

## Експериментальне дослідження динамічного деформування структурованого середовища під дією імпульсного навантаження

© С. В. Микуляк, В. О. Поляковський, 2014

Відділення геодинаміки вибуху Інституту геофізики НАН України, Київ, Україна  
Надійшло 25 червня 2013 р.

Представлено членом редколегії В. А. Даниленком

Проведені експерименти по деформуванню структурованої модельної середовища, об'єктованої елементами в виде слоев одинакового диаметра, под воздействием импульсной нагрузки. Показано, что диаграммы деформирования такой среды зависят от размеров элементов структуры и характера их взаимодействия. Исследовано деформирование структурованной среды при многократной нагрузке.

**Ключевые слова:** структурованная среда, диаграмма деформирования, импульсная нагрузка, деформация.

**Вступ.** У процесі динамічного деформування природні структуровані середовища часто проявляють властивості, які не характерні для однорідних матеріалів. Так, в експериментах з імпульсним навантаженням сухого піску випуклість діаграми деформування може змінюватися залежно від швидкості навантаження піску [Ляхов, 1968]. Згідно з результатами детальніших експериментальних досліджень ударно-хвильового навантаження піску [Рыков, Скобеев, 1978; Брагов и др., 2001], вигляд діаграми деформування залежить не лише від швидкості навантаження, а й від гранулометричного складу і вологості піску. Очевидно, що структуровані середовища такого типу (гранульовані середовища) мають значно більше внутрішніх степенів свободи і між цими степенями свободи відбувається неперервний процес перерозподілу енергії. Цей перерозподіл залежить від структурної будови, форми структурних елементів, характеру взаємодії елементів, наявності флюїдів тощо. Як показують експерименти з використанням оптичного методу [Исследование..., 1982; Travers et al., 1988; Miller et al., 1996; Behringer et al., 1999; Losert et al., 2000; Zhou et al., 2010; Венгрович и др., 2011], методу нейтронної дифракції [Vensrich et al., 2012], методу рентгенівської томографії [Desrués et al., 1996; Fu, 2005] і методів, за якими вимірюють силові характеристики у окремих елементах структури [Даниленко та ін., 1996; Mueth et al., 1998; Blair et al., 2001], а також комп'ютерне моделювання [Cundall, Strack, 1979; Hergmann,

Luding, 1998; Vardenhagen et al., 2000; Kruyt, Antony, 2007; Микуляк, 2007; Даниленко, Микуляк, 2008], механізми деформування структурованих середовищ, зокрема гранульованих, мають особливості, за якими вони суттєво відрізняються від процесів деформування в однорідному середовищі.

У цій роботі експериментально досліджено вплив розмірів елементів структури та характеру взаємодії між ними на макрохарактеристики модельного структурованого середовища, зокрема на діаграму деформування, за його імпульсного навантаження.

**Методика досліджень.** Експериментальні дослідження деформування структурованих середовищ проводили на стенді (рис. 1), який складається із товстостінного циліндра з поршнем (1), закріпленим на масивній металевій плиті (5), пристрою для вимірювання зміщень поршня (4) та металевого ударника (2), який по напрямних (3) рухається під дією сили тяжіння і ударяється об поршень, здійснюючи імпульсне навантаження поршня, який, у свою чергу, передає навантаження на структуроване середовище, що міститься у циліндрі. Структуроване середовище формується масивом металевих кульок однакового розміру. Кульки засипають у циліндр, після чого встановлюють поршень, ущільнюючи середовище таким чином, щоб об'єм щоразу був однаковим. Це дає змогу отримати в кожному досліді однакову початкову щільність.

