

БАГРІЙ ОЛЕНА

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-2267-7162>e-mail: bahriio@khmnu.edu.ua**ДОРОФЄЄВ ОЛЕКСАНДР**

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3550-3487>e-mail: alexdorofeyev60@gmail.com

КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ҐРУНТІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ З БУДІВЕЛЬНИМИ КОНСТРУКЦІЯМИ

Проектування просторових будівельних конструкцій у сучасних програмних комплексах вимагає використання чисельних методів, здатних враховувати фізичну та геометричну нелінійності матеріалів. Однією з найскладніших задач у цьому процесі є коректне моделювання взаємодії споруди з ґрунтовим середовищем, достовірність якого залежить від точності заданих фізико-механічних параметрів основи. Ґрунт є дискретним середовищем із суттєвим проявом внутрішнього тертя, закони деформування якого залежать від величини середнього стискуючого напруження. Стандартні лабораторні методики, такі як компресійне стиснення у жорсткій обоймі або випробування у класичних стабілометрах, мають технічні обмеження і часто не дозволяють з достатньою точністю визначити нелінійні деформаційні характеристики, необхідні для сучасних нелінійних розрахункових моделей.

У статті теоретично обґрунтовано комплексну методику паралельних випробувань дискретних середовищ для встановлення параметрів нелінійних моделей деформування. Для знаходження пружних характеристик, зокрема модуля деформації та коефіцієнта Пуассона, застосовано спільне використання компресійного стиснення та навантаження товстостінного циліндричного зразка внутрішнім радіальним тиском. Розроблений підхід до дослідження закономірностей пластичного деформування забезпечує незалежне варіювання головних напружень за умови збереження сталості середнього стискуючого напруження.

Запропонований режим навантаження усуває недоліки традиційних приладів тривісного тиску та дає змогу отримати сімейство кривих деформування. Сукупність цих кривих описує єдину поверхню деформування у просторі напружень та деформацій. Використання визначених за цією методикою характеристик як вхідних даних для систем автоматизованого проектування відкриває шлях до значного підвищення достовірності чисельного моделювання спільної роботи будівельних конструкцій із ґрунтовою основою.

Ключові слова: деформаційні характеристики, модуль деформації, коефіцієнт Пуассона, поверхня деформування, паралельні випробування, нелінійне моделювання.

BAHRII OLENA, DOROFIEIEV OLEKSANDR

Khmelnitskyi National University

COMPREHENSIVE METHODOLOGY FOR DETERMINING THE DEFORMATION CHARACTERISTICS OF SOILS FOR MODELING INTERACTION WITH BUILDING STRUCTURES

The design of spatial building structures in modern software systems requires the use of numerical methods capable of accounting for the physical and geometric non-linearities of materials. One of the most complex tasks in this process is the correct modeling of the interaction between the structure and the soil environment, the reliability of which depends on the accuracy of the specified physical and mechanical parameters of the base. Soil is a discrete medium with a significant manifestation of internal friction, the deformation laws of which depend on the magnitude of the average compressive stress. Standard laboratory techniques, such as compression in a rigid holder or testing in classical stabilometers, have technical limitations and often do not allow determining the non-linear deformation characteristics required for modern non-linear calculation models with sufficient accuracy.

The article theoretically substantiates a comprehensive methodology of parallel testing of discrete media to establish the parameters of non-linear deformation models. To find elastic characteristics, in particular the deformation modulus and Poisson's ratio, the combined use of compression and loading of a thick-walled cylindrical sample with internal radial pressure is applied. The developed approach to the study of plastic deformation regularities ensures the independent variation of principal stresses while maintaining the constancy of the average compressive stress.

The proposed loading regime eliminates the shortcomings of traditional triaxial compression devices and makes it possible to obtain a family of deformation curves. The combination of these curves describes a single deformation surface in the stress-strain space. The use of the characteristics determined by this methodology as input data for computer-aided design systems opens the way to a significant increase in the reliability of numerical modeling of the joint behavior of building structures with a soil base.

Keywords: deformation characteristics, deformation modulus, Poisson's ratio, deformation surface, parallel testing, non-linear modeling.

