УДК 621.822.57
DOI: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2026-23-1-97-105

Р. І. Сивак[1]
В. І. Музичук[2]
В. С. Наляжний[1]

УЩІЛЬНЮВАНІСТЬ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ В УМОВАХ КОМБІНОВАНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ВПЛИВУ

[1]Вінницький національний технічний університет
[2]Вінницький професійний коледж сфери послуг

Насипна щільність та ущільнюваність сипких матеріалів відіграють важливу роль у технологічних процесах. Хоча стиснення статичним навантаженням можна відтворити та математично описати, вплив ударів та вібрацій залишається дуже погано вивченим. Вивчення реологічної поведінки дисперсних середовищ під механічним навантаженням має стратегічне значення для оптимізації промислових процесів, де пористість матеріалу критично залежить від системного стану ущільнення. Оскільки стандартні методики оцінки ущільнюваності мають переважно якісний характер, забезпечення відтворюваності реологічних характеристик в аерованому стані як базисному рівні потребує впровадження прецизійних математичних моделей. Тому, було проведено дослідження для вивчення впливу одноосьового навантаження та вібрацій на стиснення сипучого матеріалу. Метою дослідження є комплексний аналіз ефективності комбінованого вібраційного впливу на процес ущільнення когезійного порошку каоліну H1 special. У межах роботи застосовано логарифмічну модель ущільнення, що демонструє високу якість апроксимації для тонкодисперсних систем при піковому статичному тиску, з урахуванням характеристичної довжини Янссена, коефіцієнта бічного тиску та тертя. Встановлено, що інтеграція динамічних навантажень суттєво трансформує безрозмірний коефіцієнт стисливості: від базового рівня 0,15 при статичному стисненні до 0,22 за умови осьових коливань (50 Гц, ~2g) та 0,32 при додаванні реверсивного крутильного впливу (45 Гц). Незважаючи на те, що додатковий динамічний тиск є незначним порівняно зі статичним максимумом, основним фізичним чинником виступає вібраційна рекомпакція структури, яка забезпечує зростання об'ємної щільності за рахунок застосування комбінованого режиму ущільнення. Величина тангенціального прискорення дозволяє ефективно руйнувати когезійні арки, нівелювати ефект аркування за моделлю Янссена та усувати радіальну неоднорідність щільності. Впровадження розробленої конструкції пристрою для комбінованого впливу дозволяє досягати майже подвоєння насипної щільності та забезпечувати високу гомогенність структури композитів у промислових масштабах.

Ключові слова: дисперсне середовище, ущільнення, вібрація, когезійний порошок, тиск, тертя, рекомпакція, об'ємна щільність.

Вступ

Сипучі тверді речовини під дією зовнішніх впливів поводяться інакше, ніж суцільні тверді тіла або рідини. Пористість сильно залежить від впливу механічних сил, що виникають шляхом стиснення, удару та вібрації. Це є системним станом ущільнення (Černý, 2023) [1]. За насипну густину зазвичай беруть густину матеріалу в його найбільш пухкому (аерованому) стані — без додаткового ущільнення. Аналіз методів вимірювань для аерованого стану виявив, що отримати відтворювані вимірювання складно (Xiaoli Zhu, 2024) [2]. Вимірювання аерованої насипної густини є методично проблемним, навіть при однакових умовах складно отримати ідентичні результати, тому ці дані можуть мати похибку або варіативність. Аерований стан спостерігається на практиці рідко і лише протягом короткого часу. Однак, оцінка аерованого стану як початкового необхідна для визначення ущільнюваності. Тому процедуру заповнення градуйованої посудини необхідно перевірити на відтворюваність. Вибір методу заповнення є питанням досвіду, оскільки необхідно враховувати індивідуальні властивості конкретних сипучих матеріалів.

Окрім одноосьові ущільнюваності, в якості міри ущільнюваності використовуються вібраційна густина та густина ущільнення. Однак точна інформація для їх коригування недоступна. (Szwajka, 2023) [3] або (Berkinova, 2026) [4], описують експериментальну процедуру ущільнення сипучих твердих матеріалів загалом як вимірювальний циліндр, який піддається певній кількості зовнішніх впливів, при цьому вібраційне ущільнення не згадується.

Стандарти також пропонують інформацію про різні процедури ущільнення. Однак вони зазвичай були розроблені для конкретних груп продуктів або галузей промисловості. Їх спільною рисою є те, що фізичні величини, які викликають стиснення, описуються якісно. Отже, результати різних методів не можна порівнювати.

© Р. І. Сивак, В. І. Музичук, В. С. Наляжний, 2026
Ця стаття відкритого доступу ліцензується відповідно до Creative Commons Attribution 4.0

Ущільнення стисненням одноосьовим тиском можна фізично відтворити, а криву густини, що залежить від нормального напруження, можна легко описати певною кількістю різних математичних рівнянь. Рівняння за (Rojek, 2016) [5] мають дуже високу якість апроксимації в діапазоні тиску до 30 кПа, що є актуальним для характеристики сипучих матеріалів.

