

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВЕРТИКАЛЬНИХ ВІБРАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ НА ВЗАЄМОДІЮ РОБОЧОГО ОРГАНУ ВІБРОПЛОЩАДКИ З БЕТОННОЮ СУМІШШЮ

Микола Нестеренко

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», пр. Віталія Грицаєнка, 24,
Полтава, Україна, 36011, nesterenkonikola@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4073-1233

Василь Ведмідь

аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», пр. Віталія Грицаєнка, 24,
Полтава, Україна, 36011, vvedmyd@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1514-1212

У статті представлено результати дослідження процесу ущільнення полістиролбетонної суміші під дією вертикальних гармонійних коливань віброплощадки. Запропоновано математичну модель, яка описує поведінку легкобетонного середовища як пружно-в'язкої системи з розподіленими параметрами, враховуючи ефективну густину, модуль пружності та коефіцієнт демпфування суміші. Враховано специфіку полістиролбетону, який містить до 60% об'ємного наповнювача у вигляді кульок пінополістиролу діаметром 3–6 мм. Проведено експериментальні дослідження на лабораторній віброплощадці, в якій змінювалися висота шару суміші та параметри вібраційного збудження. Встановлено, що амплітуда коливань у верхніх шарах значно зменшується внаслідок високого демпфування, що характерне для цього матеріалу. Показано необхідність коригування режимів ущільнення залежно від висоти шару та властивостей суміші. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні ефективних вібраційних систем ущільнення легких бетонів з полімерними заповнювачами у будівельному виробництві.

Ключові слова: полістиролбетон, ущільнення бетонної суміші, вібраційна обробка, демпфування, математичне моделювання, вертикальні коливання, віброплощадка, легкі бетони, пінополістирольний заповнювач.

Актуальність роботи. Вібраційні технології широко застосовуються у будівельній галузі для ущільнення бетонних сумішей та формування виробів із бетону. Оптимізація процесів віброзбурення дозволяє підвищити якість кінцевого продукту, зменшити дефекти, такі як пористість і неоднорідність, а також скоротити витрати матеріалів та енергоресурсів.

Вивчення процесів ущільнення легких бетонних сумішей, зокрема полістиролбетону, є актуальним напрямом сучасних досліджень у галузі технологій будівельних матеріалів. Полістиролбетон, що містить як заповнювач кульки пінополістиролу, характеризується низькою щільністю та підвищеною пластичністю, що потребує особливого підходу до методів ущільнення. На відміну від традиційного важкого бетону, де ефективність ущільнення досягається стандартними режимами вібрації, легкі суміші демонструють значну залежність від параметрів збудження, режиму деформації та граничних умов.

Дослідження вертикальних вібраційних режимів взаємодії робочого органу віброплощадки

з бетонною сумішшю є актуальним у контексті покращення технологічного процесу виготовлення бетонних виробів.

Оптимізація параметрів вібраційного впливу може забезпечити рівномірне ущільнення суміші, підвищити довговічність та експлуатаційні властивості бетонних виробів. Зважаючи на сучасні вимоги до якості будівельних матеріалів та технологічної ефективності виробництва, дослідження вібраційних режимів віброплощадки є важливим завданням для інженерної науки та практики.

Аналіз публікацій по темі дослідження. У роботах [1–3] описані залежності між висотою шару виробу та зміною амплітуди вібрацій за висотою. Експериментально доведено, що зі збільшенням товщини зростають втрати енергії внаслідок демпфування, особливо в легких бетонних сумішах, де внутрішній опір є значно більшим, ніж у важких бетонах.

Особливої уваги набувають моделі з урахуванням приведеної маси ущільнюваного шару. У публікаціях [2–3] зазначено, що зростання пластичних деформацій у бетоні призводить до

зменшення приєднаної маси в коливальній системі, оскільки частина енергії витрачається на незворотні структурні зміни. Це потребує включення коефіцієнта відносної пластичної деформації в математичні моделі оцінки ефективності ущільнення.

Дослідження [4, 6, 7] зосереджені на аналізі енергетичних характеристик процесу ущільнення, зокрема питомої енергії ущільнення та коефіцієнта енергетичної ефективності. Однак ці роботи переважно зосереджені на важких бетонах, тому подальші дослідження повинні бути спрямовані саме на легкі матеріали з полімерними заповнювачами.

