта кривая попадает в диапазон между кривыми деформирования насыпной среды с тетраэдральной и кубической идеальными упаковками шариков. Численное моделирование показало, что зоны резкого возрастания сопротивления пористого слоя связаны с ликвидацией свободной пористости.

*Ключевые слова:* слой шариков, пористая среда, эксперимент, статическая деформация, сжатие, нелинейность, необратимость, численное моделирование.

---

\* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты №16-08-00458а, №15-48-02333р\_поволжье\_a в части численных исследований) и Минобрнауки (госзадание 9.7057.2017/БЧ в части экспериментальных исследований).

## **Введение**

Насыпные слои являются перспективным демпфирующим элементом, защищающим конструкции от импульсных воздействий. В публикациях [1–3] приведены результаты экспериментов по определению параметров нагружения жесткой стенки, покрытой слоями различных гранулированных веществ, при действии воздушной ударной волны. Построены зависимости максимального давления на подложке от высоты слоя. Предложена модель, объясняющая усиление ударно-волновой нагрузки, основанная на рассмотрении движения насыпной среды при импульсном нагружении. В статьях [4–14] показано, что размещение слоя пористых насыпных слоев перед стенкой мишени уменьшило величину остаточного напряжения и энергии мишени примерно на 30 процентов, в то же время существенно уменьшая скорость приложенной нагрузки. В [15, 16] исследовалось распространение динамической нагрузки в гранулированных средах, состоящих из дисков, уложенных различным способом. Авторы зафиксировали, что распространение волн при динамической нагрузке зависит от диаметра дисков и способа их укладки. Скорость волны значительно падала в первых нескольких слоях, после чего процесс становился более медленным. Основными влияющими факторами на деформирование образцов являлись площадь контакта и трение между контактирующими дисками (гранулами). Статьи [17, 18] посвящены численному исследованию особенностей отражения волн в насыпных средах. Для исследования одномерных волновых процессов в насыщенных пористых средах разработана математическая модель, построенная методами механики многофазных сред. Рассмотрены процессы прохождения волной границы раздела газ – пористая среда и отражения от жесткой стенки, покрытой пористым материалом, проанализировано влияние упругих параметров пористой среды на процесс отражения; выполнено сопоставление численных результатов с экспериментальными данными других авторов. По результатам исследований сделан вывод, что пористый экран может как ослаблять, так и усиливать динамическое воздействие на преграду воздушной ударной волны. Степень усиления также зависит от толщины слоя, его структуры и размера гранул. В статьях [19, 20] исследовались демпфирующие свойства гранулированных слоев, состоящих из полых металлических сфер. Механизм демпфирования заключается в поглощении энергии воздействующего импульса вследствие больших деформаций и разрушения сфер. В монографиях Г.М. Ляхова [21, 22] подробно описаны экспериментально-теоретические исследования волновых процессов в грунтах. Использовались модели деформирования грунтов как вязкоупругих и вязкопластических сред. Приводится обширный обзор экспериментальных исследований деформирования песчаных грунтов насыпной плотности в плоских, цилиндрических и сферических волнах. Таким образом, за исключением грунтовых сред, в научной литературе существует небольшое количество работ, посвященных исследованию деформируемых пористых насыпных слоев в виде шариков или гранул. Полученные результаты ограничиваются малыми нагрузками, которые не вызывают развитое пластическое течение или разрушение материала шариков.