Поршень (рис. 1, б) складається із двох час-

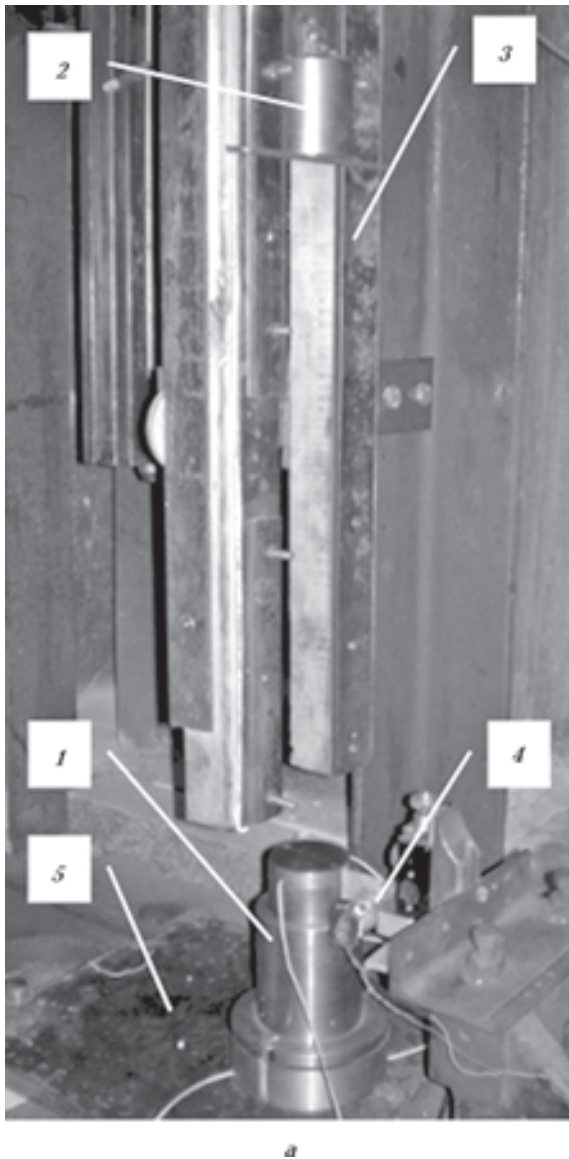


Рис. 1. Експериментальний стенд для дослідження деформування гранульованого середовища під дією імпульсного навантаження: а — загальний вигляд; б, в — циліндр і поршень. Пояснення див. у тексті.

тин, між якими встановлено датчик сили. Обидві частини поршня з'єднані за допомогою напрямних, які забезпечують одновимірність руху. Зміщення поршня реєструють за допомогою датчика (4) — трубки з прорізом, з одного боку якої встановлений фотоелемент, з іншого — джерело світла. На поршні закріплена шторка зі спеціальним профілем, яка частково перекриває світловий потік, що випромінює джерело. Фотоелемент формує відповідну електричну напругу, яку надалі реєструють числовим осцилографом.

Для згладжування імпульсу навантаження використовують гумову прокладку, яка розташована на верхній поверхні поршня і по якій

наносять ударником удар. Необхідність її використання зумовлена тим, що в реальних умовах 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. На рис. 2 показано початковий імпульс сили, отриманий за навантаження поршня ударником без прокладки та з прокладкою у один і два шари. Зауважимо, що використання прокладки забезпечує згладжування імпульсів, а це дає можливість отримувати подібні імпульси за однакових ударів.