Деякі конкретні публікації стосуються стискання сипучих матеріалів під впливом різних механічних сил з використанням порошкового тестера Карра (Dalirnasab, 2024; Xiao, 2025) [6, 7] в якості експериментального обладнання. (Lu, 2023) [8] вимірювали вплив відносної вологості навколишнього повітря на аеровану об'ємну щільність та на коефіцієнт стиснення згідно з (Berdychowski, 2022) [9]. Вимірювання показали однозначну залежність від вологості навколишнього повітря. Автори не згадують, яким чином вони визначали кількість ударів, а також не вимірювали значення уповільнення. (Mitrosz, 2025) [10] досліджували ударне стиснення залізного порошку та виявили певні залежності щільності від висоти падіння та кількості ударів. Як і інші автори, вони не реєструють значення уповільнення окрім ударного стиснення. Стиснення за допомогою вібрації має велике значення в промислових процесах. (Sharma, 2019) [11] аналізують дослідження кількох авторів, які застосовували різні методи стиснення і приходять до висновку, що інформація про значення частоти та прискорення є неоднозначною та неповною.

Метою статті є дослідження ефективності ущільнення сипучого матеріалу в умовах спільного впливу на зразок одноосьового стиснення і вібрацій.

Матеріали і методи

Ущільнення одноосьовим стисненням здійснюється на гідравлічному пресі (Zaid, 2023) [12], а для реалізації процесу комбінованого ущільнення із спільним використанням одноосьового стиснення і вібрацій пропонується схема пристрою представлена на рис. 1.

Спосіб ущільнення, що отримав назву комбіноване ущільнення, заснований на знакозмінному круговому рухові ємності з композитним матеріалом та знакозмінному поступальному рухові робочого інструменту. У технологічній практиці не відомі пристрої, що забезпечують одночасний вплив на ущільнюване середовище кругового реверсивного та зворотно поступального руху робочого інструменту.

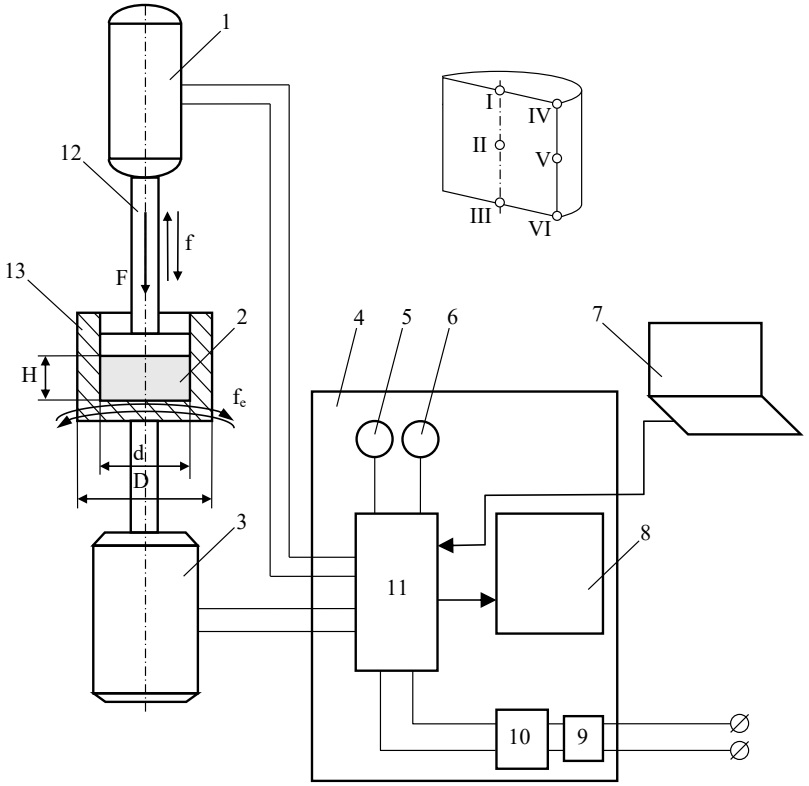

Рис. 1. Принципова схема пристрою створення комбінованого вібраційного впливу для ущільнення порошкового композиційного матеріалу: 1 – лінійний електродвигун; 2 – порошковий композиційний матеріал; 3 – кроковий електродвигун; 4 – блок управління; 5 – кнопка запуску; 6 – регулятор швидкості реверсу; 7 – персональний комп'ютер; 8 – екран режимів обробки; 9 – автоматичний вимикач; 10 – трансформатор; 11 – програмований контролер; 12 – абсолютно жорсткий шток; 13 – абсолютно жорстка ємність; I, II, III, IV, V, VI – досліджувані точки на меридіональному перетині зразка

Для оцінки ефективності комбінованого способу ущільнення проаналізовано порошки каоліну з діапазоном розмірів від 2,08 до 5,5 мм. Окрім одноосьового стиснення, порошки були ущільнені одночасним впливом одноосьового стиснення і вібрацій. Вібрації створювались як повздовжніми коливаннями абсолютно жорсткого штока 12 так і крутильними коливаннями абсолютно жорсткої ємності 13. Плинність порошку каоліну H1 special з діаметром Заутера d_{ST} = 2,08 мкм після класифікації Jenike має значення F_J = 3. Це означає, що каолін H1 special повинен класифікуватися як когезійний порошок.

Згідно моделі Янссена характеристична довжина (Zhou, 2025) [13]:

$$\lambda = \frac{R}{2K\mu}, \tag{1}$$

де R – радіус зразка; K – коефіцієнт бічного тиску; μ – коефіцієнт тертя із стінкою.

Розподіл осьового напруження (Samadi, 2022) [14]:

$$\sigma_z(z) = \sigma_{max} \cdot \frac{\cosh\left(\frac{H-z}{\lambda}\right)}{\cosh\left(\frac{H}{\lambda}\right)}, \tag{2}$$

де H – висота зразка; $z = 0$ – точки I, IV; $z = {}^{H}/_{2}$ – точки II, V; $z = H$ – точки III, VI.