Стаття надійшла до редакції / Received 27.08.2026

Прийнята до друку / Accepted 24.09.2026

Опубліковано / Published 15.10.2026

This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Багрій Олена, Дорофєєв Олександр

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Проектування просторових будівельних конструкцій у сучасних програмних комплексах базується на чисельних методах, які враховують фізичну та геометричну нелінійності матеріалів. Однією зі складних задач у цьому процесі є моделювання спільної роботи споруди з ґрунтовим середовищем [1]. Достовірність результатів

розрахунку безпосередньо залежить від точності заданих фізико-механічних параметрів основи, які визначаються експериментальним шляхом.

Ґрунт є дискретним середовищем із суттєвим проявом внутрішнього тертя, закони деформування якого залежать від величини середнього стискуючого напруження. Процес деформування таких матеріалів описується не окремою кривою, а поверхнею деформування у просторі напружень і деформацій [2]. За таких умов деформаційні характеристики, зокрема модуль деформації та коефіцієнт Пуассона, є не константами, а функціями поточного напруженого стану.

Отримання цих параметрів за допомогою стандартних лабораторних методик має технічні обмеження. Компресійні випробування у жорсткій обоймі відбуваються без можливості бічного розширення зразка. Використання класичних приладів тривісного стиску ускладнює незалежне варіювання головних напружень за умови збереження сталості їх суми [3]. Це обмежує можливості дослідження закономірностей деформування при сталому середньому напруженні, що вимагається для нелінійних розрахункових моделей.

Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз поведінки ґрунтів під навантаженням доводить, що їхні механічні параметри не є сталими величинами, що підтверджує необхідність відмови від спрощених лінійних розрахунків. За результатами порівняння даних тривісного та одновісного стиснення сумішей лесу з піском встановлено, що показники жорсткості (зокрема модуль деформації) є вкрай чутливими до поточного напружено-деформованого стану, умов дренажу та прийнятої методики розрахунку, тоді як параметри міцності демонструють значно меншу мінливість [4]. Дослідження гранульованих матеріалів в умовах тривісного навантаження також підтверджує, що модуль пружності та коефіцієнт Пуассона безперервно змінюються залежно від еволюції деформацій та рівня обтискуючого тиску [5]. Це унеможливує використання єдиної кривої деформування та вимагає застосування складних пружно-пластичних моделей, здатних враховувати зміну параметрів у процесі навантаження.

Впровадження таких нелінійних моделей у розрахункові комплекси супроводжується значними труднощами на етапі їх експериментального забезпечення. Чисельне моделювання роботи тривісного апарата показує, що базові моделі ідеальної пластичності (наприклад, модель Мора-Кулона) не здатні коректно відтворити початкову нелінійну залежність між напруженнями та деформаціями, що зумовлює необхідність застосування моделей зі зміцненням або гіпопластичних теорій [6]. Визначення параметрів для таких моделей обмежується технічними можливостями стандартного лабораторного обладнання. Оскільки існуючі прилади не дозволяють відтворювати необхідні траєкторії напружень, для знаходження характеристик жорсткості застосовують методи математичної апроксимації результатів серій розрізаних випробувань [7]. Це підтверджує потребу в розробленні методик, які б дозволяли визначати деформаційні характеристики експериментальним шляхом, зокрема за умови збереження сталості середнього стискуючого напруження.

Існуючі підходи не забезпечують можливості незалежно змінювати головні напруження за умови сталості середнього стискуючого напруження в межах одного випробування. Це вказує на потребу в розробленні нових методик паралельних випробувань для отримання достовірних деформаційних характеристик.

Формулювання цілей статті

Метою статті є розроблення та теоретичне обґрунтування методики визначення нелінійних деформаційних характеристик ґрунтів для встановлення параметрів нелінійних моделей деформування дискретних середовищ, необхідних для розрахунку будівельних конструкцій.

Виклад основного матеріалу

Для виконання розрахунків у межах моделі лінійно-деформованого середовища необхідно експериментально визначити два параметри: модуль деформації E та коефіцієнт Пуассона ν . Це можна здійснити лабораторними методами або натурними випробуваннями по вдавлуванню штампів.

Відомі компресійні випробування на стиск у жорсткій обоймі (так званому «стакані») за умови неможливості бічного розширення. За результатами випробувань визначається модуль деформації E

$$E = \frac{1+e_0}{\alpha} \left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right), \quad (1)$$

де e_0 – початковий коефіцієнт пористості ґрунту;

α – тангенс кута нахилу лінійної апроксимації компресійної кривої;

ν – коефіцієнт Пуассона ґрунту.