**Результати експериментальних дослі-**

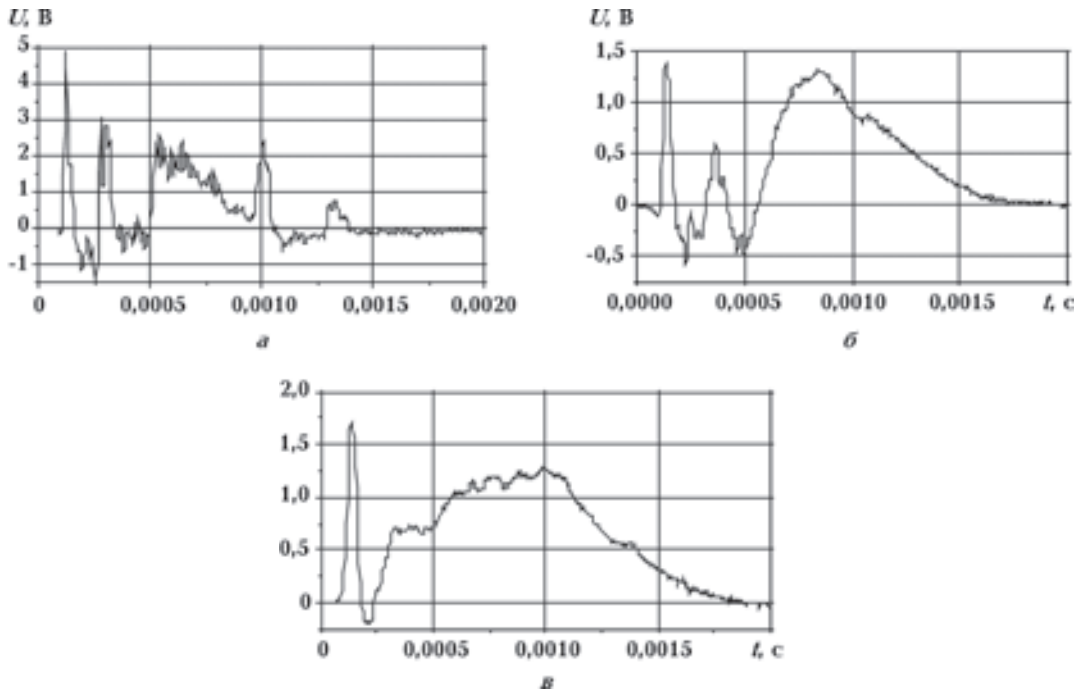


Рис. 2. Характерні осцилограми початкового навантаження: *а* — без прокладки; *б* — через гумову прокладку в один шар; *в* — через гумову прокладку із двох шарів;  $U$  — напруга на датчику сили.

**Джень.** За описаною вище методикою було проведено 3 серії досліджень деформування структурованих середовищ. У першій серії середовище складалось із металевих кульок діаметром 3 мм, у другій це саме середовище було насичено флюїдом (мастилом), у третій серії досліджували деформування кульок діаметром 5 мм. Кількість структурних елементів вибирали із умови однакових об'ємів. Найхарактерніші часові залежності початкового навантаження, деформації середовища та відповідні діаграми деформування показано на рис. 3. Як видно, діаграми деформування масивів із різними структурними елементами суттєво розрізняються. Збільшення розміру структурних елементів спричинює значне підвищення залишкових деформацій (майже в 1,8 раза).

Наявність флюїду змінює характер деформування середовища. Суттєво зменшується коефіцієнт тертя між структурними елементами середовища, що зумовлює збільшення швидкості його деформування, а отже, швидке переупакування структурних елементів і, як наслідок, різке зростання жорсткості середовища. В результаті взаємодії з таким середовищем поршень набуває значного прискорення у зворотному напрямку. Наявність у середовищі флюїду також впливає на форму діаграми деформування: без флюїду стиснення середовища відбувається за кривою, випуклою догори

(рис. 3, *а*), а за наявності флюїду — випуклість обернена донизу (рис. 3, *б*).

Слід зазначити, що в окремих випадках характер деформування залежить від початкового упакування масиву. Так, імовірно початкове розташування ланцюжків куль в одну лінію, перпендикулярну до площини навантаження, зумовлює збільшення жорсткості удару. В результаті поршень після взаємодії із середовищем рухається у зворотному напрямку. Деформації в разі навантаження такого середовища значно знижуються.

Розглянемо особливості деформування гранульованого середовища за багаторазового імпульсного навантаження. Згідно з експериментами, в разі збільшення кількості послідовних навантажень середовище поступово ущільнюється, що призводить до збільшення жорсткості удару. В результаті зростає амплітуда початкового імпульсу і зменшується його тривалість (рис. 4).

Із рис. 4 видно, що зі збільшенням кратності навантаження масиви кульок поступово ущільнюються, що приводить 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 у зворотному напрямку.

