

М.М. Нестеренко, В.В. Ведмідь

ПЕРЕМІЩЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ВКЛЮЧЕНЬ У ЛЕГКОБЕТОННИХ СУМІШАХ ПРИ ВІБРАЦІЙНОМУ УЩІЛЬНЕННІ

Анотація. У статті розглянуто процес вібраційного ущільнення полістиролбетонної суміші з урахуванням хвильового збудження. Актуальність зумовлена необхідністю підвищення однорідності та зниження пористості легкобетонних виробів. Метою дослідження є створення динамічної моделі системи «платформа – бетонна суміш» та визначення ефективних режимів ущільнення. Методами дослідження є аналітичне моделювання, чисельний розрахунок градієнтів тиску та аналіз переміщення повітряних включень у середовищі з високою в'язкістю. Отримано залежності швидкості дрейфу бульбашок від параметрів вібрації та доведено переваги комбінованого коливального збудження. Результати можуть бути використані для оптимізації режимів ущільнення у виробництві полістиролбетону.

Ключові слова: полістиролбетон, вібраційне ущільнення, комбіновані коливання, повітряні включення, динамічний тиск, хвильові ефекти, модель установки, амплітуда, градієнт тиску, дрейф бульбашок.

Постановка проблеми. Одним із важливих чинників, що визначає якість легкобетонних виробів, є ефективне видалення повітряних включень під час вібраційного ущільнення. Наявність замкнених або частково зв'язаних повітряних пор негативно впливає на однорідність структури, щільність та міцнісні характеристики матеріалу. Механізми переміщення повітря в легкобетонних сумішах відрізняються від важких бетонів через особливості структури, меншу густину та підвищену деформативність заповнювача.

Аналіз останніх досліджень. Упродовж останніх десятиліть проблема підвищення ефективності вібраційного ущільнення легких бетонів, зокрема полістиролбетону, привертає значну увагу дослідників. У роботах [1 - 4] встановлено, що характер розподілу динамічного тиску у стовпі бетонної суміші суттєво впливає на процес витіснення повітряних включень, а імпульсне збудження забезпечує рівномірний градієнт тиску, що сприяє покращенню структури матеріалу.

Значна кількість праць [1, 3, 4] присвячена дослідженню руху повітряних бульбашок у в'язкому середовищі та їх взаємодії з коливальними полями. Зокрема, показано, що у випадку гармонічного збудження в бетонному середовищі формуються зони депресії, які можуть викликати повторне втягування повітря, що погіршує ущільнення. Також встановлено, що під впливом комбінованих (вертикальних і горизонтальних) ко-

ливань повітряні включення переміщуються по спіралеподібній траєкторії з ефективним дрейфом до поверхні.

Актуальним напрямом сучасних досліджень є моделювання взаємодії бетонної суміші з вібраційною платформою як масово-пружинної системи [2, 5, 6]. Такий підхід дозволяє врахувати динаміку збудження, демпфування та резонансні ефекти, які суттєво впливають на ефективність ущільнення, особливо в умовах використання легких заповнювачів, таких як полістирольні кульки.

Незважаючи на наявні напрацювання, недостатньо дослідженим залишається вплив висоти бетонного шару та різних режимів на переміщення повітря у полістиролбетоні при його вібраційному ущільненні. Це зумовлює потребу у подальшому дослідженні даної проблематики з метою підвищення якості легкобетонних виробів.

Мета досліджень. Метою досліджень є розроблення та обґрунтування математичної моделі процесу вібраційного ущільнення полістиролбетонної суміші з урахуванням динамічної взаємодії між вібраційною платформою, бетонною сумішшю та формою, а також дослідження впливу режимів коливального збудження на ефективність видалення повітряних включень.

Викладення основного матеріалу дослідження. Дослідження розподілу динамічного тиску по висоті стовпа суміші [4] свідчать, що при імпульсному збудженні створюється рівномірний градієнт тиску без зон негативного тиску, що сприяє ефективному витісненню повітря із суміші. Натомість гармонічне навантаження супроводжується локальними зонами депресії, які є джерелом вторинного підсмоктування повітря.

