



УДК 550.34

Член-кореспондент НАН України В. А. Даниленко, С. В. Микуляк,
В. О. Поляковський

Експериментальне дослідження динамічного деформування структурованого геофізичного середовища

Проведено експериментальне дослідження процесів деформування структурованого модельного середовища, утвореного елементами у вигляді куль однакового діаметра, під дією імпульсного навантаження. Відзначається, що діаграми деформування такого середовища залежать від розмірів елементів структури та від характеру їх взаємодії. Збільшення розміру структурних елементів призводить до значного підвищення значень залишкових деформацій, а зміна характеру взаємодії шляхом додавання в середовище флюїду змінює опуклість діаграми в фазі навантаження. Також було досліджено особливості деформування структурованого середовища при багаторазовому навантаженні. Встановлено, що збільшення кратності навантаження призводить до поступового ущільнення середовища і після 4–5 навантажень діаграма деформування залишається незмінною.

Механізми деформування структурованих природних середовищ, зокрема сипучих, за своїми особливостями значно відрізняються від процесів деформування однорідних матеріалів. Про це свідчать експерименти з використанням оптичних методів [1–6], методу нейтронної дифракції [7] та методів із застосуванням замірювань силових характеристик в окремих елементах структури [8–10]. Структуровані середовища такого типу мають значно більше внутрішніх степенів вільності, між якими відбувається неперервний процес перерозподілу енергії і це впливає на характер їх деформування. Такий перерозподіл енергії залежить від структурної будови, форми структурних елементів, характеру їх взаємодії, наявності флюїдів та від швидкості деформування тощо.

У даному повідомленні експериментально досліджується вплив розмірів елементів структури та характеру їх взаємодії на макрохарактеристики модельного структурованого середовища, зокрема на діаграму деформування, при його імпульсному навантаженні.

Експериментальні дослідження деформування структурованих середовищ проводили на установці, яку ілюструє рис. 1. У товстостінному циліндрі, закріпленому на металевій плиті,

© В. А. Даниленко, С. В. Микуляк, В. О. Поляковський, 2013

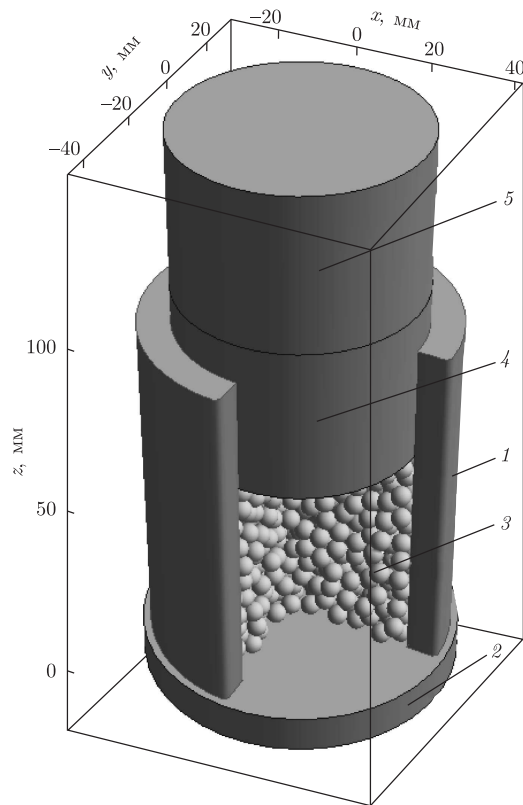


Рис. 1. Схематичне зображення установки для дослідження деформування структурованого середовища: 1 — циліндр; 2 — плита; 3 — масив куль; 4 — поршень; 5 — ударник

знаходиться масив металевих кульок однакового розміру з розташованим на ньому поршнем. Металевий ударник, падаючи з певної висоти, ударяється об поршень і таким чином здійснює імпульсне навантаження поршня, який, в свою чергу, передає навантаження на структуроване середовище, що знаходиться в циліндрі.