За результатами випробувань штампамі модуль деформації на початковій стадії навантаження визначається за формулою [8]

$$E = (1 - \nu^2) \frac{F}{Sd}, \quad (2)$$

де F – вертикальна сила, що діє на штамп;

S – осідання штампа, що відповідає силі F ;

d – діаметр штампа;

ν – коефіцієнт Пуассона.

У формулах (1) і (2), крім коефіцієнта апроксимації, залишається невизначеною друга необхідна для розрахунків у межах лінійної моделі характеристика матеріалу – коефіцієнт Пуассона ν .

Оскільки існуючі стандартні методики лабораторних випробувань часто не дозволяють коректно визначити коефіцієнт Пуассона ν , пропонується спосіб лабораторних випробувань, що дає можливість визначити

необхідні для розрахунку деформаційні показники ґрунтів [9].

Обидва параметри моделі лінійно-деформівного середовища можуть бути знайдені шляхом паралельних випробувань зразків матеріалів у спеціальних умовах. Спочатку зразок випробовують на стиск у жорсткій обоймі без можливості бічного розширення, а потім – шляхом внутрішнього радіального навантаження товстостінного циліндричного зразка. Для усунення спотворюючого впливу тертя по бічних поверхнях жорсткої обойми її стінки можуть бути виконані стисливими в осьовому напрямку [10].

На першому етапі проводять випробування за класичною компресійною схемою (рис. 1, а). За результатами випробувань записують рівняння (3), до якого входять два невідомі параметри E та ν .

$$E = \frac{\Delta\sigma (1+\nu)(1-2\nu)}{\Delta\varepsilon (1-\nu)}, \quad (3)$$

де $\Delta\sigma = \frac{F}{A}$ – вертикальне напруження (тиск) у вибраному інтервалі лінійної апроксимації;

$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta h}{h}$ – вертикальна деформація в цьому ж інтервалі.

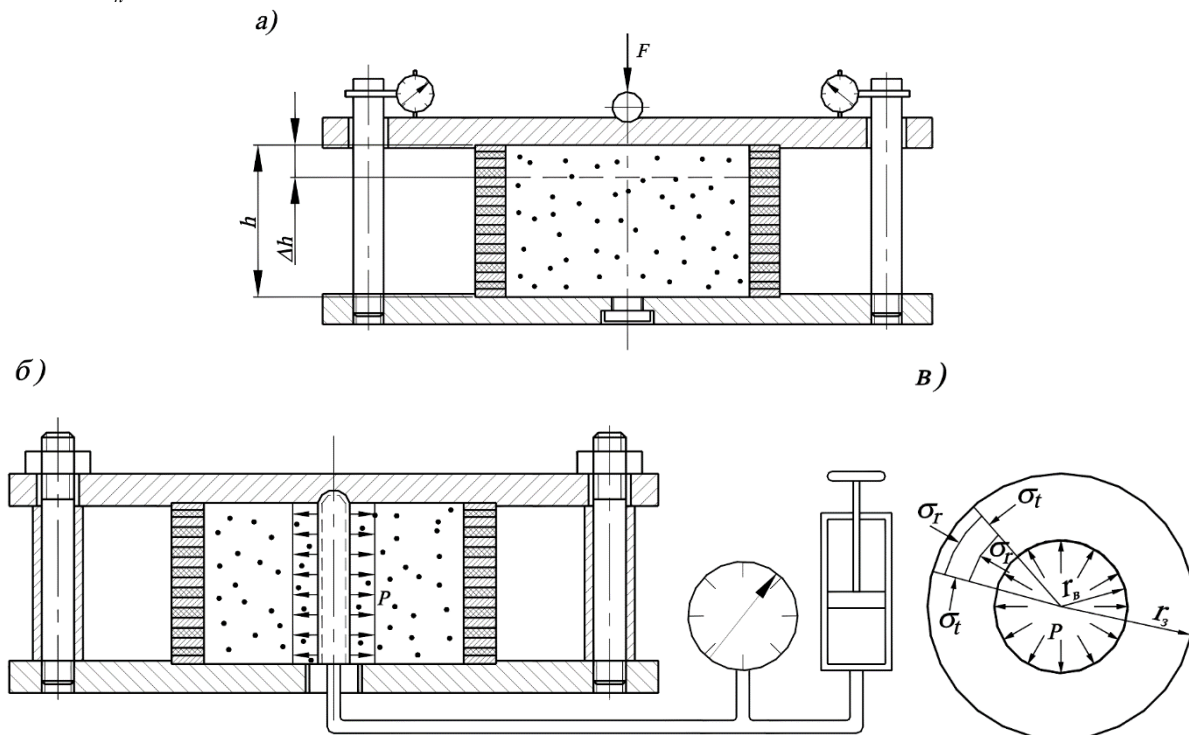


Рис. 1. Схеми паралельних випробувань для визначення параметрів лінійної моделі:
а) – перший етап випробування; б, в) – другий етап випробування