Матеріал і результати досліджень. Для визначення характеру взаємодії віброплощадки з ущільнюваною бетонною сумішшю при вертикально направлених коливаннях досліджуємо динамічну систему «віброплощадка – бетонна суміш» (рис. 1). У даній системі віброплощадка конструктивно виконана з плоским днищем, а оброблюване середовище представлено у вигляді системи з розподіленими параметрами [1, 8]. Віброплощадка змонтована на основі, за допомогою пружних амортизаторів, на яку діє збурення у вигляді вертикальної направленої гармонійної сили. Цей тип вібраційної дії є характерним для механізмів ущільнення бетонних сумішей.

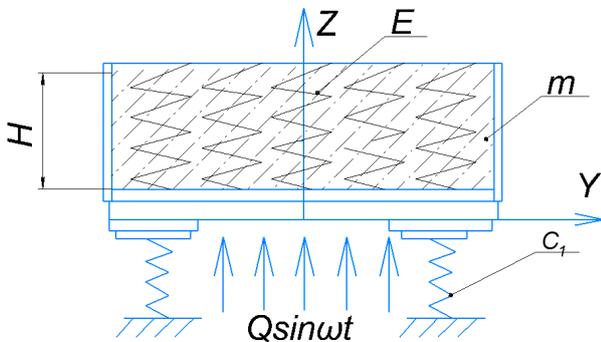


Рис. 1. Розрахункова схема динамічної системи «віброплощадка – бетонна суміш» при вертикальному напрямку коливань

При цьому, для точного опису динамічної взаємодії слід враховувати не лише пружні, а й в'язкопластичні властивості суміші, оскільки бетонна суміш в процесі ущільнення демонструє складну поведінку, що включає як пружні, так і пластичні ефекти. Таким чином, деформація середовища буде обумовлена не лише пружними силами, а й силами, що виникають через внутрішнє тертя та взаємодію частинок суміші.

Таку модель можна доповнити розглядом сил інерції, які виникають при вертикальних коливаннях віброплощадки, а також впливу амортизаційних елементів на поглинання частини енергії в процесі вібраційного ущільнення. Математичне описання цієї взаємодії потребує вирішення диференціальних рівнянь для системи «віброплощадка – бетонна суміш», що дозволяє отримати точні результати для напружень, деформацій та динамічних характеристик даного процесу [4, 8].

Оптимізація режимів роботи віброплощадки дозволяє скоротити енергетичні витрати та мінімізувати зношення обладнання, що має значний економічний ефект [9, 10].

Правильно підібрані режими вібрації сприяють зменшенню впливу залишкових напружень у бетонних виробках, що позитивно позначається на їх експлуатаційних характеристиках [11]. Наприклад, удосконалені методи віброущільнення дозволяють скоротити час технологічного циклу та знизити ризик появи тріщин у процесі твердіння бетону. Зменшення енергетичних витрат та зношення обладнання також сприяє екологічній ефективності виробництва, оскільки зменшується споживання ресурсів і кількість відходів [12].

Для легкобетонних сумішей, зокрема, для полістиролбетонної суміші, потрібно проводити корегування існуючих математичних моделей [1, 4, 8], оскільки параметри бетонних сумішей відрізняються (таблиця 1).

Відому математичну модель ущільнення бетонної суміші [1] було адаптовано для процесу ущільнення полістиролбетонної суміші.

При дослідженні параметрів математичної моделі ущільнення полістиролбетонної суміші враховувалися такі передумови та допущення.

Таблиця 1

Порівняння параметрів бетонних сумішей

Параметр	Важкий бетон	Полістиролбетон
Густина ρ	2200–2500 кг/м ³	~1000–1200 кг/м ³
Модуль пружності E	~30 ГПа	~1–5 ГПа
Коефіцієнт внутрішнього тертя	Помірний	Підвищений (через використання кульок полістиролу)
Демпфування	Слабке	Високе

Суміш розглядається як суцільне середовище. Як заповнювач використовують кульки полістиролу, діаметр 3–6 мм, вміст заповнювача 60%. Мікроструктура полістиролбетону (наявність пінополістирольних кульок) згладжується, і суміш описується як умовно неперервне середовище з ефективними (усередненими) характеристиками.

Коливання та переміщення частинок суміші розглядаються лише по одній координаті z (в вертикальному напрямку), що перпендикулярна основі форми. Контакт між сумішшю та формою є ідеальним. Не враховується ковзання або прослизання суміші по стінках форми.