### **1. Экспериментальные исследования пористого гранулированного слоя**

В лаборатории физико-механических испытаний Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского на сервогидравлической машине Zwick Amsler HA 100

проведены статические исследования сжатия насыпного слоя из свинцовых шариков. Для эксперимента на сжатие была изготовлена оснастка, состоящая из двух элементов: толстостенного полого цилиндра высотой 40 мм и внутренним диаметром 40,2 мм и сжимающего поршня высотой 70 мм и диаметром 40 мм. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

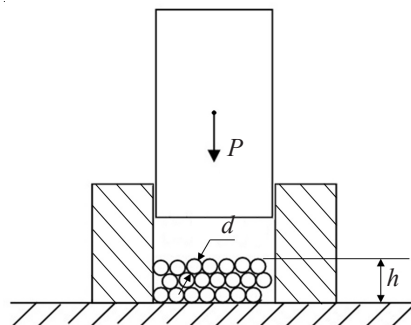


Рис. 1

Свинцовые шарики засыпались в цилиндр и сдавливались стальным высокопрочным поршнем. Шарики имели диаметр  $d = 2$  мм (что соответствует оружейной дроби №9), а толщина слоя  $h$  варьировалась от 20 до 35 мм. По толщине слоя укладывалось более 10 шариков. По результатам экспериментов была получена кривая напряжение–деформация для слоя, показанная на рис. 2. Насыпной слой шариков предполагался однородной пористой сплошной средой. Одноосная деформация слоя  $\epsilon$  определяется отношением перемещения поршня  $\Delta h$  к толщине начального слоя  $h$ . Напряжение  $\sigma$  определяется отношением силы  $P$ , возникшей в деформируемом материале, которую фиксирует высокоточный датчик силы в машине Amsler HA 100, к площади  $S$  сдавливающего цилиндра,  $S = 12,56$  см<sup>2</sup>. Нагружение слоя производилось в несколько этапов с разгрузкой по силе. На рис. 2 пунктирной линией показана линия разгрузки, близкая к прямой линии. Разгрузочный модуль  $E_r$  в проведенных испытаниях изменялся от 1,7 до 2,3 ГПа (модуль упругости свинца  $E = 18$  ГПа). Пластическое течение материала шариков развивается после достижения величины напряжения 1,45 МПа.

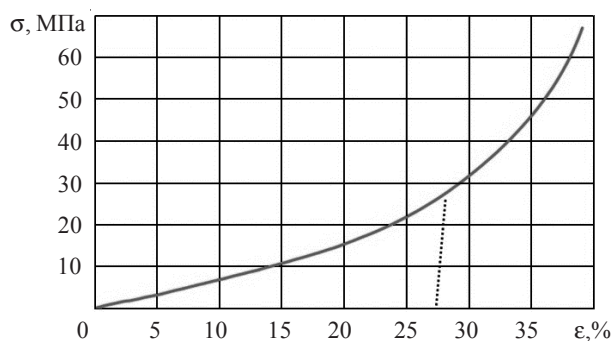


Рис. 2

По результатам статических испытаний видно, что деформирование слоя из свинцовых шариков по мере увеличения нагрузки сжатия обладает выраженной нелинейностью и необратимостью, что характерно для пористых сред.

## 2. Численное моделирование деформирования гранулированного слоя

Экспериментальные исследования, позволяющие определить характеристики при одноосном нагружении, не выявляют детальную картину пластического деформирования шариков. В целях определения особенностей деформирования слоя при

развитом пластическом течении проводится математическое моделирование сжатия отдельных симметричных фрагментов слоев. Предполагается, что все шарики одинакового размера и идеальной формы.

Для численного моделирования деформирования гранулированного слоя была выбрана ячейка симметрии и моделировались две задачи:

1) центры шариков образуют куб (свободная упаковка), в этом случае объемное содержание пор  $\alpha_1 = V_{\text{пор}}/V_{\text{полн}} = 0,48$ , где  $V_{\text{пор}}$  – объем пор,  $V_{\text{полн}}$  – объем всей ячейки симметрии (рис. 3 слева);

2) более плотная упаковка – центры ближайших шариков образуют правильный тетраэдр, в этом случае объемное содержание пор  $\alpha_1 = 0,26$  (рис. 3 справа).