Використання комбінованих коливань (одночасне вертикальне та горизонтальне збудження) дозволяє забезпечити об'ємне ущільнення суміші: вертикальні імпульси активізують спливання включень, а горизонтальні – сприяють їх переміщенню до вільної поверхні або бічних зон форми [4]. Рух частинок можна розглядати як невеликі періодичні коливання для великих і як суцільне завихрення дрібних частинок [7].

Рух повітряних включень у легкобетонній суміші може бути змодельовано за допомогою критеріїв Рейнольдса та рівнянь гідродинаміки для руху сферичних частинок у в'язкому середовищі :

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot v_{\text{пос}}}{\mu}, \quad (1)$$

де ρ – густина суміші,

d – характерний діаметр бульбашки повітряних включень,

v – швидкість підйому,

μ – динамічна в'язкість середовища.

Розв'язуючи рівняння для умов ламінарного підйому $Re < 1$, отримаємо критичний діаметр бульбашки, здатної до ефективного спливання:

$$d = \sqrt{\frac{18\mu v}{\rho g}} \quad (2)$$

Розрахунок показує, що для легких бетонів (низька густина, висока в'язкість) повітряні бульбашки діаметром менше 0,5 мм можуть залишатися в товщі суміші, якщо не створити достатнього градієнта тиску.

Вивчаючи рух повітряних бульбашок під дією періодичних коливань, встановлено, що амплітуда переміщення бульбашки у три рази перевищує амплітуду коливань самої суміші: $u_{\text{бульб}} \approx 3 \cdot u_{\text{сер}}$

Цей ефект пояснюється тим, що повітряне включення має малу масу, тому чутливо реагує на зміни прискорення середовища, формуючи диференційований рух (дрейф) у напрямку максимального градієнта тиску.

На практиці застосовуються три типи коливального навантаження: вертикальні, горизонтальні та комбіновані коливання [7]. При вертикальному гармонічному режимі, зміна тиску в бетонному стовпі описується функцією:

$$p(z, t) = p_0(z) + \Delta p \cdot \sin(\omega t) \quad (3)$$

де $p_0(z)$ – статичний тиск на висоті z , $\Delta p \cdot \sin(\omega t)$ – амплітуда динамічного тиску, що періодично змінюється з частотою ω . В такому полі тиску повітряні включення зазнають циклічного стиснення та розширення, що, однак, не завжди супроводжується ефективним їх виштовхуванням. Як показують експерименти веденні КБ «Вібротехніка» Полтавської політехніки на окремих висотах можуть утворюватися ділянки від'ємного надлишкового тиску:

$$\frac{\partial p(z, t)}{\partial z} < 0. \quad (4)$$

У цих зонах виникає локальний підсмоктуючий ефект, який перешкоджає підйому бульбашок і навіть може втягувати повітря назад у тіло суміші, особливо при пошаровому ущільненні.

При імпульсному (неперіодичному) режимі збудження, коливання носять квазілінійний характер, що описується ступінчастими функціями або короткими тригерами тиску:

$$p(z, t) = p_0(z) + \sum_{n=1}^N A_n \cdot \delta(t - t_n), \quad (5)$$

де $\delta(t - t_n)$ – дельта-функція, яка моделює імпульс у момент t_n , а A_n – відповідна амплітуда. У цьому випадку швидкий перехід через градієнт тиску викликає хвильовий зсув суміші, а градієнт динамічного тиску $\frac{\partial p}{\partial z} \gg 0$ спрямовує повітряні бульбашки до

зон з меншим опором – переважно вгору або у вільні пори, що сприяє активному очищенню структури. Саме імпульсне ущільнення забезпечує умови, при яких повітряне включення мігрує не циклічно, а з чітко вираженим дрейфом у напрямку розвантаження:

$$\frac{dt_{\text{бульб}}}{dz} = f\left(\frac{\partial p}{\partial z}, d, \mu, \rho\right), \quad (6)$$

тобто швидкість вертикального переміщення бульбашки визначається похідною від тиску, її діаметром, в'язкістю середовища та густиною суміші. Згідно з [1], коли градієнт тиску перевищує критичне значення, починається лавиноподібне спливання включень, яке за короткий проміжок часу радикально змінює структуру шару.