Усі фізико-механічні параметри (густина, модуль пружності, демпфування) вважаються постійними у часі протягом короткого інтервалу розрахунку.

Полістиролбетон має пружно-в'язкі властивості. Поведінка описується як демпфоване хвильове середовище – враховується гасіння амплітуди в процесі розповсюдження деформаційної хвилі.

Внутрішні втрати енергії моделюються лінійним демпфуванням. Замість повної реологічної моделі використовується спрощений демпфуючий вираз $2\beta \frac{\partial u}{\partial t}$, пропорційний швидкості деформації.

Суміш моделюється як пружно-в'язке середовище з розподіленими параметрами:

$$\rho \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial t^2} + 2\beta \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} = E \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2}, \quad (1)$$

де $u(z, t)$ – вертикальне переміщення частинки суміші на висоті z у момент часу t ,
 $\rho_{\text{еф}}$ – ефективна густина суміші,
 E – ефективний модуль пружності,
 β – коефіцієнт демпфування.

Приймаємо наступні граничні умови. Нехай $z=0$ – дно форми (контакт із рухомою рамою), $z=H$ – верхній рівень суміші. Нижня межа (вібрація) $u(0, t) = Q \sin(\omega t)$, верхня межа (вільна) $\frac{\partial u(H, t)}{\partial z} = 0$.

Для розрахунків доцільно використати: дискретизацію простору $z_i = i \cdot \Delta z$, $i = 0, 1, \dots, N$, та дискретизацію часу $t_n = n \cdot \Delta t$, $n = 0, 1, \dots, M$, явну схему з демпфуванням

$$u_i^{n+1} = 2u_i^n - u_i^{n-1} + \frac{\Delta t^2 c^2}{\Delta z^2} (u_{i+1}^n - 2u_i^n + u_{i-1}^n) - 2\beta \Delta t (u_i^n - u_i^{n-1}). \quad (2)$$

Розглянемо елементарний шар суміші товщиною dz . На нього діють: внутрішні пружні сили $\sigma(z + dz) - \sigma(z)$, демпфуючі сили (внутрішнє тертя), інерційні сили 0000 .

Сила, що діє на елементарний шар суміші

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} \cdot dz + W_{\text{еф}} = \rho \cdot dz \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (3)$$

де $W_{\text{еф}}$ – в'язкі втрати енергії через в'язко-пружну взаємодію частинок суміші.

Поділивши вираз (3) на dz і враховуючи, що напруження σ має дві складові, отримали

$$\sigma = E \cdot \frac{\partial u}{\partial z} + \xi \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right), \quad (4)$$

де E – модуль пружності (пружна складова),
 ξ – коефіцієнт в'язкого опору.

Після перетворень отримаємо вираз (5)

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(E \cdot \frac{\partial u}{\partial z} + \xi \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \right) = \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (5)$$

Припустимо, що E та ξ – сталі по всій висоті (на першому етапі моделювання), тоді отримаємо

$$E \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + \xi \cdot \frac{\partial^3 u}{\partial z^2 \partial t} = \rho \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (6)$$

Для того, щоб спростити розв'язання даного рівняння, вводимо коефіцієнт демпфування β [1] і швидкість хвилі $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$. Тоді отримаємо

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + 2\beta \frac{\partial u}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (7)$$

Отримане узагальнене рівняння для полістиролбетону, тобто для легкого бетону з високим демпфуванням, яке відрізняється від моделі для важкого бетону. У важкій бетонній суміші хвилі розповсюджуються з високою швидкістю та відбиванням, а при ущільненні полістиролбетону – характер руху хвиль затухаючий з малим проникненням.

Ефективна густина суміші $\rho_{\text{еф}}$, враховує густину в'язучого матеріалу ρ_e і заповнювача ρ_z а також його об'ємну частку ϕ :

$$\rho_{\text{еф}} = \rho_e \cdot (1 - \phi) + \rho_z \cdot \phi, \quad (8)$$

ϕ – об'ємна частка заповнювача (приймаємо 0,6 для 60%),

ρ_e – густина в'язучого матеріалу $\rho_e \approx 2200 \text{ кг/м}^3$.

Ефективний модуль пружності $E_{\text{еф}}$ може бути оцінений через емпіричні залежності або з урахуванням об'ємного складу:

$$E_{\text{еф}} \approx E_B \cdot (1 - \phi)^n, \quad (9)$$

E_B – модуль пружності цементного каменю (в межах 15–30 ГПа),

n – емпіричний коефіцієнт (приймають від 2 до 3 для легких бетонів).