Поршень складається з двох частин, між якими встановлено датчик сили. Зміщення поршня реєструється за допомогою датчика — трубки з прорізом, з одного боку якої встановлений фотоелемент, а з іншого — джерело світла. На поршні закріплена шторка зі спеціальним профілем, що частково перекриває світловий потік, який випромінює джерело. Фотоелемент формує відповідну електричну напругу, яка надалі реєструється числовим осцилографом.

Для згладжування імпульсу навантаження використовували гумову прокладку, розташовану на верхній поверхні поршня, удар по якій наносився ударником. Необхідність її використання зумовлена тим, що за реальних умов створити ідеально плоский ударний фронт надзвичайно складно, оскільки незначна нерівність на поверхні ударника чи поршня або незначне відхилення ударника від вертикалі призводить до того, що на осцилограмах з'являються високочастотні паразитичні осциляції та, крім того, використання прокладки призводить до згладжування імпульсів. Це також дає змогу отримувати подібні імпульси при однакових ударах.

За описаною вище методикою було проведено три серії досліджень деформування структурованих середовищ. У першій — середовище складалося з металевих кульок діаметром

3 мм, у другій — це саме середовище було насичене флюїдом (мастилом), у третій — досліджувалось деформування кульок діаметром 5 мм. Кількість структурних елементів обирали з умови рівних об'ємів. Найбільш характерні часові залежності початкового навантаження, деформації середовища та відповідні діаграми деформування демонструє рис. 2. Як видно, діаграми деформування масивів з різними структурними елементами мають істотні відмінності. Збільшення розміру структурних елементів призводить до значного підвищення значень залишкових деформацій майже в 1,8 раза.

Наявність у середовищі флюїду змінює характер його деформування. В цьому випадку значно зменшується коефіцієнт тертя між структурними елементами середовища, що призводить до збільшення швидкості його деформування, а отже, до швидкої переупаковки структурних елементів і, як наслідок, — до різкого зростання жорсткості середовища. В результаті взаємодії поршня з таким середовищем останній набуває значного прискорення в зворотному напрямі. Присутність у середовищі флюїду також впливає на форму діаграми деформування: без флюїду стиснення середовища відбувається по опуклій кривій вгору (див. *a* на рис. 2), при наявності флюїду — опуклість обернена униз (див. *б*).

Слід відзначити, що в окремих випадках характер деформування залежить від початкової упаковки масиву. Так, імовірно початкове розташування ланцюжків куль в одну лінію, перпендикулярну площині навантаження, спричинює збільшення жорсткості удару. Поршень після взаємодії з середовищем рухається в зворотному напрямі. Деформації при навантаженні такого середовища значно знижуються.

Також було проведено експерименти з деформування гранульованого середовища при багаторазовому імпульсному навантаженні. Згідно з отриманими результатами, при збільшенні кількості послідовних навантажень спостерігається поступове ущільнення середовища, що призводить до збільшення жорсткості удару. В результаті спостерігається зростання амплітуди початкового імпульсу і зменшення його тривалості. Діаграми деформування, що побудовані для середовищ із кульок двох різних діаметрів й при багаторазовому навантаженні, демонструє рис. 3. З рисунка видно, що зі збільшенням кратності навантаження масиви кульок поступово ущільнюються, що призводить до зниження їх залишкових деформацій. Незалежно від розмірів структурних елементів повне ущільнення настає при 4–5 навантаженнях. Після повного ущільнення масиву спостерігається значний рух поршня в зворотному напрямі.

Таким чином, нами проведено ряд експериментів з деформування структурованого модельного середовища, утвореного елементами у вигляді куль однакового діаметра. Розглянуто два випадки розмірів структурних елементів: $d = 3$ мм й $d = 5$ мм. Отримані в експериментах діаграми деформування масивів із різними структурними елементами мають істотні відмінності. Збільшення розміру структурних елементів призводить до значного підвищення значень залишкових деформацій. Проведено також динамічне деформування структурованого середовища з діаметром елементів 3 мм з додаванням невеликої кількості флюїду. Показано, що присутність у середовищі флюїду також впливає на форму діаграми деформування, змінюючи випуклість діаграми в фазі навантаження.