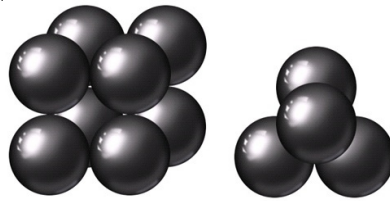


Рис. 3

Реальные гранулированные слои ввиду неидеальной формы и некоторого разброса размеров шариков, способа укладки и т.д. имеют, как правило, другие (промежуточные) значения объемного содержания пор. Например, в [6] получено объемное содержание пор  $\alpha_1 = 0,39$ . Проведенные оценки начального содержания пор в описываемых в настоящей статье экспериментах по сжатию гранулированного слоя также составляют  $\alpha_1 = 0,29-0,40$ . Поэтому есть основания полагать, что реальные параметры деформирования будут располагаться между параметрами деформирования выбранных вариантов идеальных упаковок.

Численное моделирование процессов деформирования пористого слоя из свинцовых шариков проводилось в вычислительной системе ANSYS v17.2 (лицензия ANSYS Academic Research, Customer #623640). Моделирование проводилось методом конечных элементов (КЭ). Для моделирования деформирования кубической упаковки ввиду симметрии достаточно 1/8 шарика. Численная конечно-элементная модель показана на рис. 4, сжатие проводилось абсолютно жесткой плоскостью против направления оси  $z$  до перемещения 0,5 мм (половина радиуса шарика).

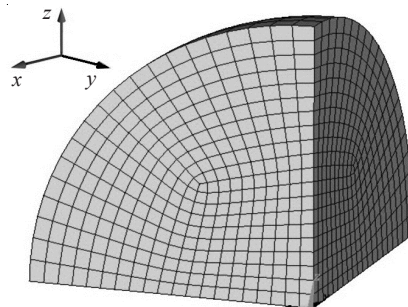


Рис. 4

Для построения конечно-элементной модели использовался 20-узловой КЭ второго порядка SOLID185 с сокращенным ( $2 \times 2 \times 2$ ) интегрированием. Объемная модель шарика состояла из 2000 КЭ. Для описания поведения материала использова-

лась мультилинейная модель пластичности с кинематическим упрочнением. Нелинейная диаграмма деформирования свинца (рис. 5) имела параметры: упругий модуль  $E = 18$  ГПа, коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ , предел текучести  $\sigma_T = 5$  МПа [23]. Нагружение производилось до перемещения нагружающей плоскости на величину 0,5 мм (одна четвертая диаметра шарика).

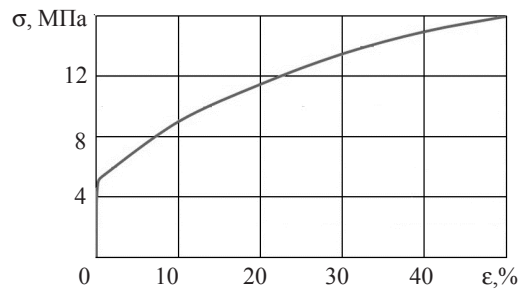


Рис. 5

Распределение эквивалентной пластической деформации показано на рис. 6, компоненты тензора пластической деформации по оси  $y$  изображены на рис. 7, а по оси  $z$  – на рис. 8.

