

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГРАНУЛИРОВАННОГО СЛОЯ ПРИ СЖАТИИ*

© 2018 г.

**Кочетков А.В.¹, Леонтьев Н.В.²,
Модин И.А.¹, Турыгина И.А.¹, Чекмарев Д.Т.²**

¹*Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

²*Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

kochetkov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 20.04.2018

Насыпные слои из металлических шариков используются в качестве демпфирующих элементов, защищающих конструкции от импульсных воздействий. При высоких параметрах воздействия гранулированные слои деформируются как высокопористые среды, и деформация может быть необратимой. Для моделирования процессов сжатия слоев необходимы знания их деформационных и прочностных характеристик. Проведено численное моделирование квазистатического и динамического нагружения симметричного фрагмента гранулированного слоя для одного из вариантов регулярной упаковки шариков – кубической. Численное моделирование динамического деформирования фрагмента пористого слоя из свинцовых шариков проводилось в вычислительной системе ANSYS по неявной схеме Ньюмарка с автоматическим выбором шага. Контактная задача решалась методом конечных элементов с использованием мультилинейной модели пластичности с кинематическим упрочнением. Для моделирования деформирования кубической упаковки ввиду симметрии достаточно одной восьмой части шарика. Сжатие проводилось абсолютно жесткой плоскостью, движущейся с постоянной скоростью в течение заданного интервала времени. Поведение полученных численных диаграмм сжатия качественно соответствует поведению экспериментальных диаграмм деформирования одноосного сжатия гранулированного слоя из свинцовых шариков при квазистатическом и динамическом нагружении в широком диапазоне нагрузки. Диаграммы носят нелинейный и необратимый характер. Показано, что существенное влияние на отличие поведения квазистатических и динамических диаграмм деформирования пористого слоя оказывают два основных фактора: ограниченное время действия нагружающего импульса в динамическом режиме и отличие динамической диаграммы деформирования базового материала (свинца при высокой скорости деформации) от квазистатической диаграммы.

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты №17-308-50038 мол_нр, №18-38-00157 мол_а).

Ключевые слова: слой шариков, симметричный фрагмент, численное моделирование, статика, динамика, деформация, сжатие, нелинейность, необратимость.

Введение

Одним из элементов, защищающих конструкции от импульсных воздействий, являются насыпные слои [1–3]. В научной литературе существует ряд работ, посвященных исследованию деформируемых пористых насыпных слоев в виде шариков или гранул [4–14], 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 [15, 16]. В проведенных в последнее время экспериментальных исследованиях сжатия гранулированных слоев из свинцовых шариков были получены высокие степени сжатия, вызывающие развитое упругопластическое течение материала как в квазистатическом, так и в динамическом режимах нагружения [17, 18]. По результатам экспериментов были построены кривые «напряжение–деформация» для слоя из свинцовых шариков (рис. 1: для динамического нагружения – кривая 1, для квазистатического нагружения – кривая 2). Погрешность в проведенных экспериментах на динамическое сжатие не превышала 5–7%, а для квазистатического сжатия – 2–5% [19]. С увеличением деформации возрастает отличие динамической диаграммы деформирования от квазистатической. На динамической диаграмме помимо участков нагружения, полученных в результате сжатия образца прямыми волнами от ударяемого стержня, видны участки разгрузки в результате действия отраженных волн напряжения от торца нагружающего стержня при отскоке ударника (методика Кольского с разрезным стержнем Гопкинсона [19, 20]). Таким образом, происходит процесс динамического нагружения образца в несколько циклов с разгрузками в течение одного эксперимента. Разгрузочные кривые, как и в квазистатическом случае (см. рис. 1), близки к прямым линиям. Значения модуля разгрузки и в квазистатическом, и в динамическом режимах нагружения находятся в интервале от 1 до 6 ГПа.

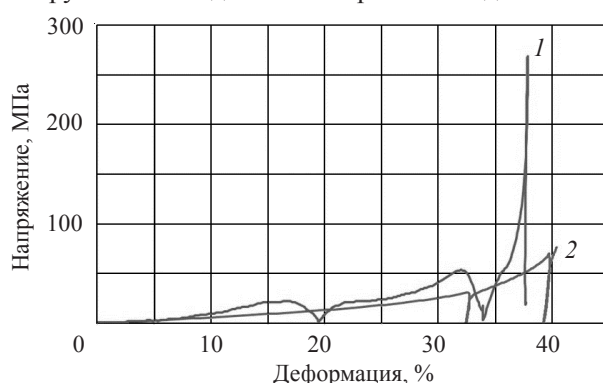


Рис. 1. Экспериментальные диаграммы деформирования

Кривые при всех режимах нагружения имеют нелинейный и необратимый характер, при высоких нагрузках происходит сильное пластическое течение материала. Наблюдается существенное отличие динамических диаграмм деформирования от статических.