Експериментально було досліджено характер деформування структурованого середовища при багаторазовому навантаженні. Доведено, що збільшення кратності навантаження призводить до поступового ущільнення середовища. Незалежно від розмірів структурних елементів повне ущільнення настає при 4–5 навантаженнях, після чого діаграма деформування не змінюється.

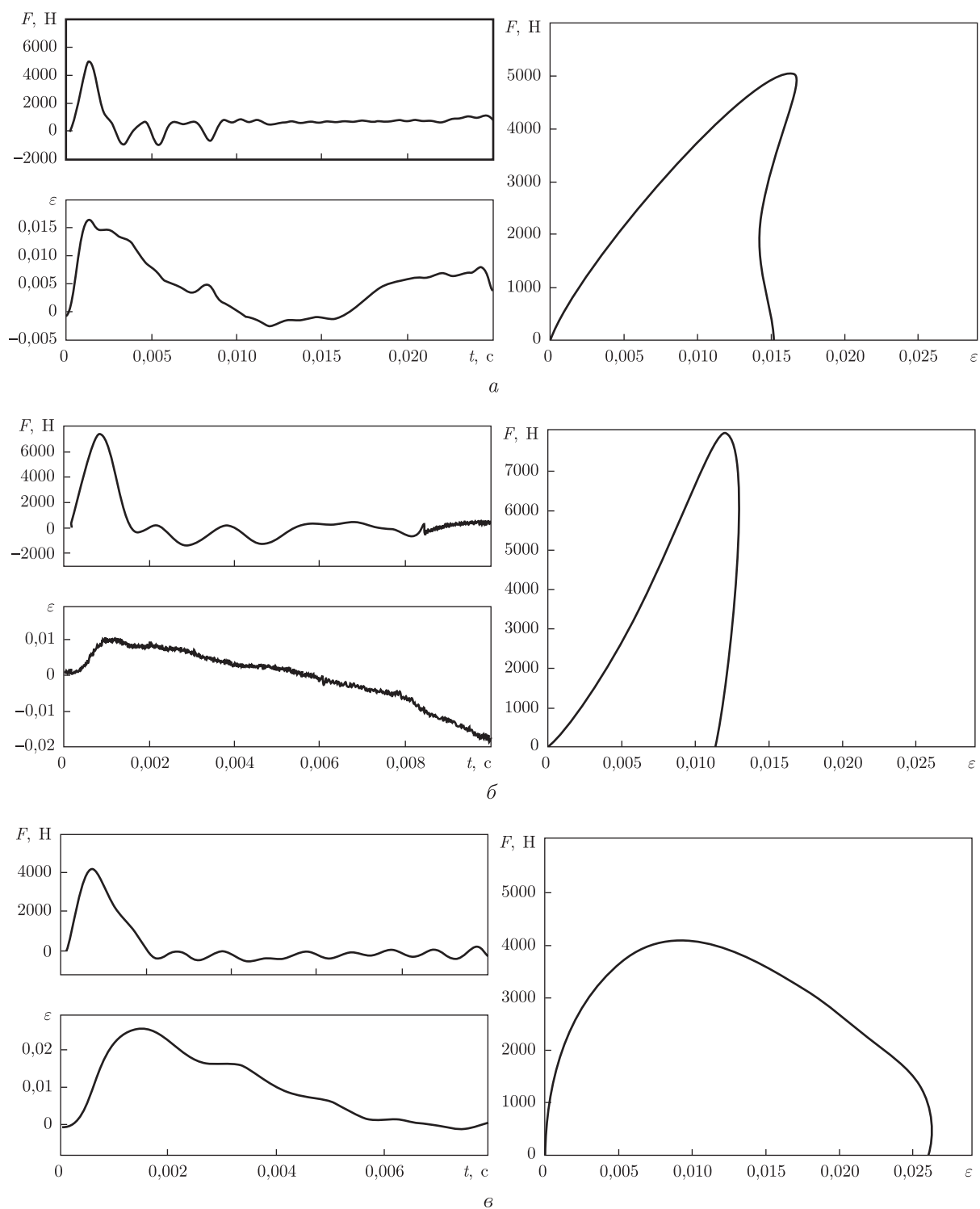


Рис. 2. Хвильові процеси при імпульсному навантаженні середовища та відповідні діаграми деформування масиву.
 Масив із кульок: а — $d = 3$ мм; б — $d = 3$ мм з доданням флюїду; в — $d = 5$ мм