На другому етапі проводять випробування за схемою навантаження товстостінного циліндра радіусів r_a , r_z внутрішнім тиском P . Радіальне переміщення на зовнішньому контурі $U_{(r=r_z)} = 0$ (рис. 1, б, в). З розв'язку Ляме для розгляданого випадку маємо

$$E = \frac{r_a (k^2 - 1) \Delta P}{(1 - \nu) (k^2 + 1) \Delta U}, \quad (4)$$

де $k = \frac{r_z}{r_a}$ – коефіцієнт товстостінності;

ΔP , ΔU – прирости внутрішнього тиску та радіального переміщення в інтервалі лінійної апроксимації.

З двох рівнянь (3) і (4) однозначно визначаються два параметри E та ν лінійно-деформівного середовища.

На деяких етапах автоматизованого проектування використовують критерії переходу матеріалів у граничний стан (критерії міцності). Ці ж критерії можуть використовуватись як функціонали в розрахунках, що ґрунтуються на теорії пластичної течії.

Для ґрунтів найбільш відомими є критерії Мора-Кулона

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi, \quad (5)$$

де τ , σ – дотичне та нормальне напруження по площадках зсуву (площадках із найбільшим відхиленням повного напруження від нормалі);

c – молекулярне зчеплення;

ϕ – кут внутрішнього тертя,

а також критерій Боткіна-Хошіно

$$\tau_0 = c_0 + \sigma_0 \cdot \operatorname{tg} \psi, \quad (6)$$

де τ_0 , σ_0 , c_0 , ψ – аналоги умови (5), сформульованої для октаедричної (рівнонахиленої до головних осей) площадки.

Найбільш достовірно необхідні для розрахунків параметри граничного стану: c , ϕ , c_0 , ψ визначають за

стандартною методикою випробувань зразків матеріалу на стабілометрах [11].

Моделі нелінійної теорії пружності та теорії пластичності деформаційного типу вимагають, згідно з гіпотезою Людвіга, визначення параметрів "єдиної" кривої деформування $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, що принципово неможливо для ґрунтів. Закони деформування ґрунтів та інших дискретних матеріалів описуються не "єдиною" кривою $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, а поверхнею $\sigma_i = F(\varepsilon_i, \sigma_0)$. Криві деформування є зрізами цієї поверхні при фіксованому значенні середнього стискуючого ($\sigma = \text{const}$). Тому параметри кривих, крім усього іншого, є функціями напруження σ_0 .

Якщо розрахункова модель ґрунтується на деформаційній теорії, що враховує вплив величини стискуючого напруження σ_0 на процес пластичного деформування, то виникає необхідність експериментального визначення параметрів поверхні $\sigma_i = F(\varepsilon_i, \sigma_0)$. Для ідеально сипких матеріалів ця поверхня в узагальненому просторі "напруження – деформації" ($\sigma_i, \varepsilon_i, \sigma_0$) нагадує коноід (рис. 2). Зрізи поверхні площинами ($\sigma = \text{const}$) являють собою криві деформування $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, кожна з яких відповідає сталій величині стискуючого напруження. Параметри саме цих кривих використовуються в розрахунках. Визначити їх за допомогою стандартних випробувань зразків на приладах тривісного стиску (стабілометрах) неможливо. Тому розроблено спеціальну методику та лабораторне обладнання для реалізації необхідної траєкторії навантаження, коли в процесі випробування одного зразка монотонно зростає відношення головних напружень при збереженні сталості їх суми.