**Висновки.** Проведено серію експериментів

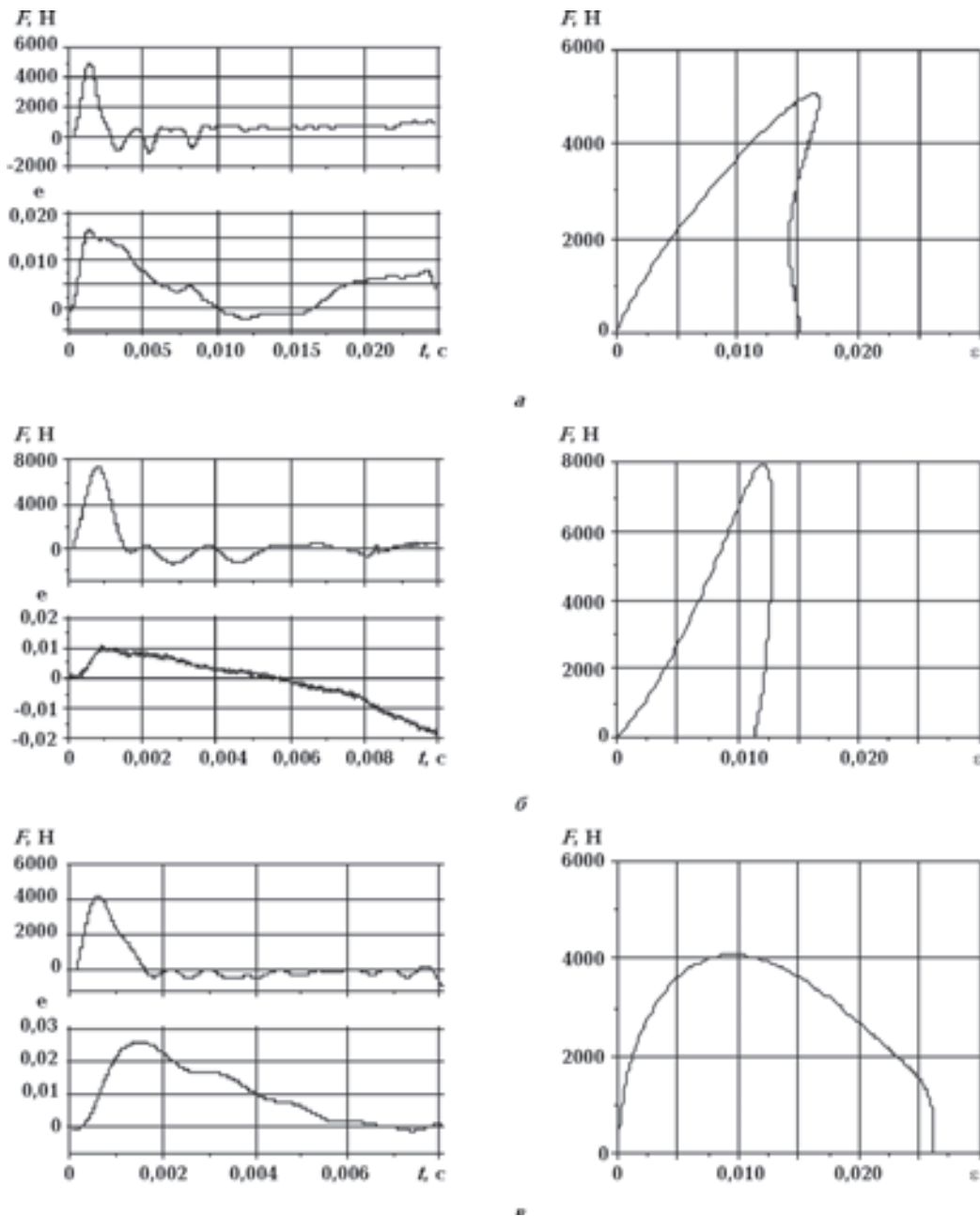


Рис. 3. Залежності сили  $F$  та деформації  $\epsilon$  від часу  $t$  за імпульсного навантаження середовища та відповідні діаграми деформування масиву  $F(\epsilon)$ : а — масив із кульок діаметром  $d = 3$  мм; б —  $d = 3$  мм з додаванням флюїду; в —  $d = 5$  мм.