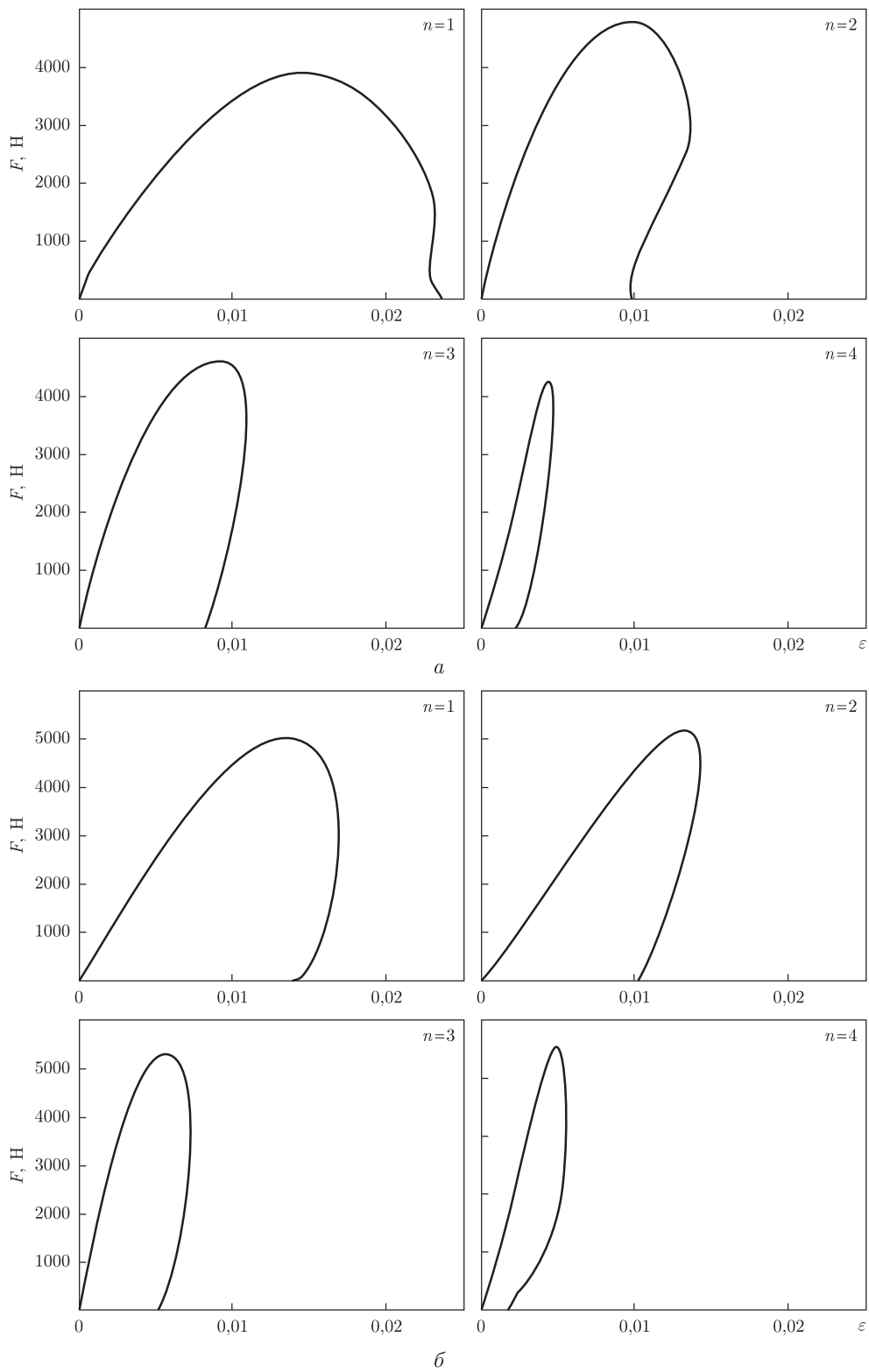


Рис. 3. Діаграми деформування середовища з кульок діаметром 5 (а) і 3 мм (б) при багаторазовому навантаженні; n — кратність навантаження