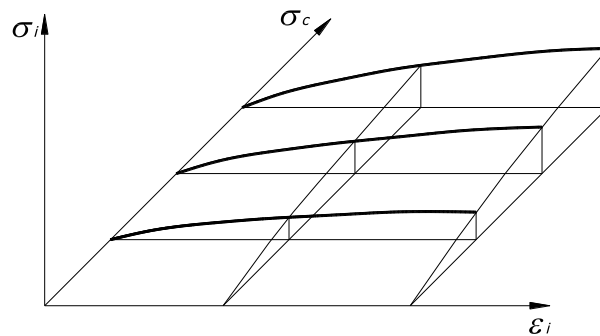


Рис. 2. Поверхня деформування ідеально сипкого матеріалу

Ці випробування виконують на спеціально створених стабілометрі [12] або приладі плоскої деформації [13]. В обох випадках є можливість незалежно варіювати двома головними напруженнями σ_1 та σ_2 , та фіксувати на кожному етапі навантаження головні деформації ε_1 та ε_2 за допомогою розробленого для цього навантажувального пристрою [13]. Схему пристрою на прикладі навантаження призматичного зразка наведено на рис. 3.

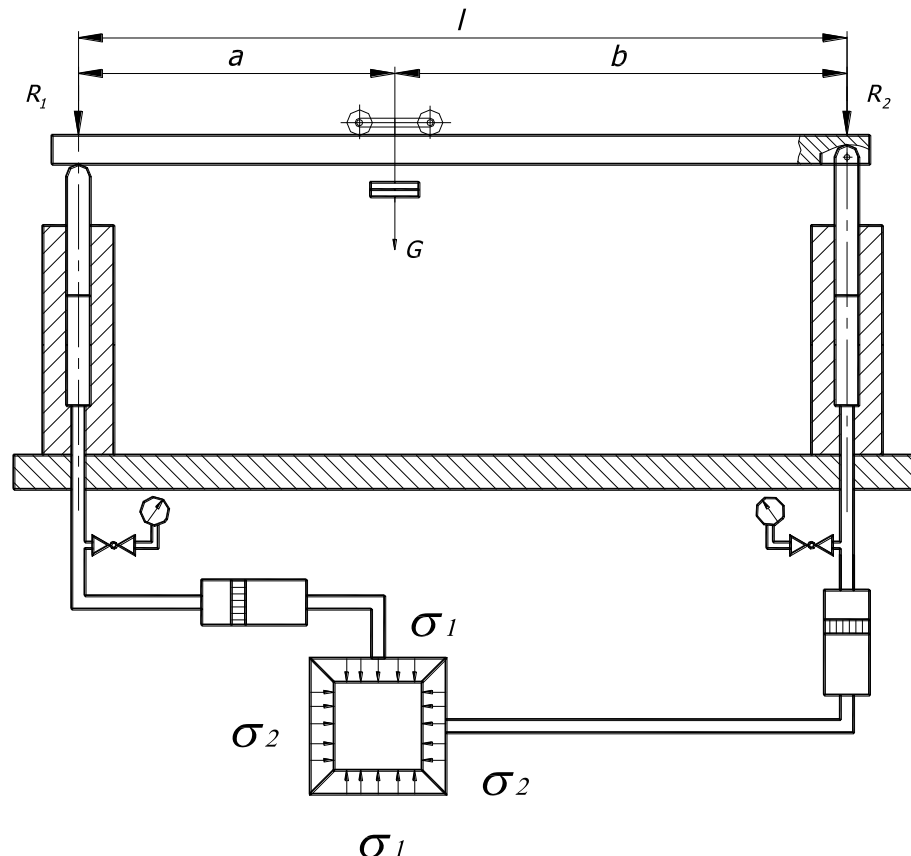


Рис. 3. Схema навантажувального пристрою

Навантаження σ_1 , σ_2 передаються на бічні грані зразка у вигляді гідростатичних тисків, що створюються двома плунжерами, які є опорами навантажувальної балки. По балці може переміщуватися візок із постійним вантажем G . Під час переміщення візка змінюються реакції R_1 та R_2 , а отже, й тиски σ_1 та σ_2 . Але сума тисків або напружень $(\sigma_1 + \sigma_2)$ залишається сталою. Отже, процес деформування зразка, аж до його руйнування, відбувається в умовах сталості середнього стискуючого напруження $\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} = \text{const}$. На кожному етапі навантаження за зміною об'єму рідини в камері приладу визначають величини деформацій ε_1 , ε_2 , що дозволяє побудувати криву деформування $(\sigma_1 - \sigma_2) = f(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ при $(\sigma_1 + \sigma_2) = \text{const}$. Варіюючи в кожному наступному досліді величину середнього стискуючого напруження, отримуємо сімейство кривих, що описують шукану поверхню деформування.