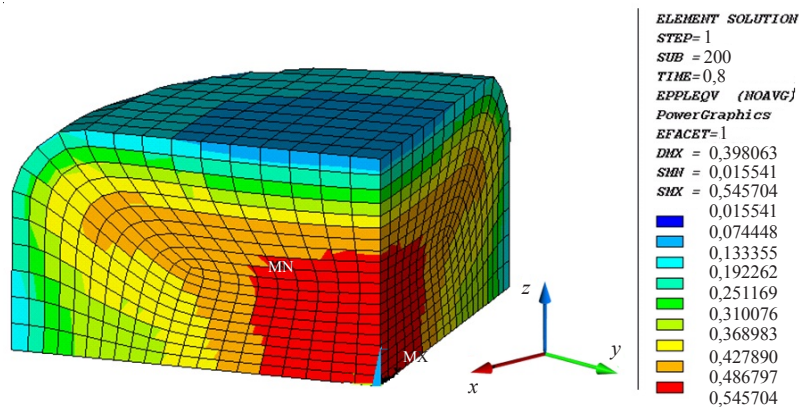


Рис. 6

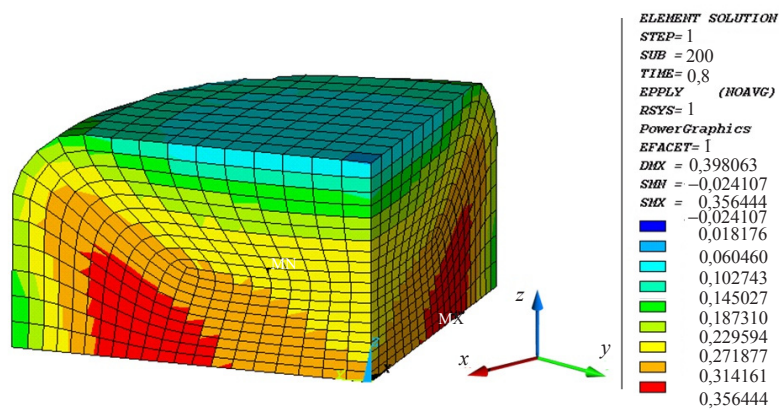


Рис. 7

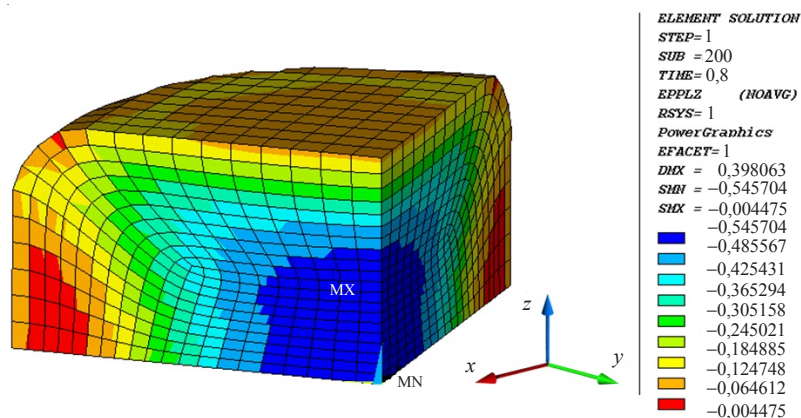


Рис. 8

Численно полученная зависимость напряжения от деформации фрагмента пористой гранулированной среды при кубической упаковке приведена на рис. 9 (красная кривая – напряжение по оси  $z$ , синяя кривая – напряжение по оси  $x$ , напряжение по оси  $y$  совпадает с напряжением по оси  $x$ ). Параметры усреднены по объему симметричного фрагмента гранулированной среды.

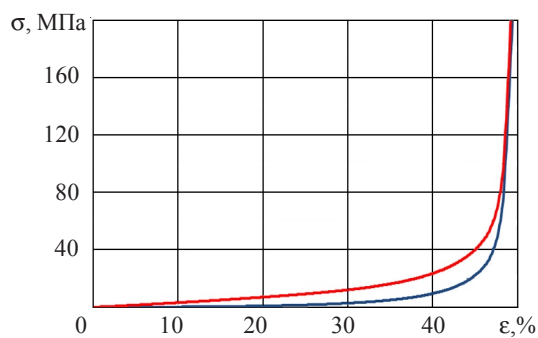


Рис. 9

Характерный рост напряжений в окрестности значения деформации 45% связан с тем, что практически все поры гранулированной среды заполнены и происходит сжатие материала, из которого изготовлены шарики (свинец). Этот факт иллюстрируется на рис. 10, где изображено изменение пористости  $\alpha_1$  в зависимости от деформации – синяя кривая.