Для створення моделі ущільнення приймемо логарифмічну залежність ущільнення, яка є типовою для тонкодисперсних порошків (Mohmad, 2024) [15]:

$$\rho = \rho_0 \cdot \left(1 + a \cdot ln\left(1 + \frac{\sigma_z}{\sigma_0}\right)\right), \tag{3}$$

де ρ_0 – початкова об'ємна щільність; a – безрозмірний коефіцієнт стисливості (ущільнюваності); σ_0 – характеристичний тиск початку інтенсивного ущільнення.

Фізично коефіцієнт a показує наскільки сильно змінюється щільність при зростанні напруження, «чутливість» порошку до тиску та інтенсивність руйнування пористої структури. Малий коефіцієнт a = 0,05-0,1 – порошок майже не ущільнюється, середній a = 0,1-0.2 – помірна стисливість, великий a = 0.25-0.4 – висока стисливість, руйнування агломератів. Для тонкодисперсного каоліну з F_J=3 типове значення $a \approx$ 0,12-0,18. Під дією вібрації або крутильних коливань a зростає, оскільки структура легше перебудовується (Laptiev, 2024) [16].

Характеристичний тиск початку інтенсивного ущільнення σ_0 фізично це рівень напруження, при якому починає руйнуватись пориста структура, масштаб тиску для логарифмічної залежності, умовна «точка переходу» від пружного до пластичного ущільнення. Якщо $\sigma \ll \sigma_0$ ($\rho \approx \rho_0$) – порошок майже не ущільнюється. Якщо $\sigma \approx \sigma_0$ – починається активне ущільнення. Якщо $\sigma \gg \sigma_0$ ущільнення сповільнюється (логарифмічне насичення) (Ku, 2023) [17].

Фізичний зміст логарифмічної форми пояснюється тим, що експериментально для багатьох порошків при малих тисках – різке ущільнення, при великих – ефект насичення, крива $\rho(\sigma)$ має вигляд повільно зростаючої. Це відповідає руйнуванню агломератів, зменшенню пористості, зростанню контактної площі частинок. Існують інші моделі, наприклад, Heckel equation, Kawakita equation, Cam-Clay (для порошкової механіки), Drucker–Prager–Cap, але для розрахунків була обрана логарифмічна форма оскільки вона дуже зручна (Yilmaz, 2025) [18].

Коефіцієнт a і тиск σ_0 визначають експериментально. Для цього зразок із певного матеріалу стискають в пресі, вимірюють щільність ρ при різних тисках σ, виконують регресію і в результаті отримують значення a та σ_0.

Отже фізичний зміст коефіцієнту стисливості a полягає у тому наскільки порошок «легко ущільняється», а характеристичного тиску – коли починається активне ущільнення.

Фізичний зміст результату полягає у найбільшому ущільненні у верхній частині, оскільки через тертя по стінках тиск зменшується донизу (ефект аркування), різниця між центром і стінкою по осі мінімальна (для осесиметричного навантаження), загальне зростання щільності ≈ 60% від початкової (Zhou, 2023) [19].

Для підвищення точності прогнозу необхідно використати реальні компресійні криві каоліну H1 special, DEM-моделювання або метод скінченних елементів та врахування повзучості (Sivak, 2023) [20].

Результати і обговорення

Для оцінки ефективності ущільнення проведені дослідження згідно схеми представленої на рис. 1. Спочатку розглядається процес ущільнення під дією статичного повздовжнього навантаження. Циліндр

з порошку каоліну H1 special з діаметром Заутера d_{ST} = 2,08 мкм після класифікації Jenike має значення плинності F_J = 3. Циліндр має діаметр d = 10 см, висоту H = 8 см та обмежений знизу і по контуру нерухомими поверхнями. Зверху по всій поверхні на циліндр тисне шток із зусиллям, що зростає від F = 0…2500 Н за 10 сек. Необхідно визначити як зміниться об'ємна щільність (г/см^3) в шести характерних точках (рис. 1). Початкова об'ємна щільність – ρ_0 = 0,25 г/см^3.

Максимальний осьовий тиск:

$$\sigma_{max} = \frac{F}{A}, \tag{4}$$

де $A = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа поперечного перерізу циліндра.

Отже максимальний осьовий тиск буде складати в даному випадку $\sigma_{max} \approx 318$ кПа.

Порошки з показником Jenike ≈ 3 відносяться до когезійних матеріалів, тому коефіцієнт бічного тиску приймаємо K ≈ 0,4, а коефіцієнт тертя із стінкою μ ≈ 0,4. Характеристична довжину Янссена визначаємо за (1). Таким чином в даному випадку λ = 0,156 м. Розподіл осьового напруження визначаємо за (2). Для створення моделі ущільнення приймемо логарифмічну залежність ущільнення (3), яка є типовою для тонкодисперсних порошків. Результати розрахунку представлені на рис. 2.