Визначення розрахункових параметрів поверхні деформування зводиться до використання спеціальних функціональних шкал, що відповідають прийнятій апроксимуючій функції. Для степеневі функції, яку найчастіше використовують у нелінійних розрахунках будівельних конструкцій, як функціональні шкали застосовують логарифмічні координати.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У роботі теоретично обґрунтовано комплексну методику паралельних випробувань дискретних матеріалів, спрямовану на визначення параметрів нелінійних моделей деформування ґрунтів. Показано, що спільне застосування компресійного стиснення у жорсткій обоймі та навантаження товстостінного циліндричного зразка внутрішнім радіальним тиском формує аналітичні передумови для знаходження пружних характеристик матеріалу. Розроблений підхід до експериментального дослідження дозволяє незалежно варіювати головні напруження за умови збереження сталості середнього стискуючого напруження.

Застосований режим навантаження компенсує обмеження традиційних стабілометрів і дає змогу отримати сімейство кривих, які описують поверхню деформування у просторі напружень та деформацій. Використання цих характеристик у системах автоматизованого проектування забезпечує коректність чисельного моделювання спільної роботи будівельних конструкцій із ґрунтовою основою.

Перспективи подальших досліджень полягають у перевірці розробленої методики шляхом проведення серії лабораторних випробувань для специфічних структурно-нестійких ґрунтів. Важливим завданням є автоматизація процесу збору експериментальних даних на базі запропонованого навантажувального обладнання та створення алгоритмів прямої інтеграції отриманих параметрів апроксимуючих функцій у сучасні розрахункові комплекси, що реалізують метод скінчених елементів.

Література

1. Chorafa E., Skrapalliou E., Katsimpini P. On the Nonlinear Behavior of Composite Structures under Multiple Earthquakes Considering Soil–Structure Interaction. *CivilEng.* 2024. Vol. 5, No. 3. P. 673–693. DOI: <https://doi.org/10.3390/civileng5030036>
2. Yosef T. Y. et al. A Review of Soil Constitutive Models for Simulating Dynamic Soil–Structure Interaction Processes Under Impact Loading. *Geotechnics.* 2025. Vol. 5, No. 2. P. 40. DOI: <https://doi.org/10.3390/geotechnics5020040>
3. Sayakov O., et al. Revealing Soil Mechanics via Coupled Discrete and Finite Element Method Triaxial Testing. *Engineered Science.* 2025. Vol. 36. Article 1648. DOI: <https://doi.org/10.30919/es1648>
4. Tankiewicz M., Sas W., Szymański A. Evaluation of Shear Strength and Stiffness of a Loess–Sand Mixture in Triaxial and Unconfined Compression Tests. *Materials.* 2024. Vol. 17, No. 15. P. 3831. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17153831>
5. Yu X., Ye Y., Yang A., Yang J. Triaxial Response and Elastoplastic Constitutive Model for Artificially Cemented Granular Materials. *Buildings.* 2025. Vol. 15, No. 15. P. 2721. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15152721>
6. Sheshov V., Bojadjeva J., Zlatanovic E., Jovanovski M. et al. Numerical Simulations of Laboratory Tests for Triaxial Apparatus. In: *Synergy of Architecture and Civil Engineering (SINARG 2025)*. Springer, 2025.
7. Stals M. T., Siderius K., Brinkgreve R. B. J. Advanced constitutive model parameter determination, optimisation and selection using a database of triaxial tests and machine learning tools. In: *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*. CRC Press, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003431749-145>
8. Механіка ґрунтів, основи та фундаменти : підручник / М. Л. Зоценко та ін. ; за ред. М. Л. Зоценка. Полтава : ПФ «Форміка», 2004. 568 с.
9. Пат. 11675 Україна, МПК (2006) G 01 N 33/24. Спосіб визначення деформаційних параметрів пористих матеріалів за результатами лабораторних випробувань / заявники Ковтун В. В., Багрій О. В. ; власник Хмельн. нац. ун-т. – № у 2005 03929 ; заявл. 25.04.05 ; опубл. 16.01.06, Бюл. № 1. – 3 с.
10. Пат. 18390 Україна, МПК (2006) G 01 N 33/24. Пристрій для лабораторних випробувань пористих матеріалів / заявники Ковтун В. В., Багрій О. В. ; власник Хмельн. нац. ун-т. – № у 2006 03878 ; заявл. 07.04.06 ; опубл. 15.11.06, Бюл. № 11. – 4 с.