Коефіцієнт демпфування β визначає втрати енергії, залежить від внутрішнього тертя суміші.

Може бути встановлений експериментально або через коефіцієнт в'язкого опору ξ або оцінено на основі експериментальних даних (наприклад, через затухання амплітуди в часі)

$$\beta = \frac{2\rho_{\text{эф}}}{\xi} \quad (10)$$

Оптимальна кутова частота ω . Для максимального ущільнення бажано підбирати режим роботи наближений до резонансу системи

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{k}{m_{\text{зар}}}} \quad (11)$$

де k – жорсткість опор віброплощадки, $m_{\text{зар}}$ – загальна маса системи, де враховані маси рухомої рами установки, форми та суміші.

Диференціальне рівняння коливань системи «вібраційна установка – бетонна суміш» при вертикальному русі рухомої рами з урахуванням приведеної маси має вигляд:

$$m_{\text{эф}} \cdot \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + \xi \cdot \frac{du(t)}{dt} + k \cdot u(t) = Q(t), \quad (12)$$

де $u(t)$ – переміщення платформи (або основи суміші),

ξ – коефіцієнт демпфування (враховує внутрішнє тертя в суміші),

k – жорсткість системи, яка враховує властивості матеріалу опори та пружні властивості суміші, $Q(t) = Q_0 \sin(\omega t)$ – збуджуюча сила.

При моделюванні руху у всьому об'ємі суміші (по координаті z) можна використати хвильове диференціальне рівняння з демпфуванням:

$$\frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial t^2} + 2\beta \frac{\partial u(z, t)}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2}, \quad (13)$$

де $u(z, t)$ – переміщення в точці z у момент часу t ,

$c = \sqrt{\frac{E_{\text{эф}}}{\rho_{\text{эф}}}}$ – швидкість поширення деформаційної хвилі.

Аналіз отриманих рівнянь свідчить, що значення зведеної маси ущільнюваного шару полістиролбетонної суміші під впливом вертикальної вібрації визначається рядом ключових параметрів. До найважливіших з них належать: динамічний модуль пружної деформації суміші, коефіцієнт внутрішнього опору (демпування), ефективна щільність суміші, фазова швидкість поширення збуджуючої сили в середовищі, кутова частота вимушених коливань, висота ущільнюваного шару, площа опорної поверхні днища форми.

Зважаючи на особливості структури полістиролбетону (наявність 60% легкого заповнювача у вигляді пінополістирольних кульок діаметром 3–6 мм), ці параметри мають інші значення порівняно з важким бетоном. Зокрема, ефективна густина суттєво зменшується, що впливає на резо-

нансні властивості системи, а підвищене внутрішнє тертя забезпечує високий рівень демпфування.

Для проведення функціонального аналізу аналітичних залежностей, процес взаємодії ущільнюваної полістиролбетонної суміші при вертикально направлених коливаннях було досліджено на лабораторній віброплощадці (рис. 2). Ця установка дозволяє регулювати параметри вібраційного впливу та моделювати умови ущільнення в різних режимах.

Технічні характеристики лабораторної установки.

Маса рухомої рами: 1000 Н (від 500 Н до 1500 Н регульовано).

Маса форми: 300 Н.

Розміри внутрішньої форми: 800 × 600 × 200 мм.

Жорсткість пружних опор у вертикальному напрямку: 120 кН/м.

Висота шару полістиролбетону, що досліджувались: Н= 50, 100, 150, 200 мм.



Рис. 2. Лабораторна віброплощадка

Режими вібраційного впливу наведені в таблиці 2. Вони є основою для подальшого моделювання поведінки полістиролбетонної суміші під час ущільнення та для оцінки динамічного відгуку системи при різних режимах вібраційного впливу.

Таблиця 2

Режими вібраційного впливу

Режим	Кутова частота ω , рад/с	Амплітуда сили F_0 , Н	Амплітуда коливань платформи без суміші, мм
1	290	2100	0,4
2	250	1700	0,6
3	180	1300	0,8

На графіку зображеному на рис. 2 показано, як амплітуда коливань зменшується за висотою ущільнюваного шару полістиролбетонної суміші.