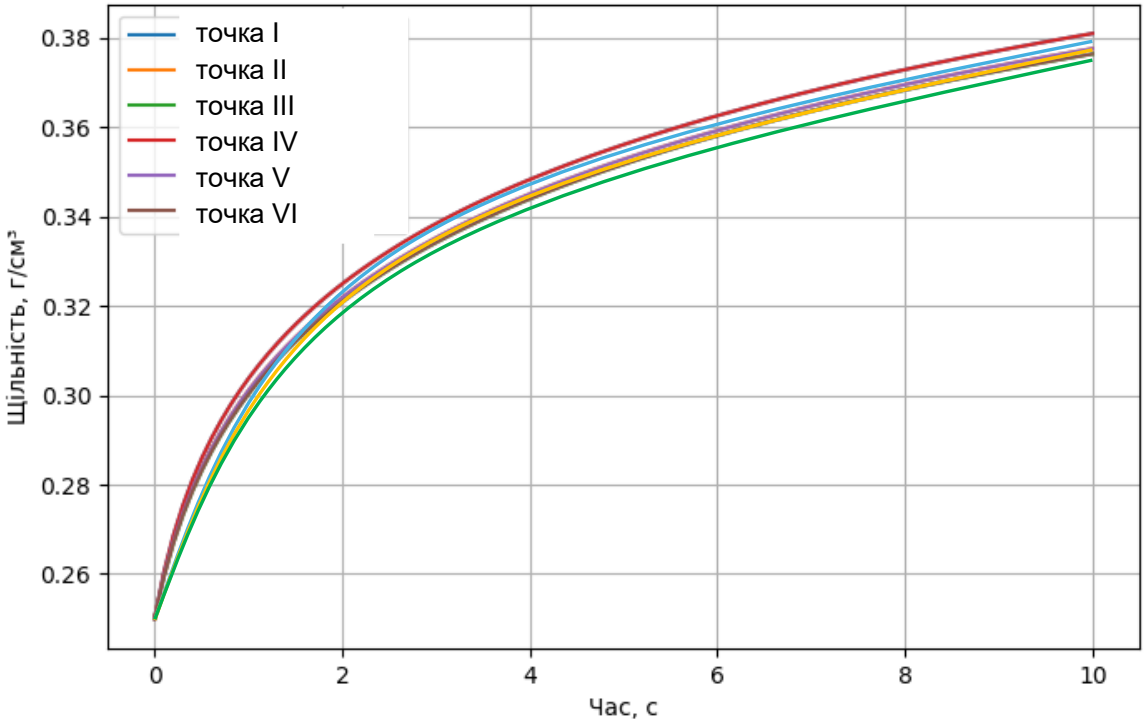

Рис. 2. Залежність об’ємної щільності від часу при одноосьовому стисканні в характерних точках меридіонального перетину циліндричного зразка із каоліну H1 special

Наступною задачею буде визначення зміни об'ємної щільності в шести точках меридіонального перерізу зразка (рис. 1) із каоліну H1 special при умові, що шток одночасно створює одноосьове стиснення величиною 2500 Н та повздовжні коливання з частотою 50 Гц і амплітудою 0,0002 м. В цьому випадку застосуємо розширену модель з урахуванням статичного ущільнення, додаткового динамічного тиску від гармонійних коливань з частотою 50 Гц та логарифмічного закону ущільнення порошку для когезійного стану.

Кутова частота

$$\omega = 2\pi f, \tag{5}$$

де f = 50 Гц – частота повздовжніх коливань абсолютно жорсткого штока.

Отже кутова частота в даному випадку буде дорівнювати ω = 314 рад/с. Максимальне прискорення штока:

$$a_{max} = \omega^2 A_v, \tag{6}$$

де A_v = 0,0002 м – амплітуда.

Таким чином в даному випадку максимальне прискорення штока a_{max} = 19,7 м/с^2. Це приблизно 2g.

Додатковий динамічний тиск:

$$\sigma_d = \rho H a_{max}, \quad (7)$$

де $\rho = 300$ кг/м^3 – середня щільність.

Отже додатковий динамічний тиск буде складати $\sigma_d = 473$ Па. Це приблизно 0,5 кПа, що у 600 разів менше за статичний максимум (318 кПа). Таким чином коливання практично не збільшують миттєвий тиск, але зменшують внутрішнє тертя і підвищують коефіцієнт ущільнення. Врахуємо це як збільшення параметра ущільнення від 0,15 до 0,22.

Згідно моделі Янссена (1-3) отримуємо залежність об'ємної щільності від часу при спільній дії одноосьового стискання і повздовжніх коливань штока в характерних точках меридіонального перетину циліндричного зразка із каоліну H1 special (рис. 3).