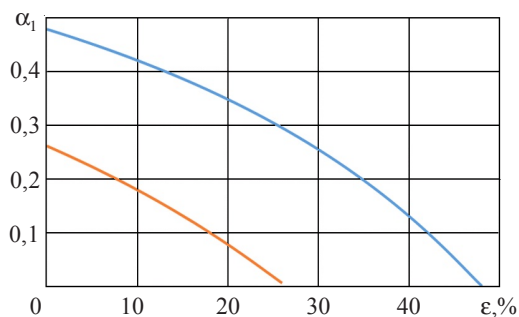


Рис. 10

Для численного моделирования плотной упаковки была выбрана ячейка симметрии, изображенная на рис. 11. Сжатие проводилось абсолютно жесткой плоскостью против направления оси  $z$  до перемещения 0,424 мм, полная высота модели составляла 1,63 мм. Для построения конечно-элементной модели использовался тот же узловой КЭ второго порядка. Модель симметричной ячейки состояла из двух шаровых секторов, каждый из которых состоит из 2000 КЭ, каждый сектор представляет собой 1/12 полного шара (сектор с углом  $60^\circ$  в плоскости  $xy$ ).

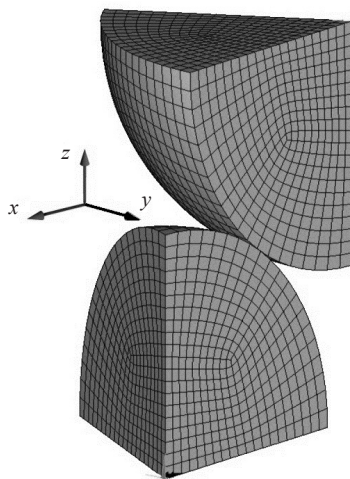


Рис. 11

На рис. 12 и 13 изображены распределения эквивалентных напряжений по Мизесу в МПа и эквивалентных пластических деформаций соответственно. Видно, что в результате пластического течения все криволинейные границы шариков становятся фактически плоскими, объемное содержание пор становится близким к нулю.