1. *Докукин А. В., Трумбачев В. Ф., Славин О. К. и др.* Исследование массива горных пород методами фотомеханики. – Москва: Наука, 1982. – 272 с.
2. *Miller B., O'Hern C., Behringer R. P.* Stress fluctuations for continuously sheared granular materials // *Phys. Rev. Lett.* – 1996. – **77**, No 15. – P. 3110–3113.
3. *Behringer R. P., Howell D., Kondica L. et al.* Predictability and granular materials // *Physica D.* – 1999. – **133**. – P. 1–17.
4. *Losert W., Bosquet L., Lubensky T. C., Gollub J. P.* Particle dynamics in sheared granular matter // *Phys. Rev. Lett.* – 2000. – **85**, No 7. – P. 1428–1431.
5. *Zhou Y., Wildman R. D., Huntley J. M.* Measurement of the mechanical properties of granular packs by wavelength-scanning interferometry // *Proc. R. Soc. A.* – 2010. – **466** – P. 789–808.
6. *Венгрович Д. Б., Губарь И. Н., Шеремет Г. П.* Исследование превращений динамической нагрузки в неоднородной зернистой среде // Импульсные процессы в механике сплошных сред: Материалы IX Междунар. науч. конф., 19–25 сент. 2011 г. – Алупшта, 2001. – С. 94–97.
7. *Vensrich C. M., Kisi E. H., Zhang J. F.* Measurement and analysis of the stress distribution during die compaction using neutron diffraction // *Granular Matter.* – 2012. – **14**, No 6. – P. 671–680.
8. *Даниленко В. А., Белінський І. В., Венгрович Д. Б. та ін.* Особливості хвильових процесів у геофізичному середовищі при врахуванні їх структури // Доп. НАН України. – 1996. – № 12. – С. 124–129.
9. *Mueth D. M., Jaeger H. M., Nagel S. R.* Force distribution in a granular medium // *Phys. Rev. E.* – 1998. – **57**. – P. 3164–3169.
10. *Blair D. L., Mueggenburg N. W., Marshall A. H. et al.* Force distributions in three-dimensional granular assemblies: Effects of packing order and interparticle friction // *Ibid.* – 2001. – **63**. – 41304, 8 pp.

*Відділення геодинаміки вибуху Інституту геофізики
ім. С. І. Субботіна НАН України, Київ*

Надійшло до редакції 30.04.2013

Член-корреспондент НАН України **В. А. Даниленко, С. В. Микуляк,
В. А. Поляковский**

Экспериментальное исследование динамического деформирования структурированной геофизической среды

Проведено експериментальне дослідження процесів деформирования структурированной модельной среды, образованной элементами в виде шаров одинакового диаметра, под действием импульсной нагрузки. Показано, что диаграммы деформирования такой среды зависят от размеров элементов структуры и от характера их взаимодействия. Увеличение размера структурных элементов приводит к значительному повышению значений остаточных деформаций, а изменение характера взаимодействия путем добавления в среду флюида меняет выпуклость диаграммы в фазе нагрузки. Также были исследованы особенности деформирования структурированной среды при многократном нагружении. Установлено, что увеличение кратности нагрузки приводит к постепенному уплотнению среды и после 4–5 нагрузок диаграмма деформирования остается неизменной.

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **V. A. Danylenko, S. V. Mykulyak,
V. O. Polyakovskiy**

Experimental study of dynamic deformations of a structured geophysical medium

Experimental studies of the deformation of a structured model medium formed by elements in the form of balls of the same diameter under the impulse loading are performed. It is found that the stress-strain diagram of such medium depends on the size of structure elements and the nature

of their interaction. Increasing the size of structural elements leads to a significant growth of the residual strain, and changing the character of interaction by adding a fluid in the medium results in a change of the diagram convexity in the phase of loading. The deformation characteristics of a structured medium under repeated loading are investigated. It is found that increasing the multiplicity of a load leads to a gradual consolidation of the environment. But the chart of deformations does not change after 4–5 loadings.