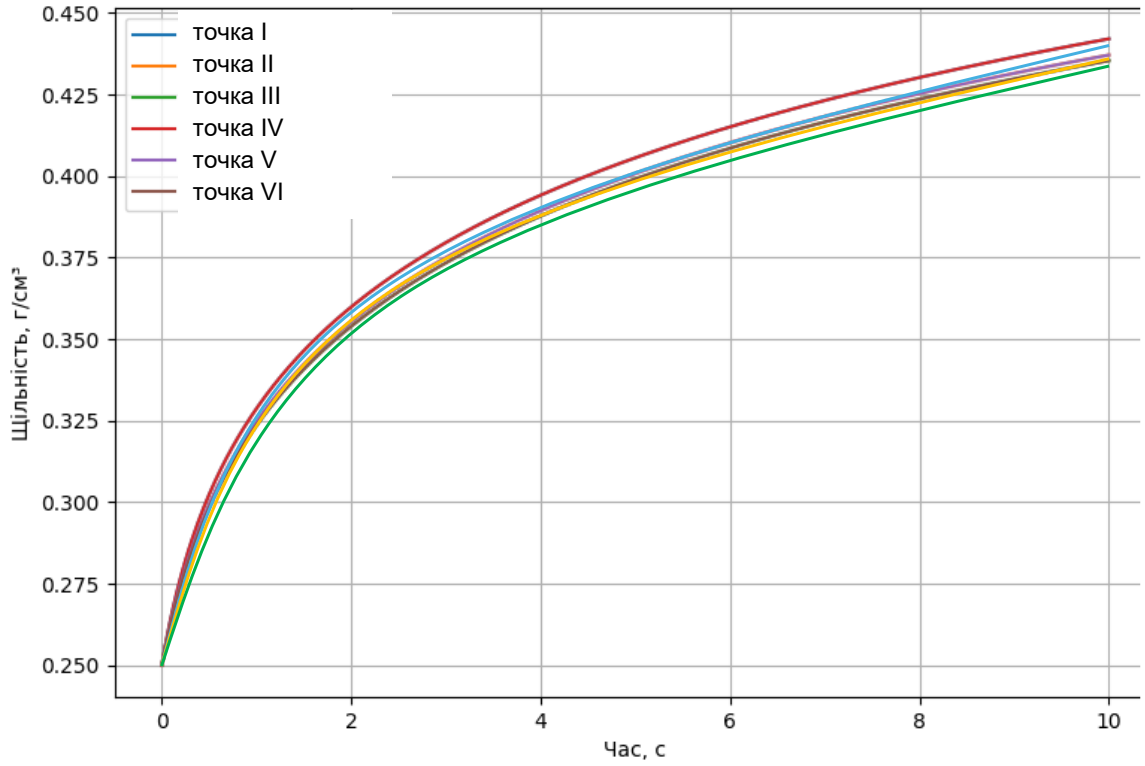

Рис. 3. Залежність об'ємної щільності від часу при спільній дії одноосьового стисканні і повздовжніх коливань штока в характерних точках меридіонального перетину циліндричного зразка із каоліну H1 special

Таким чином при одноосьовому стисканні максимальне значення об'ємної щільності склало ≈ 0,40 г/см^3, а у випадку спільної дії на зразок одноосьового стискання і повздовжніх коливань штока – ≈ 0,47 г/см^3. Тобто отримано від 17 до 20% додаткового ущільнення.

Вібраційний вплив з частотою 50 Гц при прискоренні ≈2g руйнує когезійні арки, зменшує внутрішнє тертя, дозволяє частинкам перебудовуватись у щільніше пакування. Динамічний тиск сам по собі малий, але основним ефектом є вібраційна рекомпакція структури.

Тепер розглянемо задачу визначення зміни об'ємної щільності в шести точках меридіонального перерізу зразка (рис. 1) із каоліну H1 special при умові спільної дії одноосьового стиснення величиною 2500 Н, повздовжніх коливань штока з частотою 50 Гц і амплітудою 0,0002 м і крутильних коливань ємності з каоліном частотою 45 Гц та амплітудою 0,0174 рад. Для цього розглянемо модель з урахуванням статичного осьового навантаження, осьових вібрацій частотою 50 Гц і крутильних коливань ємності частотою 45 Гц з використанням ефекту Янссена та вібраційної рекомпакції когезійного порошку.

Кутова частота крутильних коливань

$$\omega_t = 2\pi f_t, \quad (8)$$

де $f_t = 45$ Гц – частота крутильних коливань абсолютно жорсткої ємності.

Отже кутова частота крутильних коливань в даному випадку буде рівна $\omega_t = 283$ рад/с. Максимальне тангенціальне прискорення:

$$a_t = R\omega_t^2\theta_0, \quad (9)$$

де θ_0 = 0,0174 рад – амплітуда крутильних коливань.

Таким чином максимальне тангенціальне прискорення в даному випадку буде рівне a_t = 69.5 м/с^2. Це значене зсувне прискорення, оскільки приблизно дорівнює 7g. Таке прискорення руйнує структуру аркування, різко зменшує внутрішнє тертя, вирівнює щільність по радіусу, підвищує коефіцієнт ущільнення.

Отже ефективний коефіцієнт ущільнення при одноосьовому стисненні без вібрації буде дорівнювати a = 0,15, при спільній дії одноосьового стиснення і повздовжніх коливань штока – a = 0,22, при спільній дії одноосьового стиснення, повздовжніх коливань штока і крутильних коливань ємності – a = 0,32.

Згідно моделі Янссена (1-3) отримуємо залежність об'ємної щільності від часу при спільній дії одноосьового стискання, повздовжніх коливань штока і крутильних коливань ємності в характерних точках меридіонального перетину циліндричного зразка із каоліну H1 special (рис. 4).