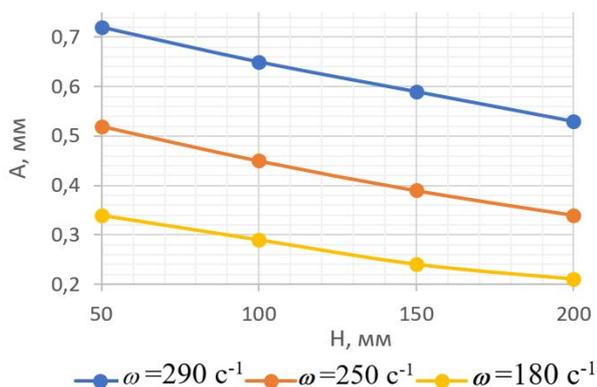


Рис. 3. Розподіл амплітуди коливань по висоті шару суміші залежно від кутової частоти та вимушуючої сили віброзбуджувача:
 1 – $\omega=290 \text{ с}^{-1}$, $F_0=2100\text{Н}$; 2 – $\omega=250 \text{ с}^{-1}$, $F_0=1700\text{Н}$; 3 – $\omega=180 \text{ с}^{-1}$, $F_0=1300\text{Н}$

Видно, що зі збільшенням висоти шару суміші, хвилі затухають сильніше через високий демпфуючий ефект, а амплітуда в верхній частині шару може бути на порядок меншою, ніж на нижній поверхні форми, яка встановлена на раму. Отримані результати підтверджують, що при ущільненні виробів з великою висотою потрібне або підвищення величини збуджуючої сили, або пошарове ущільнення.

Висновки. У роботі проведено теоретичне та експериментальне дослідження процесу ущіль-

нення полістиролбетонної суміші під дією вертикально спрямованих гармонійних коливань віброплощадки. На основі аналізу фізико-механічних властивостей легких бетонів з полімерним заповнювачем було адаптовано математичну модель ущільнення, яка враховує ефективну густину суміші, модуль пружності, коефіцієнт внутрішнього демпфування та хвильову природу поширення деформацій.

Встановлено, що процес ущільнення полістиролбетону суттєво відрізняється від важких бетонів через високе внутрішнє тертя, знижену густину та значне затухання деформаційної хвилі. Згідно з результатами моделювання та лабораторного експерименту, амплітуда коливань суттєво зменшується по висоті шару суміші, що зумовлює нерівномірність ущільнення при великих товщинах. Це вимагає або пошарового ущільнення, або оптимізації параметрів збудження – зокрема, збільшення амплітуди чи частоти вібрацій.

Отримана математична модель дозволяє враховувати специфіку демпфування у легких бетонних сумішах та забезпечує точне визначення динамічного відгуку системи. Застосування цієї моделі в практиці проектування віброплощадок і визначення оптимальних режимів вібрації може сприяти підвищенню якості виробів із полістиролбетону, зменшенню енергетичних витрат та підвищенню ефективності виробничого процесу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Назаренко І. І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем : навч. посіб. 2-ге вид. Київ : Видавничий Дім «Слово», 2010. 440 с.
2. Черевко О. М., Давиденко Ю. О., Черевко П. О. Вплив параметрів вібрації на процес ущільнення бетонних сумішей. Збірник наукових праць (Галузеве машинобудування, будівництво) / редкол.: О. Г. Онищенко (голов. ред.) [та ін.]. Полтава : ПолтНТУ, 2010. Вип. 26. С. 138–146.
3. Назаренко І. І., Дяченко О. С. Експериментальні дослідження робочого процесу вібраційної установки для ущільнення бетонних сумішей зі змінним режимом роботи. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2019. № 92. С. 24–31. <https://doi.org/10.31493/gbdmm1892.0301>
4. Maslov O., Savielov D., Salenko Y., Javadova M. Theoretical study of the dynamic system «Vibration Platform – Polymer Concrete» stress–strain state. Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations (ICBI 2020) : Lecture Notes in Civil Engineering. Cham : Springer, 2022. Vol. 181. P. 191–201. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_19
5. Maslov O., Savielov D. Theoretical definition of the law of motion for mobile frame of a vibrating platform with polymer concrete when compacting it. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. 2020. – No 4. С. 84–90. DOI: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.4.84-90>
6. Берник П. С., Чубик Р. В., Таянов Р. В. Алгоритм для визначення частоти та амплітуди коливань вібромашин. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2005. № 2 (40). С. 1–6.
7. Ємельянова І. А., Гордієнко А. Т., Анищенко А. І. Визначення траєкторії руху бетонної суміші з урахуванням сил опору. *Науковий вісник будівництва*. Харків : ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2010. Вип. 52. С. 444–447.
8. Маслов О. Г., Нестеренко М. П., Склярєнко Т. О. Аналітичні дослідження коливань вібраційної установки для формування бетонних виробів для дорожнього будівництва у режимі холостого ходу. *Збірник наукових праць (Галузеве машинобудування, будівництво)*. Полтава : ПолтНТУ, 2012. Вип. 4 (34). С. 249–254.
9. Нестеренко М. П., Склярєнко Т. О., Педь Д. С., Молчанов П. О. Математичне моделювання коливань рухомої рами вібраційної установки для формування малогабаритних залізобетонних виробів. Тези 64-ї наук. конф. професорів, викладачів, наук. працівників, аспірантів та студентів (17 квіт. – 11 трав. 2012 р.). Полтава : ПолтНТУ, 2012. Т. 3. С. 56–57.