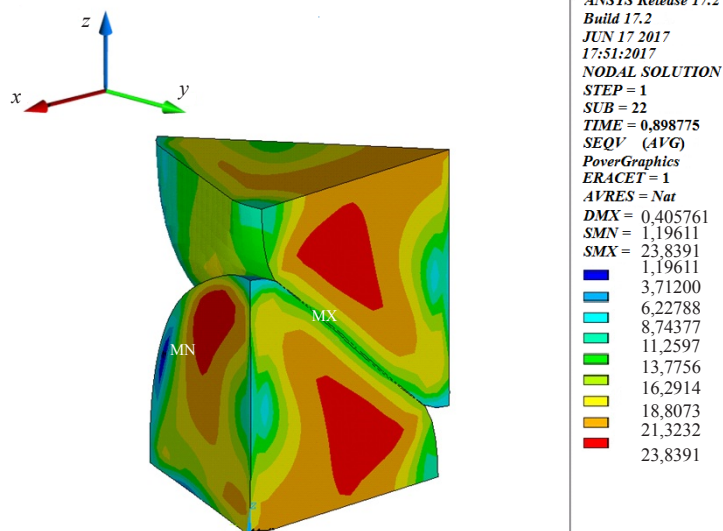


Рис. 12

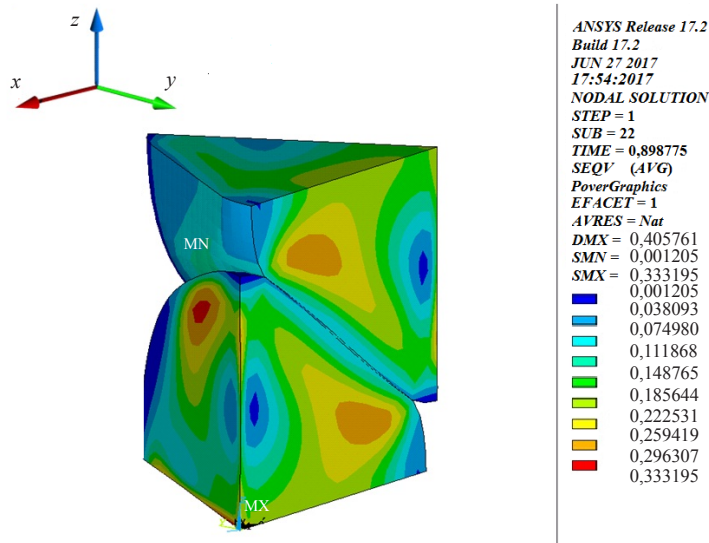


Рис. 13

На рис. 14 изображены кривые зависимости напряжения от деформации по оси нагружения  $z$ : красная линия – численная кривая для плотной тетраэдральной упаковки шариков, синяя – численная кривая для кубической упаковки, зеленая – кривая, полученная экспериментально для гранулированного слоя при статическом испытании. Видно, что экспериментальная кривая располагается между численными кривыми, что подтверждает предположение о промежуточном характере расположения кривых деформирования для реальных (неидеальных) упаковок шариков в гранулированном слое.

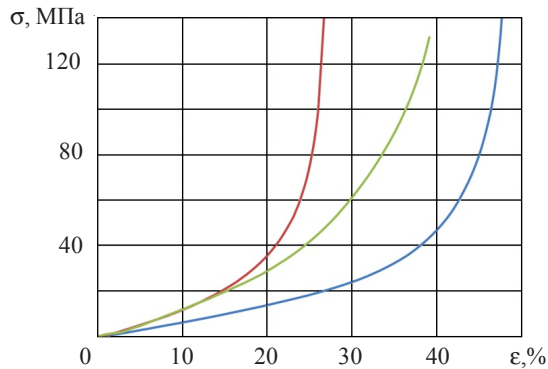


Рис. 14

Поведение полученных численно кривых существенно зависит от начальной упаковки шариков, то есть от значения начальной пористости среды, характеризующей параметром  $\alpha_1$ . На рис. 10 было показано расчетное изменение параметра  $\alpha_1$  в зависимости от величины деформации слоя, красная кривая показывает изменение пористости для тетраэдральной упаковки. Сравнение кривых на рис. 14 и рис. 10 показывает, что, как и для кубической упаковки, зоны резкого возрастания сопротивления пористого слоя связаны с ликвидацией свободной пористости.



## Заключение

Получена экспериментальная диаграмма деформирования одноосного сжатия гранулированного слоя из свинцовых шариков при статическом нагружении. Диаграмма имеет нелинейный и необратимый характер. Проведено численное моделирование нагружения симметричных фрагментов слоя для двух вариантов регулярной упаковки шариков – тетраэдральной и кубической. В обоих вариантах наблюдается развитое пластическое течение материала, заполняющего поры, вплоть до полного компактирования. Численные диаграммы деформирования, как и экспериментальные, являются существенно нелинейными и необратимыми. Поведение экспериментальной кривой качественно соответствует поведению расчетных кривых. Эта кривая попадает в диапазон между кривыми деформирования насыпной среды с тетраэдральной и кубической идеальными упаковками шариков. Численное моделирование показало, что зоны резкого возрастания сопротивления пористого слоя связаны с ликвидацией свободной пористости.

### Список литературы

1. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. *Фугасные эффекты взрывов*. СПб.: Изд-во «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. Гельфанд Б.Е., Медведев С.П., Поленов А.Н., Фролов С.М. Передача ударно-волновой нагрузки насыпными средами. *Прикладная механика и техническая физика*. 1988. №2. С. 115–121.
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. 15–27.
5. 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.
6. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Shock waves attenuation by granular filters. *International Journal of Multiphase Flow*. 2001. Vol. 27 (4). P. 617–634.
7. 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. P. 432–443.
8. 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(3). P. 473–491.
9. Britan A., Ben-Dor G. Shock tube study of the dynamical behavior of granular materials. *International Journal of Multiphase Flow*. 2006. Vol. 32(5). P. 623–642.
10. 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. Iss. 9. ID: 093519-093519-12.
11. 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.
12. Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J. P. Head-on collision of a planar shock wave with a granular layer. S.C. Schmidt, W.C. Tao (Eds.). *Proceedings of the ISCCM Conference. Part 2*. Seattle. WA. USA. P. 971–974.
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. Милявский В.В., Фортов В.Е., Фролова А.А., Хищенко К.В., Чарахчян А.А., Шур-