з деформування структурованого модельного середовища, утвореного елементами у вигляді кульок однакового діаметра. Розглянуто такі розміри структурних елементів:  $d = 3$  мм та  $d = 5$  мм. Побудовані за результатами експериментів діаграми деформування масивів із різними структурними елементами мають суттєві відмінності. Збільшення розміру структурних елементів спричинює істотне підвищення значень залишкових деформацій. За динамічного

деформування структурованого середовища (діаметр елементів  $d = 3$  мм) з додаванням невеликої кількості флюїду також впливає на форму діаграми деформування, змінюючи випуклість діаграми у фазі навантаження.

Експериментально досліджено характер деформування структурованого середовища за багаторазового навантаження. Внаслідок збільшення кратності навантаження середовище поступово ущільнюється. Незалежно від

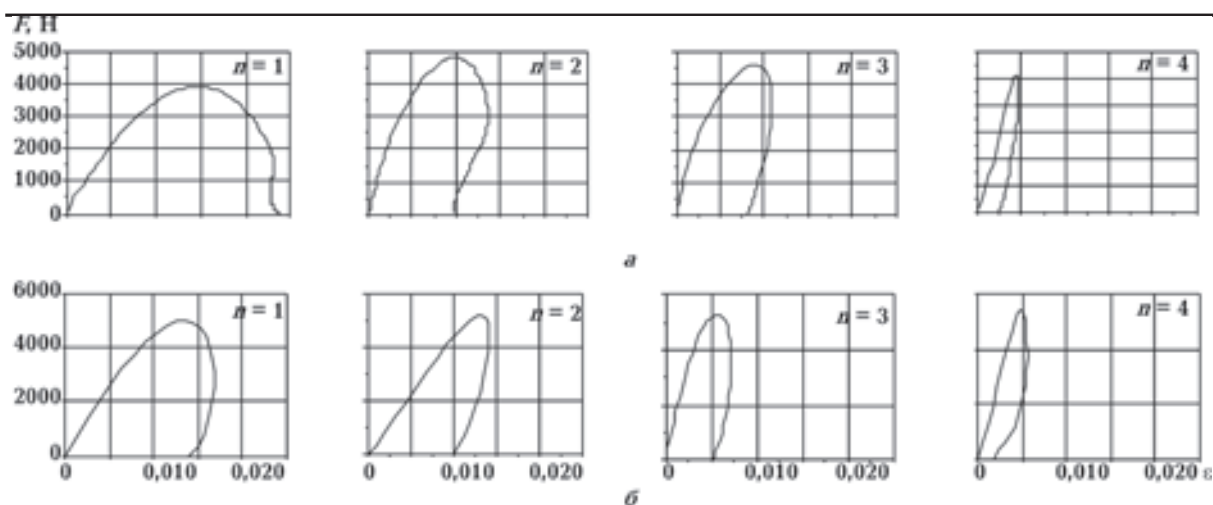


Рис. 4. Діаграми деформування  $F(\varepsilon)$  середовища із кульок діаметром:  $a$  — 5 мм,  $b$  — 3 мм за багаторазового навантаження;  $F$  — сила;  $\varepsilon$  — деформація;  $n$  — кратність навантаження.

розмірів структурних елементів повне ущільнення настає при 4—5 навантаженнях, після

чого діаграма деформування не змінюється.