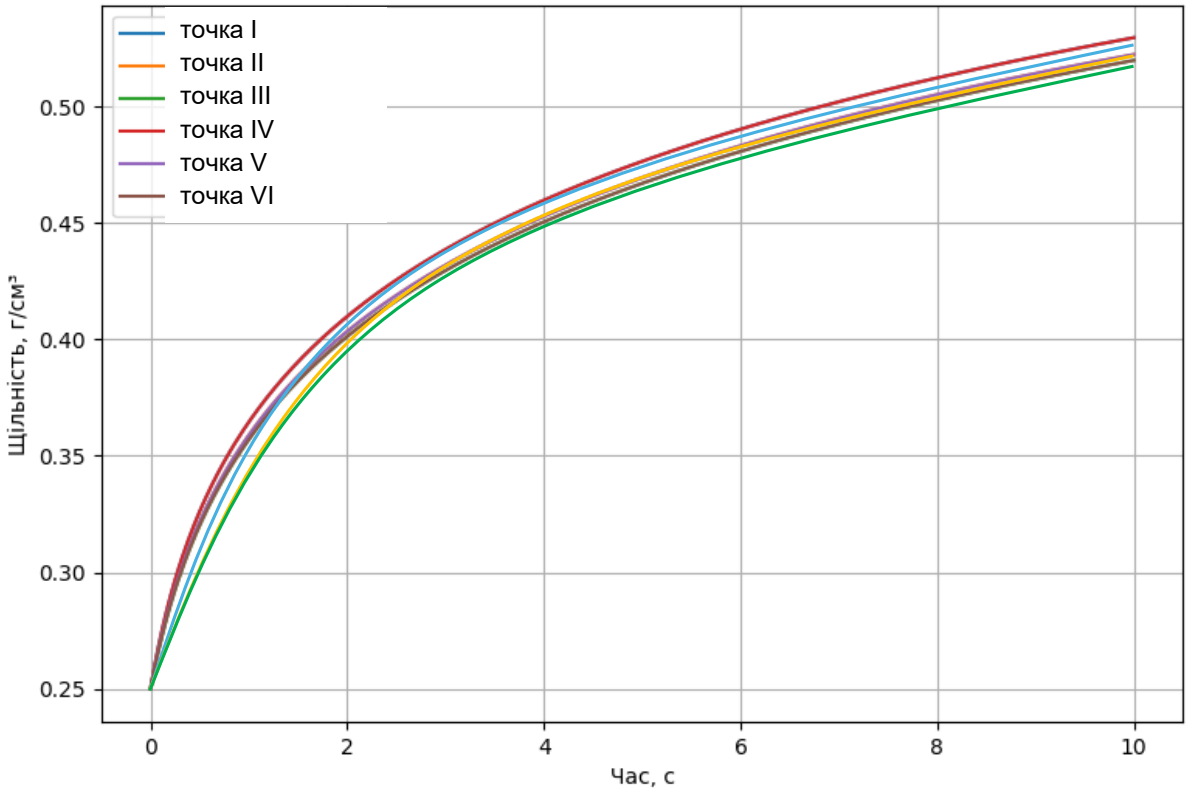

Рис. 4. Залежність об'ємної щільності від часу при спільній дії одноосьового стисканні, повздовжніх коливань штока і крутильних коливань ємності в характерних точках меридіонального перетину циліндричного зразка із каоліну H1 special

Таким чином спостерігаємо наступну фізичну картину: найбільше ущільнення зверху оскільки максимальний осьовий тиск; низ ущільнюється слабше через розподіл напружень згідно моделі Янссена; радіальна неоднорідність майже зникає внаслідок сильних крутильних коливань. В результаті спостерігаємо загальне зростання щільності від 0,25 до 0,55 г/см^3.

Комбіновані осьові і крутильні коливання майже подвоюють щільність, знімають аркування, роблять ущільнення більш рівномірним, різко зменшують роль тертя по стінці.

Висновки

Представлене дослідження стратегічно пов'язує поставлену мету – вивчення ущільнюваності сипучих матеріалів за специфічних умов механічного навантаження – із розробкою та верифікацією відповідних фізико-математичних моделей. Використання когезійного каоліну H1 special як об'єкта аналізу дозволило повною мірою апробувати розроблену методику та конструкцію експериментальної установки, що забезпечує багатовекторний вплив на матеріал. Аналітичний огляд отриманих даних підтверджує, що застосований комплексний підхід дозволив точно оцінити ефективність комбінованого навантаження на пористу структуру порошку. Розроблені моделі продемонстрували високу здатність описувати динаміку зміни об'ємної щільності, що свідчить про повне досягнення мети дослідження та

відповідність отриманих результатів заявленій темі. Це закладає надійний науковий фундамент для переходу від методологічного підтвердження до детального аналізу етапів реалізації дослідження.

Для глибокого розуміння динаміки поведінки когезійних матеріалів критично важливим є поетапний аналіз факторів, що обумовлюють їхнє ущільнення під дією зовнішніх сил. Процес дослідження був реалізований у наступній хронологічній послідовності:

- Об'єктом вивчення виступив когезійний каолін H1 special (F_J=3), випробування якого проводилися на спеціалізованій установці, оснащеній лінійним та кроковим електродвигунами.
- На етапі чистого одноосьового стиснення (до 318 кПа) було зафіксовано виражений ефект аркування, що обмежувало рівномірність ущільнення за висотою зразка.
- Впровадження поздовжніх коливань (50 Гц, 2g) забезпечило руйнування когезійних арок та зниження внутрішнього тертя, що призвело до зростання щільності на 17–20% (до рівня 0,47 г/см³).
- Фінальний етап характеризувався комбінованою дією, де до осьового навантаження та поздовжніх вібрацій додалися крутильні коливання ємності (45 Гц), що генерували тангенціальне прискорення на рівні 7g.
- В результаті такого синергетичного впливу було зафіксовано зростання щільності з початкових 0,25 г/см³ до 0,55 г/см³, що фактично подвоює вихідні показники.
- Експериментально доведено, що динамічна рекомпакція структури під дією комбінованих коливань нівелює вплив пристінного тертя та суттєво гомогенізує розподіл щільності.

Отримані кількісні показники створюють основу для подальшої концептуалізації та фізичного узагальнення параметрів процесу.

Стратегічна важливість переходу від емпіричних спостережень до фізичного трактування параметрів ущільнення полягає у визначенні механізмів перебудови структури сипучого середовища. Ключовим індикатором «чутливості» порошку до механічного впливу виступає безрозмірний коефіцієнт стисливості *a*, зростання якого від 0,15 до 0,32 під дією вібрації свідчить про інтенсифікацію руйнування агломератів. Математично цей процес описується через модель Янссена, де характеристична довжина 0,156 м визначає масштаб падіння тиску за висотою внаслідок ефекту аркування.