шалов Л.В. О механизме усиления давления при увеличении пористости сред, ударно сжимаемых в конических и цилиндрических мишенях. *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2010. Т. 50. №12. С. 2195–2207.

15. 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-Verlag. 1990. P. 367–383. DOI: 10.1007/978-1-4613-8919-4\_23.

16. Shukla A., Damania C. Experimental investigation of wave velocity and dynamic contact stresses in an assembly of disks. *Experimental Mechanics*. 1987. Vol. 27. Iss. 3. P. 268–281.

17. 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.

18. 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.

19. Ruan H.H., Gao Z.Y., Yu T.X. Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2006. No 48. P.117–133.

20. Демарева А.В., Кибец А.И., Кибец Ю.И., Фролова И.А., Шошин Д.В., Шушкина Ю.А. Конечно-элементное решение нелинейных задач деформирования МНЗ-заполнителя при ударном нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2016. Т. 78. №1. С. 60–69.

21. Ляхов Г.М. *Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах*. М.: Наука, 1982. 288 с.

22. Ляхов Г.М. *Основы динамики взрывных волн в грунтах и горных породах*. М.: Недра, 1974. 191 с.

23. Туманов А.Т. *Конструкционные материалы*. Т. 2. М.: Советская энциклопедия, 1964. 408 с.

#### References

1. Gelfand B.E., Silnikov M.V. *Fugasnye efekty vzryvov [High Explosive Effects]*. St. Petersburg. Poligon Publ. 2002. 272 p. (In Russian).

2. Gelfand B.E., Gubanov A.V., Timifeev E.I. Vzaimodeystvie vozduzhnykh udarnykh voln s poristym ekranom [Interaction of air shock waves with a porous screen]. *Izvestiya Rossiyskoy Akademii Nauk. Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid Dynamics]*. 1983. No 4. P. 79–84 (In Russian).

3. Gelfand B.E., Medvedev S.P., Polenov A.N., Frolov S.M. Peredacha udarno-volnovoy nagruzki nasypnymi sredami [Transfer of shock-wave loading in bulk media]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]*. 1988. No 2. С. 115–121 (In Russian).

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. 15–27.

5. 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.

6. Britan A., Ben-Dor G., Igra O., Shapiro H. Shock waves attenuation by granular filters. *International Journal of Multiphase Flow*. 2001. Vol. 27 (4). P. 617–634.

7. 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. P. 432–443.

8. 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(3). P. 473–491.

9. Britan A., Ben-Dor G. Shock tube study of the dynamical behavior of granular materials. *International Journal of Multiphase Flow*. 2006. Vol. 32(5). P. 623–642.

10. 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. Iss. 9. ID: 093519-093519-12.

11. 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.

12. Britan A., Elperin T., Igra O., Jiang J.P. Head-on collision of a planar shock wave with a granular layer. S.C. Schmidt, W.C. Tao (Eds.). *Proceedings of the ISCCM Conference. Part. 2*. Seattle. WA. USA. P. 971–974.

13. Altshuler L.V., Kruglikov B.C. Zatukhanie sil'nykh 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. Milyavskii V.V., Fortov V.E., Khishchenko K.V., Frolova A.A., Charakhch'yan A.A., Shurshalov L.V. On the mechanism of pressure increase with increasing porosity of the media compressed in conical and cylindrical targets. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2010. Vol. 50. No 12. P. 2082–2094.