### Список літератури

- Брагов А. М., Ломунов А. К., Деменко П. В. Исследование физико-механических свойств мягких грунтов при ударе. *Труды VI Забалахинских научных чтений*. Снежинск, 2001. 21 с.
- Венгровиц 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.* Алушта, 2011. С. 94—97.
- Даниленко В. А., Белінський І. В., Венгровиц Д. Б., Гржибовський В. В., Лемешко В. А. Особливості хвильових процесів у геофізичному середовищі при врахуванні їх структури. *Доп. НАН України*. 1996. № 12. С. 124—129.
- Даниленко В. А., Микуляк С. В. Комп'ютерне моделювання процесів динамічного деформування структурованого геофізичного середовища. *Доп. НАН України*. 2008. № 6. С. 123—129.
- Исследование массива горных пород методами фотомеханики (Под ред. Н. Ф. Кусова). Москва: Наука, 1982. 272 с.
- Ляхов Г. М. Определение вязких свойств грунта. *Журн. прикл. механики и техн. физики*. 1968. № 4. С. 68—71.
- Микуляк С. В. Моделирование процессов динамического деформирования дискретной среды под воздействием импульсной нагрузки. *Физическая мезомеханика*. 2007. Т. 10. № 6. С. 69—74.
- Рыков Г. В., Скобеев А. М. Измерение напряжений в грунтах при кратковременных нагрузках. Москва: Наука, 1978. 168 с.
- Bardenhagen S. G., Brackbill J. U., Sulsky D., 2000. Numerical study of stress distribution in sheared granular material in two dimensions. *Phys. Rev. E*. 62, 3882—3890.
- Behringer R. P., Howell D., Kondica L., Tennakoona S., Veje C., 1999. Predictability and granular materials. *Physica D* 133, 1—17.
- Blair D. L., Mueggenburg N. W., Marshall A. H., Jaeger H. M., Nagel S. R., 2001. Force distributions in three-dimensional granular assemblies: Effects of packing order and interparticle friction. *Phys. Rev. E* 63, 041304(1-8).
- Cundal P. A., Strack O. D. L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29, 47—65.
- Desrues J., Chambon R., Mokni M., Mazerolle F., 1996. Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography. *Geotechnique* 46(3), 529—546.
- Fu Y., 2005. Experimental quantification and DEM simulation of micro-macro behaviors of granular materials using X-Ray tomography imaging. Louisiana State University, 251 p.
- Herrmann H. J., Luding S., 1998. Modelling granular media on the computer. *Continuum Mech. Therm.* 10, 189—231.



- Kruyt N. P., Antony S. J., 2007. Force, relative-displacement, and work networks in granular materials subjected to quasi-static deformation. *Phys. Rev. E* 75, 051308.
- Losert W., Bosquet L., Lubensky T. C., Gollub J. P., 2000. Particle dynamics in shared granular matter. *Phys. Rev. Lett.* 85(7), 1428—1431.
- Miller B., O'Hern C., Behringer R. P., 1996. Stress fluctuations for continuously sheared granular materials. *Phys. Rev. Lett.* 77(15), 3110—3113.
- Mueth D. M., Jaeger H. M., Nagel S. R., 1998. Force distribution in a granular medium. *Phys. Rev. E* 57, 3164—3169.
- Travers T., Ammi M., Bideau D., Gervois D., Messager J.-C., Troades J.-P., 1988. Mechanical size effects in 2d granular media. *J. Phys. France* 49, 939—948.
- Vensrich C. M., Kisi E. H., Zhang J. F., 2012. Measurement and analysis of the stress distribution during die compaction using neutron diffraction. *Granul. Matter* 14(6), 671—680.
- Zhou Y., Wildman R. D., Huntley J. M., 2010. Measurement of the mechanical properties of granular packs by wavelength-scanning interferometry. *Proc. Roy. Soc. A* 466, 789—808.

## Experimental study of dynamic deformation structured medium under the impulse loading

© S. V. Mykulyak, V. O. Polyakovskiy

Experiments on deformation 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. The character of deformation of the structured medium by multiple loads is investigated.