11. Bishop A. W., Henkel D. J. The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test. 2nd ed. London : Edward Arnold, 1962. 228 p.
12. Ковтун В. В. Експериментальне обґрунтування вихідних положень механіки дискретного середовища і визначення розрахункових параметрів моделей / В. В. Ковтун, О. А. Дорофєєв // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2011. – № 3. – С. 20–27.
13. Багрий О. В. Обладнання та методика лабораторних випробувань зразків дискретних матеріалів в умовах плоскої деформації / О. В. Багрий, В. В. Ковтун // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2013. – № 2. – С. 31–39.

References

1. Chorafa, E., Skrapalliou, E., & Katsimpini, P. (2024). On the Nonlinear Behavior of Composite Structures under Multiple Earthquakes Considering Soil–Structure Interaction. *CivilEng*, 5(3), 673–693. <https://doi.org/10.3390/civileng5030036>
2. Yosef, T. Y., et al. (2025). A Review of Soil Constitutive Models for Simulating Dynamic Soil–Structure Interaction Processes Under Impact Loading. *Geotechnics*, 5(2), 40. <https://doi.org/10.3390/geotechnics5020040>
3. Sayakov, O., et al. (2025). Revealing Soil Mechanics via Coupled Discrete and Finite Element Method Triaxial Testing. *Engineered Science*, 36, 1648. <https://doi.org/10.30919/es1648>
4. Tankiewicz, M., Sas, W., & Szymański, A. (2024). Evaluation of Shear Strength and Stiffness of a Loess–Sand Mixture in Triaxial and Unconfined Compression Tests. *Materials*, 17(15), 3831. <https://doi.org/10.3390/ma17153831>
5. Yu, X., Ye, Y., Yang, A., & Yang, J. (2025). Triaxial Response and Elastoplastic Constitutive Model for Artificially Cemented Granular Materials. *Buildings*, 15(15), 2721. <https://doi.org/10.3390/buildings15152721>
6. Sheshov, V., Bojadjieva, J., Zlatanovic, E., & Jovanovski, M. (2025). Numerical Simulations of Laboratory Tests for Triaxial Apparatus. In *Synergy of Architecture and Civil Engineering (SINARG 2025)*. Springer.
7. Stals, M. T., Siderius, K., & Brinkgreve, R. B. J. (2024). Advanced constitutive model parameter determination, optimisation and selection using a database of triaxial tests and machine learning tools. In *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003431749-145>
8. Zotsenko, M. L., et al. (2004). *Mekhanika gruntiv, osnovy ta fundamenty* [Soil mechanics, bases and foundations]. Poltava: PF "Formika" [in Ukrainian].
9. Kovtun, V. V., & Bahrii, O. V. (2006). Patent No. 11675 Ukraine, IPC (2006) G 01 N 33/24. Sposib vyznachennia deformatsiinykh parametriv prystykh materialiv za rezultatamy laboratornykh vyprobuvan [Method for determining deformation parameters of porous materials based on laboratory test results]. Khmelnytskyi National University [in Ukrainian].
10. Kovtun, V. V., & Bahrii, O. V. (2006). Patent No. 18390 Ukraine, IPC (2006) G 01 N 33/24. Prystrii dlia laboratornykh vyprobuvan prystykh materialiv [Device for laboratory testing of porous materials]. Khmelnytskyi National University [in Ukrainian].
11. Bishop, A. W., & Henkel, D. J. (1962). *The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test* (2nd ed.). London: Edward Arnold.
12. Kovtun, V. V., & Dorofieiev, O. A. (2011). Eksperymentalne obgruntuvannia vykhidnykh polozhen mekhaniky dyskretnoho seredovyshcha i vyznachennia rozrakhunkovykh parametriv modelei [Experimental substantiation of the initial provisions of the mechanics of a discrete medium and determination of the design parameters of models]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, (3), 20–27 [in Ukrainian].
13. Bahrii, O. V., & Kovtun, V. V. (2013). Obladnannia ta metodyka laboratornykh vyprobuvan zrazkiv dyskretnykh materialiv v umovakh ploskoi deformatsii [Equipment and methods of laboratory testing of samples of discrete materials in terms of plane strain]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, (2), 31–39 [in Ukrainian].