15. 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-Verlag. 1990. P. 367–383. DOI: 10.1007/978-1-4613-8919-4\_23.

16. Shukla A., Damania C. Experimental investigation of wave velocity and dynamic contact stresses in an assembly of disks. *Experimental Mechanics*. 1987. Vol. 27. Iss. 3. P. 268–281.

17. Gubaidullin A.A., Dudko D.N., Urmancheev S.F. Modelirovanie vzaimodeystviya vozdushnoy udarnoy volny s poristym ekranom [Modeling of the interaction between an air shock wave and a porous screen]. *Fizika goreniya i vzryva [Combustion, Explosion, and Shock Waves]*. 2000. Vol. 36. No. 4. P. 496–505 (In Russian).

18. Boldyreva O.Yu., Gubaidullin A.A., Dudko D.N., Kutushev A.G. Chislennoe issledovanie peredachi udarno-volnovoy nagruzki ekraniruemoy ploskoy stenke cherez sloy poroshkoobraznoy sredy i razdelyayushchiy ikh vozdushnyy zazor [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]. *Fizika goreniya i vzryva [Combustion, Explosion, and Shock Waves]*. 2007. Vol. 43. No 1. P. 114–123 (In Russian).

19. Ruan H.H., Gao Z.Y., Yu T.X. Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2006. No 48. P. 117–133.

20. Demareva A.V., Kibets A.I., Kibets Yu.I., Frolova I.A., Shoshin D.V., Shushkina Yu.A. Konechno-elementnoe reshenie nelineynykh zadach deformirovaniya MHS-zapolnitelya pri udarnom nagruzhении [Finite-element analysis of nonlinear problems of deformation of mhs filling under impact loading]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2016. Vol. 78. No 1. P. 60–69 (In Russian).

21. Liakhov G.M. *Volny v gruntakh i poristyykh mnogokomponentnykh sredakh [Waves in Soils and Porous Multicomponent Media]*. Moscow. Nauka Publ. 1982. 288 p. (In Russian).

22. Liakhov G.M. *Osnovy dinamiki vzryvnykh voln v gruntakh i gornyykh porodakh [Basics of Dynamics of Explosive Waves in Soils and Rocks]*. Moscow. Nedra Publ. 1974. 191 p. (In Russian).

23. Tumanov A.T. *Konstruktivnyye materialy [Structural Materials]*. Vol. 2. Moscow. Sovetskaya entsiklopediya Publ. 1964. 408 p. (In Russian).

## DEFORMATIONAL PROPERTIES OF A FILLING LAYER OF LEAD BALLS

Kochetkov A.V.<sup>1</sup>, Leontyev N.V.<sup>2</sup>, Modin I.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,  
Nizhni Novgorod, Russian Federation

<sup>2</sup>Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russian Federation

The results of a static investigation of the compression of granular layers from metal balls are presented. Metal balls are a promising damping element of the protective structures from explosive

and impulse actions. With intensive actions, the granular layers deform irreversibly. Static compression of a filling medium was done at the Zwick Amsler HA 100 test machine. An experimental deformation diagram was obtained for uniaxial compression of a granulated layer of lead balls under static loading in a wide range of loading values up to the liquidation of free porosity. The diagram has a nonlinear and irreversible character. Loading of symmetric fragments of the layer has been numerically modeled for two versions of regular packing of the balls – tetrahedral and cubic. In both versions developed plastic flow of the material, filling the pores up to complete compaction, is observed. The numerical deformation diagrams, similar to the experimental ones, are strongly nonlinear and irreversible. The behavior of the experimental curve qualitatively corresponds to that of the numerical curves. This curve in the range between the deformation curve of the filling layer with tetrahedral and cubic ideal packing of the balls. Numerical modeling revealed that the zones of abrupt increase of resistance of the porous material are connected with liquidation of free porosity.

*Keywords:* layer of balls, porous medium, experiment, static deformation, compression, nonlinearity, irreversibility, numerical modeling.