**Key words:** structured environment, stress-strain diagram, the impulse load, deformation.

### References

- Bragov A. M., Lomunov A. K., Demenko P. V., 2001. Study of physical and mechanical properties of soft soils at impact. *Proceedings of the VI Zababakhin Scientific Talks*. Snezhinsk, 21 p. (in Russian).
- Vengrovich D. B., Gubar' I. N., Sheremet G. P., 2011. Study transformations dynamic load in an inhomogeneous granular medium. Switching processes in continuum mechanics. *Proceedings of the IX Intern. Sci. Conf. Alushta*, P. 94—97 (in Russian).
- Danilenko V. A., Belinskij I. V., Vengrovich D. B., Grzhibovskij V. V., Lemeshko V., 1996. Features wave processes in geophysical environment taking into account their structure. *Dopovidi NAN Ukrainy* (12), 124—129 (in Ukrainian).
- Danilenko V. A., Mikuljak S. V., 2008. Computer simulation of dynamic deformation of geophysical structured environment. *Dopovidi NAN Ukrainy* (6), 123—129 (in Ukrainian).
- The study of rock mass methods photomechanics, 1982. (Ed. N. F. Kusova). Moscow: Nauka, 272 p. (in Russian).
- Ljahov G. M., 1968. Determination of the viscous properties of the soil. *Zhurnal prikladnoj mehaniki i tehniczeskoj fiziki* (4), 68—71 (in Russian).
- Mikuljak S. V., 2007. Modelling of processes of dynamic deformation under the influence of a discrete medium pulse loading. *Fizicheskaja mezomehanika* 10(6), 69—74 (in Russian).
- Rykov G. V., Skobeev A. M., 1978. Measurement of stresses in soils transient load. Moscow: Nauka, 168 p. (in Russian).
- Bardenhagen S. G., Brackbill J. U., Sulsky D., 2000. Numerical study of stress distribution in sheared granular material in two dimensions. *Phys. Rev. E* 62, 3882—3890.
- Behringer R. P., Howell D., Kondica L., Tennakoona S., Veje C., 1999. Predictability and granular materials. *Physica D* 133, 1—17.
- Blair D. L., Mueggenburg N. W., Marshall A. H., Jaeger H. M., Nagel S. R., 2001. Force distributions in three-dimensional granular assemblies: Effects of packing order and interparticle friction. *Phys. Rev. E* 63, 041304(1-8).
- Cundal P. A., Strack O. D. L., 1979. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique* 29, 47—65.
- Desrues J., Chambon R., Mokni M., Mazerolle F., 1996. Void ratio evolution inside shear bands in triaxial

- sand specimens studied by computed tomography. *Geotechnique* 46(3), 529—546.
- Fu Y., 2005. Experimental quantification and DEM simulation of micro-macro behaviors of granular materials using X-Ray tomography imaging. Louisiana State University, 251 p.
- Herrmann H. J., Luding S., 1998. Modelling granular media on the computer. *Continuum Mech. Therm.* 10, 189—231.
- Kruyt N. P., Antony S. J., 2007. Force, relative-displacement, and work networks in granular materials subjected to quasi-static deformation. *Phys. Rev. E* 75, 051308.
- Losert W., Bosquet L., Lubensky T. C., Gollub J. P., 2000. Particle dynamics in sheared granular matter. *Phys. Rev. Lett.* 85(7), 1428—1431.
- Miller B., O'Hern C., Behringer R. P., 1996. Stress fluctuations for continuously sheared granular materials. *Phys. Rev. Lett.* 77(15), 3110—3113.
- Mueth D. M., Jaeger H. M., Nagel S. R., 1998. Force distribution in a granular medium. *Phys. Rev. E* 57, 3164—3169.
- Travers T., Ammi M., Bideau D., Gervois D., Messager J.-C., Troades J.-P., 1988. Mechanical size effects in 2d granular media. *J. Phys. France* 49, 939—948.
- Vensrich C. M., Kisi E. H., Zhang J. F., 2012. Measurement and analysis of the stress distribution during die compaction using neutron diffraction. *Granul. Matter* 14(6), 671—680.
- Zhou Y., Wildman R. D., Huntley J. M., 2010. Measurement of the mechanical properties of granular packs by wavelength-scanning interferometry. *Proc. Roy. Soc. A* 466, 789—808.