10. Назаренко І. І., Нестеренко М. М., Нестеренко Т. М., Ведмідь В. В. Вібраційне обладнання для формування стінових панелей. Енергоощадні машини і технології : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. (17–19 трав. 2022 р.). – Київ : КНУБА, 2022. – С. 12–14.

11 Назаренко І. І., Нестеренко М. М. Дослідження конструктивних та технологічних параметрів вібраційних машин для формування малогабаритних виробів. Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2021 : тези II Міжнар. наук.-техн. конф. (15 трав. 2021 р.). Вінниця : ВНТУ, 2021. С. 377–378.

12. Назаренко І., Дєдов О., Дьяченко О., Свідерській А. Огляд і аналіз вібраційного обладнання для формування плоских залізобетонних виробів. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2017. Вип. 90. С. 49–58.

13. Назаренко І. І., Нестеренко М. М., Нестеренко Т. М., Аніщенко А. І. Лабораторний вібромайданчик зі змінно направленими коливаннями для ущільнення бетонних сумішей. *Науковий вісник будівництва*. 2020. Т. 101, № 3. С. 177–181. <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2018-101-3-177-181>

STUDY OF VERTICAL VIBRATION MODES ON THE INTERACTION OF THE WORKING BODY OF A VIBRATION PLATFORM WITH A CONCRETE MIXTURE

Mykola Nesterenko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Industrial Mechanical Engineering and Mechatronics

National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, Vitaliya Hrytsayenka, 24, Poltava, Ukraine, 36011, nesterenkonikola@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4073-1233

Vasyl Vedmid

Postgraduate Student at the Department of Industrial Mechanical Engineering and Mechatronics

National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, Vitaliya Hrytsayenka, 24, Poltava, Ukraine, 36011, vvedmyd@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1514-1212

This article presents a comprehensive study of the compaction process of polystyrene concrete mixtures subjected to vertical harmonic vibrations generated by a laboratory-scale vibration platform. Polystyrene concrete, a type of lightweight concrete incorporating expanded polystyrene beads (3–6 mm in diameter) as filler material with a volumetric content of up to 60%, exhibits significantly different mechanical and dynamic behavior compared to conventional heavy concrete. These differences include lower density, higher internal friction, and increased damping capacity, which greatly affect the efficiency and uniformity of vibration-induced compaction. A mathematical model of the “vibration platform – concrete medium” system was developed, considering the mixture as a continuous viscoelastic medium with distributed parameters. The model integrates the effects of internal damping, effective density, elastic modulus, and boundary conditions under vertical oscillations. Numerical simulations were performed alongside physical experiments using a vibration platform with variable excitation parameters and concrete layer heights ranging from 50 to 200 mm. Experimental results demonstrated that vibration amplitudes decrease significantly with height due to wave attenuation, particularly in mixtures with high damping properties. This non-uniform energy distribution leads to insufficient compaction in upper layers if the excitation parameters are not optimized. The study highlights the importance of adjusting vibration modes based on the specific physical properties of the polystyrene concrete, including the use of layer-by-layer compaction or increased excitation force for taller forms. The findings of this research contribute to improving the technological process of manufacturing lightweight concrete products and provide a basis for designing more efficient vibration systems tailored to polymer-filled concrete materials. Additionally, the obtained theoretical and experimental results can be applied to enhance structural performance, reduce material consumption, and increase the homogeneity of prefabricated elements, particularly in sustainable construction practices where weight reduction and thermal insulation are critical performance indicators.