Наукове значення результатів полягає у підтвердженні того, що ущільнення при вібрації відбувається за рахунок динамічної рекомпакції структури, а не через збільшення тиску, оскільки розрахований додатковий динамічний компонент (0,5 кПа) є мізерним порівняно зі статичним навантаженням (318 кПа). Застосування значного тангенціального прискорення (7g) при крутильних коливаннях забезпечує нівелювання радіальної неоднорідності, що докорінно змінює інженерний підхід до оцінки ущільнюваності, роблячи його більш адекватним фізичній природі когезійних середовищ.

Валідність отриманих результатів потребує критичного оцінювання умов, за яких було сформовано фізико-математичну модель. Слід враховувати, що характер оцінки, який полягає у використанні логарифмічної залежності, виступає наближеною моделлю, оптимальною для практичних розрахунків, але такою, що має певні допуски. Тому для досягнення високої прецизійності прогнозування результати потребують верифікації через такі фундаментальні моделі, як Heckel, Kawakita, Cam-Clay або Drucker-Prager-Cap. Крім того, подальша деталізація вимагає залучення методу дискретних елементів (DEM) та використання реальних компресійних кривих конкретного матеріалу для уточнення параметрів рекомбінації частинок. Ці обмеження визначають вектор подальшого наукового пошуку.

Подальший розвиток даної тематики має зосереджуватися на врахуванні ефекту повзучості матеріалу, впровадженні методу скінченних елементів (FEM) для високоточного прогнозування напружено-деформованого стану та дослідженні впливу вологості середовища на динаміку рекомпакції структури порошку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] M. Černý, J. Petruš and I. Chamradová, "The Influence of Porosity on Mechanical Properties of PUR-Based Composites: Experimentally Derived Mathematical Approach", *Polymers*, 15(8), 1960. 2023. https://doi.org/10.3390/polym15081960.

[2] Xiaoli Zhu, Yi Xu, Qiuya Tu, Hanqiao Che and Haigang Wang, "Advanced measurement techniques for gas-solids fluidized beds in the power and energy industry - A review", *Measurement: Energy*, Volume 4, 100030. 2024. https://doi.org/10.1016/j.meaene.2024.100030.

[3] K. Szwajka, M. Szewczyk and T. Trzepieciński, "Experimental Compaction of a High-Silica Sand in Quasi-Static Conditions", *Materials*, 16(1), 28. 2023. https://doi.org/10.3390/ma16010028.

[4] Zhazira Berkinova, Assem Sauirbayeva, Almaz Kenzheshov, Boris Golman and Christos Spitas, "Experimental and numerical analysis of compaction of fine powder bed under artificial high gravity for additive manufacturing", *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*, Volume 12, 100178. 2026. https://doi.org/10.1016/j.aime.2025.100178.

[5] Jerzy Rojek, Szymon Nosewicz, Kamila Jurczak, Marcin Chmielewski and Kamil Bochenek and Katarzyna Pietrzak, “Discrete element simulation of powder compaction in cold uniaxial pressing with low pressure”, *Computational Particle Mechanics*, Volume 3, Issue 4, Pages 513-524. 2016. https://doi.org/10.1007/s40571-015-0093-0.

[6] A. Dalirnasab, M. Fatehi Marji, H. R. Nejati & M. Mohebi, “Effects of porosity on the strength and mechanical behaviour of porous geo-materials under cyclic loading: Mechanics of Porous Geo-Materials”, *Rudarsko-geološko-Naftni Zbornik*, *39*(2), 15-30. 2024. https://doi.org/10.17794/rgn.2024.2.2.

[7] N. Xiao, J.-Q. Chen, X. Qiu, F. Huang & T.-H. Ling, “Study on the Relationship Between Porosity and Mechanical Properties Based on Rock Pore Structure Reconstruction Model”, *Applied Sciences*, 15(13), 7247. 2025. https://doi.org/10.3390/app15137247.

[8] G. Lu and Y. Tao, “Experimental study into the propagation and attenuation of blasting vibration waves in porous rock-like materials”, *Front. Mater*, 10:1284158. 2023. doi: 10.3389/fmats.2023.1284158.

[9] M. Berdychowski, J. Górecki, A. Biszczanik and K. Wałęsa, “Numerical Simulation of Dry Ice Compaction Process: Comparison of Drucker-Prager/Cap and Cam Clay Models with Experimental Results”, *Materials*, 15(16), 5771. 2022. https://doi.org/10.3390/ma15165771.

[10] O. Mitrosz, M. Kurpińska, M. Miśkiewicz, *et al.*, “Effect of vibration duration on strength and permeability of pervious concrete with recycled aggregate and low-carbon cements”, *Sci Rep* 15, 35905. 2025. https://doi.org/10.1038/s41598-025-19842-6.

[11] V. Sharma, N. Grujovic, F. Zivic and V. Slavkovic, “Influence of Porosity on the Mechanical Behavior during Uniaxial Compressive Testing on Voronoi-Based Open-Cell Aluminium Foam”, *Materials*, 12(7), 1041. 2019. https://doi.org/10.3390/ma12071041.

[12] F. M. Zaid, H. Al-Rubaye, T. M. Aljuwaya and M. H. Al-Dahhan, “Assessment of the Dimensionless Groups-Based Scale-Up of Gas–Solid Fluidized Beds”, *Processes*, *11*(1), 168. 2023. https://doi.org/10.3390/pr11010168.