Численными методами исследованы факторы, которые могут оказать влияние на отличие динамических диаграмм деформирования гранулированного слоя от статических:

- ограниченное время действия нагружающего импульса в динамическом режиме;
- отличие статической диаграммы деформирования базового материала (свинца) от динамической диаграммы.

Результаты численного моделирования

В целях определения особенностей деформирования слоя при развитом пластическом течении проводится математическое моделирование сжатия отдельного симметричного фрагмента слоя. Предполагается, что все шарики одинакового размера и идеальной формы. Некоторые результаты моделирования квазистатического сжатия фрагментов гранулированных слоев приведены в [17]. Для сравнительного численного моделирования динамического и квазистатического деформирования слоя была выбрана ячейка симметрии, в которой центры шариков образуют куб (рис. 2), 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.

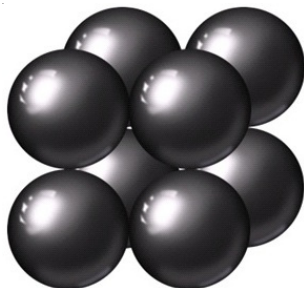


Рис. 2. Кубическая укладка шариков в слое

Реальные гранулированные слои ввиду наличия неидеальной формы, некоторого разброса размеров шариков, способа укладки и т.д. имеют, как правило, другие значения объемного содержания пор, например в экспериментах [6] объемное содержание пор составляло $\alpha_1 = 0,39$. С точки зрения протекающих процессов есть основания полагать, что и для кубической ячейки симметрии можно получить реалистическую оценку вклада различных факторов, отличающих динамические режимы нагружения слоя от квазистатических режимов.

Численное моделирование квазистатических процессов деформирования пористого слоя из свинцовых шариков проводилось методом конечных элементов (КЭ) в вычислительной системе ANSYS v.17.2 (Лицензия ANSYS Academic Research, Customer #623640). Для моделирования деформирования кубической упаковки ввиду симметрии достаточно рассматривать деформирование кубического объема со стороны, равной радиусу шара, который содержит 1/8 шара и свободное пространство. Численная конечно-элементная модель показана на рис. 3, сжатие проводилось абсолютно жесткой плоскостью против направления вертикальной оси Z до перемещения, равного 0,5 мм (половина радиуса шарика R). Для построения конечно-элементной модели использовался 20-узловой КЭ второго порядка SOLID185

с сокращенным (2×2×2) интегрированием. Объемная модель шарика состояла из 2000 КЭ.

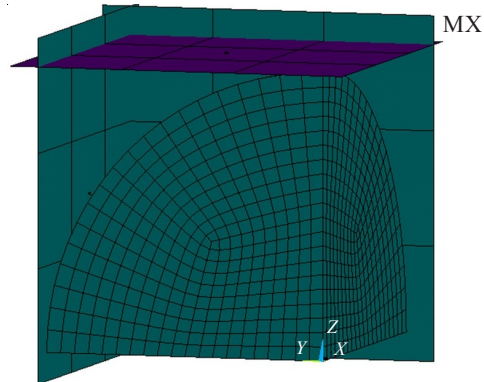


Рис. 3. Расчетная область

Для описания поведения материала использовалась мультилинейная модель пластичности с кинематическим упрочнением. Нелинейная диаграмма деформирования свинца с пределом текучести $\sigma_T = 5$ МПа, приведенная на рис. 4, взята из [21].

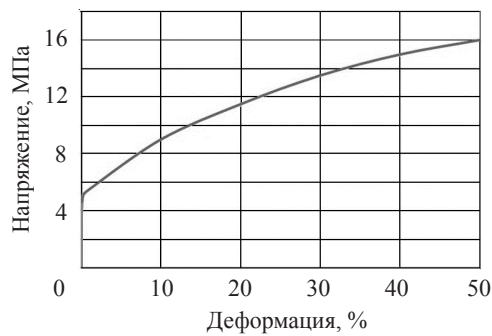


Рис. 4. Диаграмма деформирования свинца

Численные диаграммы деформирования фрагмента гранулированного слоя вдоль оси Z показаны на рис. 5.

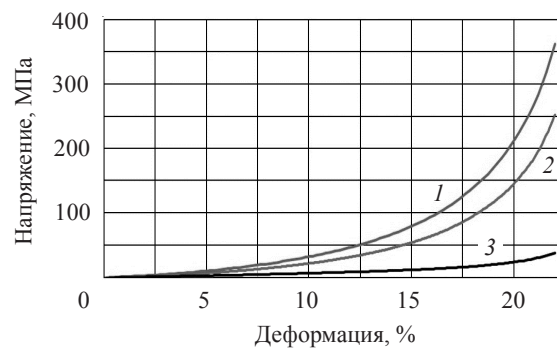


Рис. 5. Численные диаграммы деформирования

Диаграмма связывает средние напряжения с деформацией фрагмента. Вычисление средних напряжений проводилось по формуле:

$$\langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{V_{c.cell}} \sum_e \sigma_{ij}^e V_c^e,$$

где скобки обозначают среднее значение; $V_{c.cell}$ – текущий объем деформируемой области, равный $R^2(R - U_z)$; U_z – смещение вертикальной плоскости; σ_{ij}^e – напряжения в конечном элементе; V_c^e – текущий объем конечного элемента.