Key words: polystyrene concrete, concrete mixture compaction, vibration processing, damping, mathematical modeling, vertical oscillations, vibration platform, lightweight concrete, expanded polystyrene filler.

REFERENCES

1. Nazarenko, I. I. (2010). *Prykkladni zadachi teorii vibratsiinykh system* (2nd ed.). Kyiv: Vydavnychiy Dim “Slovo”. [in Ukrainian].

2. Cherevko, O. M., Davydenko, Y. O., & Cherevko, P. O. (2010). Vplyv parametriv vibratsii na protses ushchilnennia betonnykh sumishei [Influence of vibration parameters on the

compaction process of concrete mixtures]. *Zbirnyk naukovykh prats (Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo)*, (26), 138–146. Poltava: PoltNTU. [in Ukrainian].

3. Nazarenko, I. I., & Diachenko, O. S. (2019). Experimental study of the vibration unit operation for

concrete mixture compaction with variable operation modes. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, (92), 24–31. <https://doi.org/10.31493/gbdmm1892.0301>

4. Maslov, O., Savielov, D., Salenko, Y., & Javadova, M. (2022). Theoretical study of the dynamic system "Vibration Platform – Polymer Concrete" stress–strain state. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations (ICBI 2020), Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 181, pp. 191–201). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85043-2_19

5. Maslov, O., & Savielov, D. (2020). Theoretical definition of the law of motion for mobile frame of a vibrating platform with polymer concrete when compacting it. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, (4), 84–90. <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.4.84-90>

6. Bernyk, P. S., Chubyk, R. V., & Tayanov, R. V. (2005). Alhorytm dlia vyznachennia chastyoty ta amplitudy kolyvan vibromashyn [Algorithm for determining the frequency and amplitude of vibrations in vibromachines]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*, (2[40]), 1–6. [in Ukrainian].

7. Yemelianova, I. A., Hordiienko, A. T., & Anishchenko, A. I. (2010). Vyznachennia traiektorii rukhu betonnoi sumishi z urakhuvanniam syl oporu [Determination of concrete mix trajectory considering resistance forces]. *Naukovyi visnyk budivnytstva*, (52), 444–447. [in Ukrainian].

8. Maslov, O. H., Nesterenko, M. P., & Skliarenko, T. O. (2012). Analytical study of vibrations in a vibration setup for forming concrete products in idle mode. *Zbirnyk naukovykh prats (Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo)*, (4[34]), 249–254. [in Ukrainian].

9. Nesterenko, M. P., Skliarenko, T. O., Ped, D. S., & Molchanov, P. O. (2012). Mathematical modeling of vibrations in a movable frame of a vibrating installation for manufacturing small-sized reinforced concrete products. In *Proceedings of the 64th Scientific Conference of Professors, Teachers, Researchers, Graduate Students and Students* (Vol. 3, pp. 56–57). Poltava: PoltNTU. [in Ukrainian].

10. Nazarenko, I. I., Nesterenko, M. M., Nesterenko, T. M., & Vedmid, V. V. (2022). Vibration equipment for forming wall panels. In *III International Scientific and Practical Conference "Energy-saving machines and technologies"* (pp. 12–14). Kyiv: KNUCA. [in Ukrainian].

11. Nazarenko, I. I., & Nesterenko, M. M. (2021). Doslidzhennia konstruktyvnykh ta tekhnolohichnykh parametriv vibratsiinykh mashyn dlia formuvannia malohabarytnykh vyrobiv [Study of design and technological parameters of vibrating machines for shaping small-sized products]. In *Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference "Prospects for the development of mechanical engineering and transport"* (pp. 377–378). Vinnytsia: VNTU. [in Ukrainian].

12. Nazarenko, I., Diedov, O., Diachenko, O., & Sviderskyi, A. (2017). Review and analysis of vibration equipment for the formation of flat reinforced concrete products. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny*, (90), 49–58. [in Ukrainian].

13. Nazarenko, I. I., Nesterenko, M. M., Nesterenko, T. M., & Anishchenko, A. I. (2020). Laboratory vibration platform with variable oscillation directions for concrete mixture compaction. *Naukovyi visnyk budivnytstva*, 101(3), 177–181. <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2018-101-3-177-181>

Стаття надійшла 20.03.2025