[13] Chunguang Zhou, Christian Jonasson, Marcus Gullberg, Fredrik Ahrentorp and Christer Johansson, “Measurement and modeling of solids flow behaviors in an aerated standpipe and inclined pipe of circulating fluidized bed full-loop system”, *Powder Technology*, Volume 449, 120414. 2025. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.120414.

[14] Samadi Mahdi, Rostampour Vahid and Abdollah Pour Shamsollah, “A review of solid particles mass flow rate measuring methods: screening analytic hierarchy process for methods prioritization”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 359, 44. 2022. DOI: 10.1007/s40430-022-03663-z.

[15] Mohmad M. Thakur, Sohanjit Ghosh and Ryan C. Hurley, “On rapid compaction of granular materials: Combining experiments with in-situ imaging and mesoscale modeling”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Volume 186, 105576. 2024. https://doi.org/10.1016/j.jmps.2024.105576.

[16] A. V. Laptiev, “New Die-Compaction Equations for Powders as a Result of Known Equations Correction: Part 1–Review and Analysis of Various Die-Compaction Equations”, *Powders*, 3(1), 111-135. 2024. https://doi.org/10.3390/powders3010008.

[17] Ku Quan, Zhao Jidong, Mollon Guilhem and Zhao Shiwei, “Compaction of highly deformable cohesive granular powders”, *Powder Technology*, 118455, 421. 2023. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.118455.

[18] Nurettin Yilmaz, Luca Placidi and Anil Misra, “Exploring One-Dimensional Uniaxial Compression through a Granular Micromechanics Model”, *Powder and Particle Journal*, KONA, advpub, 2026014. 2025. DOI:10.14356/kona.2026014.

[19] Juanlan Zhou, Mulian Zheng, Qiwei Zhan, Rubing Zhou, Yongsheng Zhang and Yaqi Wang, “Discrete element modelling of the uniaxial compression behavior of pervious concrete”, *Case Studies in Construction Materials*, Volume 18, e01937. 2023. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01937.

[20] R. Sivak, V. Kulykivskyi, V. Savchenko, S. Minenko and V. Borovskyi, “Determination of porosity functions in the pressure treatment of iron-based powder materials in agricultural engineering”, *Scientific Horizons*, 26(3), 124-134. 2023. DOI: 10.48077/scihor3.2023.124.

Стаття надійшла до редакції 02.02.2026 р.
Прийнята до друку після рецензування 18.03.2026 р.
Опублікована 30.03.2026

Сивак Роман Іванович – д-р техн. наук, професор, професор кафедри галузевого машинобудування, https://orcid.org/0000-0002-7459-2585, e-mail: sivak_r_i@ukr.net

Наляжний Володимир Сергійович – аспірант, https://orcid.org/0009-0009-6185-3051, e-mail: vova.naliazhnyi@gmail.com

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Музичук Василь Іванович – канд. техн. наук, доцент, викладач вищої категорії, викладач спеціальних дисциплін методичної комісії механічного профілю, https://orcid.org/0009-0002-1132-7693, e-mail: musvasil1972@gmail.com

Вінницький професійний коледж сфери послуг, м. Вінниця

R. Sivak[1]
V. Muzychuk[2]
V. Naliazhnyi[1]

Compactness of bulk materials under conditions of combined vibration impact

[1]Vinnytsia National Technical University
[2]Vinnytsia Professional College of Services

Bulk density and compactability of bulk materials play an important role in technological processes. Although compression by static loading can be reproduced and mathematically described, the effects of shocks and vibrations remain very poorly understood. The study of the rheological behavior of dispersed media under mechanical loading is of strategic importance for the optimization of industrial processes, where the porosity of the material critically depends on the systemic compaction state. Since standard methods for assessing compaction are predominantly qualitative in nature, ensuring the reproducibility of rheological characteristics in the aerated state as a basic level requires the implementation of precise mathematical models. Therefore, a study was conducted to study the effect of uniaxial loading and vibrations on the compression of bulk materials. The aim of the study is a comprehensive analysis of the effectiveness of the combined vibration effect on the compaction process of cohesive kaolin powder H1 special. Within the framework of the work, a logarithmic compaction model was used, which demonstrates a high quality of approximation for finely dispersed systems at peak static pressure, taking into account the Janssen characteristic length, lateral pressure coefficient and friction. It was established that the integration of dynamic loads significantly transforms the dimensionless compressibility coefficient: from the base level of 0.15 under static compression to 0.22 under axial vibrations (50 Hz, ~2g) and 0.32 when adding a reversible torsional effect (45 Hz). Despite the fact that the additional dynamic pressure is insignificant compared to the static maximum, the main physical factor is the vibrational recompaction of the structure, which ensures an increase in bulk density due to the use of a combined compaction mode. The magnitude of the tangential acceleration allows you to effectively destroy cohesive arches, level the arching effect according to the Janssen model and eliminate radial density heterogeneity. The implementation of the developed design of the device for combined impact allows achieving almost doubling of bulk density and ensuring high homogeneity of the composite structure on an industrial scale.

Keywords: dispersed medium, compaction, vibration, cohesive powder, pressure, friction, recompaction, bulk density.

Sivak Roman – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Industrial Mechanical Engineering, https://orcid.org/0000-0002-7459-2585, e-mail: sivak_r_i@ukr.net

Muzychuk Vasyl – Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Higher Category Teacher, Teacher of Special Disciplines of the Methodological Commission of the Mechanical Profile, https://orcid.org/0009-0002-1132-7693, e-mail: musvasil1972@gmail.com

Naliazhnyi Volodymyr – Ph. D. Student, https://orcid.org/0009-0002-1132-7693, e-mail: musvasil1972@gmail.com