На рис. 5 кривая 1 получена при динамическом моделировании с использованием динамической диаграммы свинца, кривая 2 – при динамическом моделировании с использованием квазистатической диаграммы материала, кривая 3 – при квазистатическом режиме нагружения. Видно, что динамические кривые располагаются значительно выше, чем квазистатическая, что иллюстрирует влияние скорости нагружения в динамическом режиме. Качественно похожее расположение кривых получается и при экспериментальных испытаниях (см. рис. 1). Использование динамической диаграммы деформирования свинца в динамическом режиме нагружения (кривая 1) также дает заметное отличие в динамическом поведении пористой среды при использовании квазистатической диаграммы свинца (кривая 2).

Задача динамики решалась в ANSYS v. 17.2 по неявной схеме Ньюмарка с автоматическим выбором шага. Начальная величина шага по времени 0,1 мкс, максимально допустимая – 20 мкс. Демпфирование по Рэлею $\alpha = \beta = 0,01$. Нагружение в динамическом режиме производилось плоскостью, равномерно двигающейся со скоростью 1,1 м/с в течение интервала времени $T = 0,4$ мс. Длительность импульса соответствовала времени нагружения образца гранулированного слоя в экспериментальных исследованиях [18]. Амплитуда скорости выбиралась с целью получить величины деформации фрагмента слоя до 0,43. Моделировались два варианта динамического нагружения симметричной ячейки слоя. Первый вариант рассчитывался с квазистатической диаграммой деформирования свинца (см. рис. 4), той же самой, как и при статическом режиме нагружения. Второй вариант – с динамической диаграммой деформирования свинца, она была получена увеличением предела текучести в 1,5 раза с тем же модулем упругости по рекомендациям [22], учитывающим влияние скорости деформации. В динамических экспериментах [18] скорость деформации была порядка 1000 с^{-1} . Расчетные распределения динамических пластических деформаций и напряжений в симметричном фрагменте показаны на рис. 6, они подобны распределениям для квазистатической задачи [17].

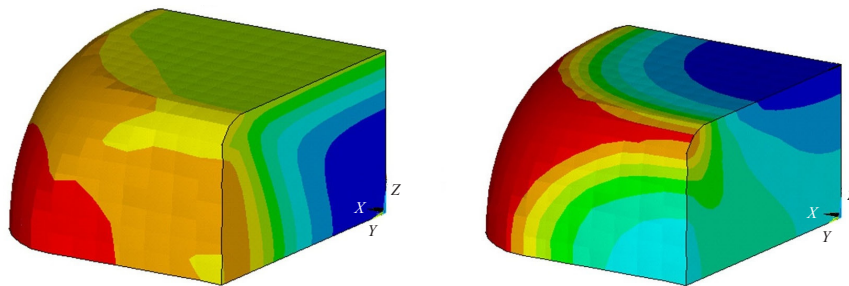


Рис. 6. Распределение эквивалентной пластической деформации (слева) и напряжения по оси Z (справа)

Заключение

Полученные численно нелинейные диаграммы деформирования пористого гранулированного слоя при квазистатическом и динамическом режимах нагружения качественно соответствуют поведению экспериментальных диаграмм. С помощью численного моделирования динамического и квазистатического сжатия симметричного фрагмента пористого гранулированного слоя из свинцовых шариков при кубической упаковке показано, что существенное влияние на поведение квазистатических и динамических диаграмм деформирования пористого слоя оказывают два основных фактора: ограниченное время действия нагружающего импульса в динамическом режиме и отличие динамической диаграммы деформирования базового материала (свинца при высокой скорости деформации) от квазистатической диаграммы.

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. P. 1–14.
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. Iss. 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. Iss. 5. 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. Iss. 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. Iss. 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. No 9. DOI: 10.1063/1.2197028.
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. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 370. Iss.1. P. 971–974.
13. Альтшулер Л.В., Кругликов Б.С. Затухание сильных ударных волн в двухфазных и гетерогенных средах. *ПМТФ*. 1984. №5. С. 24–29.
14. Милявский В.В., Фортов В.Е., Фролова А.А., Хищенко К.В., Чарахчян А.А., Шуршалов 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. 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.

16. 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.

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. 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. P. 16–27. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.02.

19. 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 quasistatic stressing. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No 3. P. 252–262. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.17.

20. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *International Journal of Impact Engineering*. 1995. Vol. 16. Iss. 2. P. 321–330.

21. Туманов А.Т. *Конструкционные материалы*. М.: Советская энциклопедия, 1965. 186 с.

22. Мержиевский Л.А., Палецкий А.В. Расчет диаграмм динамического деформирования материалов и сплавов. *Физическая мезомеханика*. 2001. Т. 4. №3. С. 85–96.

References

1. Gel'fand B.E., Silnikov M.V. *Fugasnye efekty vzryvov [Explosive High Explosive Effects]*. SPb. Poligon Publ. 2002. 272 p. (In Russian).

2. Gel'fand B.E., Gubanov A.V., Timofeev E.I. Interaction of shock waves in air with a porous screen. *Fluid Dynamics*. 1983. Vol. 18. Iss. 4. P. 561–566.

3. Gel'fand B.E., Medvedev S.P., Polenov A.N., Frolov S.M. Transmission of a shock load by bulk media. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1988. Vol. 29. Iss. 2. P. 268–273.

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. P. 1–14.

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. Iss. 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. Iss. 5. 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. Iss. 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. Iss. 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. No 9. DOI: 10.1063/1.2197028.

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. *AIP Conference Proceedings*. Vol. 370. Iss. 1. P. 971–974.

13. Al'tshuler L.V., Kruglikov B.S. Attenuation of strong shock waves in two-phase and heterogeneous media. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1984. Vol. 25. Iss. 5. P. 672–676.
14. Milyavskii V.V., Fortov V.E., Frolova A.A., Khishchenko K.V., 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. Iss. 12. P. 2082–2094.
15. Gubaidullin A.A., Dudko D.N., Urmanceev S.F. Modeling of the interaction between an air shock wave and a porous screen. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2000. Vol. 36. Iss. 4. P. 496–505.
16. 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. Iss. 1. P. 114–123.
17. Kochetkov A.V., Leontyev N.V., Modin I.A. Deformatsionnye svoystva nasypnogo sloya iz svintsovykh sharikov [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. 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. P. 16–27. DOI: 10.15593/perm.mech/2017.4.02.
19. 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 quasistatic stressing. *PNRPU Mechanics Bulletin*. 2016. No 3. P. 252–262. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.3.17.
20. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. *International Journal of Impact Engineering*. 1995. Vol. 16. Iss. 2. P. 321–330.
21. Tumanov A.T. *Konstruksionnye materialy [Structural material]*. Moscow. Sovetskaia entsiklopedia Publ. 1965. 186 p. (In Russian).
22. Merzhievsky L.A., Paletsky A.V. Raschet diagramm dinamicheskogo deformirovaniya materialov i splavov [Calculations for diagrams of dynamic deformation of metals and alloys]. *Fizicheskaya mezhmekhanika [Physical Mesomechanics]*. 2001. Vol. 4. No 3. P. 85–96 (In Russian).

NUMERICALLY MODELING DEFORMATION OF A GRANULAR BED LOADED IN COMPRESSION

**Kochetkov A.V.¹, Leontyev N.V.², Modin I.A.¹,
Turygina I.A.¹, Chekmarev D.T.²**

¹*Research Institute for Mechanics, National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

²*National Research Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, Nizhny Novgorod, Russian Federation*

Filling layers of metal bolls are used as damping elements protecting structures from pulsed effects. When such effects have high parameters, granular layers are deformed as highly porous media and deformation can be irreversible. To model compression processes of such layers, it is necessary to know their deformation and strength characteristics. There exist experimentally obtained deformation diagrams for uniaxial compression of granulated layers of lead balls under quasi-static and dynamic loading in a wide loading range. The diagrams have a nonlinear and irreversible character. Quasi-static and dynamic loading of a symmetric fragment of a granulated layer has been numerically modeled for one of the versions of regularly packed balls, a cubic one. Dynamic deformation of a fragment of a porous layer of lead balls was numerically simulated in the ANSYS computational

system using implicit Newmark's scheme with automatic choice of step. The contact problem was analyzed with the finite element method using a multi-linear model of plasticity with kinematic hardening. In view of the symmetry, only one-eighth of a ball is enough to model deformation of a cubic pack. Compression was exerted by an absolutely rigid plane moving at a constant velocity during a preset time interval. The behavior of the obtained numerical compression diagrams qualitatively corresponds to the behavior of the experimental ones. It is shown that the difference in the behavior of quasi-static and dynamic diagrams of deformation of porous layers is significantly influenced by the two main factors: limited duration of the loading pulse in the dynamic mode and the difference between the dynamic deformation diagram of the base material (lead under high strain rate) and the quasi-static diagram.

Keywords: layer of balls, symmetric fragment, numerical modeling, statics, dynamics, deformation, compression, nonlinearity, irreversible character.