У випадку комбінованих коливань, вектор коливального збудження можна розглядати як суму двох незалежних гармонічних впливів по вертикалі та горизонталі:

$$\vec{d}(t) = A_v \cdot \sin(\omega t) \cdot \hat{z} + A_h \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot \hat{x} \quad (7)$$

де A_v , A_h – амплітуди вертикального і горизонтального коливання, φ – фазовий зсув.

Такий режим призводить до складної траєкторії переміщення повітряних бульбашок:

$$\frac{dt}{dr} = v_{\text{дрейф}} = v_z + v_x = f(\nabla p, \mu, \rho, d, \omega, A), \quad (8)$$

Відповідно до формули (8) де бульбашка виконує спіралеподібний дрейф з наростаючою швидкістю, що дозволяє уникнути її ізоляції в локальних капілярах суміші. Саме комбіноване навантаження забезпечує найвищу ймовірність виведення повітря навіть з важкодоступних зон поблизу арматури чи бічних поверхонь форми.

Важливо зазначити, що характер розподілу тиску залежить також від висоти бетонного стовпа, де верхні шари мають менше статичне навантаження і, відповідно, повітря в них виходить легше, тоді як нижні потребують або збільшення частоти/амплітуди коливань, або подачі додаткового динамічного тиску. Саме тому спостерігаються ділянки з від'ємними тисками у нижній частині, які свідчать про недосконалі режими ущільнення при гармонічному навантаженні.

Таким чином, аналіз диференційного розподілу тиску та похідних швидкостей руху повітряних включень дозволяє обґрунтувати вибір режиму вібраційного ущільнення для досягнення найвищої однорідності та мінімальної пористості легкогобетонних виробів.

Модель ущільнення полістиролбетону під дією вібраційного збудження. Полістиролбетон є різновидом легкобетону, у якому як заповнювач використовується спінений полістирол сферичної форми з діаметром 3–6 мм. Завдяки низькій густині (15–25 кг/м³), кульки полістиролу значно змінюють механічну поведінку суміші під час вібраційного ущільнення. Густина полістиролбетону при розрахунках приймається $\rho_{\text{псб}} = 600 \text{ кг} / \text{м}^3$.

У математичній моделі ущільнення полістиролбетонної суміші основними допущеннями є такі положення. Об'ємна концентрація полістирольного заповнювача становить приблизно 60%, що суттєво впливає на механічні та динамічні характеристики матеріалу. Полістирольні кульки діаметром 3–6 мм вважаються рівномірно розподілені-

ми у квазіізотропному середовищі, при цьому між ними присутній розчинний прошарок, який забезпечує передачу напружень і формування структури суміші. Повітря в системі присутнє як у вигляді відкритих пор, що сполучаються з зовнішнім середовищем, так і у формі закритих мікропустот, розташованих між заповнювачем, що впливає на загальну пружність і здатність до ущільнення. Важливою складовою моделі є врахування взаємодії між платформою, формою та бетонною сумішшю, яка описується як масово-пружинна система з демпфуванням.

Динамічна модель системи «платформа – полістиролбетонна суміш» моделюється як одновимірний пружний осцилятор із масою, жорсткістю опор і силовим гармонічним збудженням. Рівняння руху платформи без суміші

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t),$$

де $m = 1000$ Н – маса рухомої рами,

$k = 120000$ Н/м – жорсткість вертикальних опор,

c – коефіцієнт демпфування (оцінюється експериментально),

F_0 – амплітуда збуджуючої сили,

ω – кутова частота.

Для кожного з трьох режимів (табл. 1) ми можемо знайти реакцію системи у вигляді амплітуди A , яка, згідно з класичним гармонічним збудженням, становить

$$A = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}}. \quad (9)$$

Амплітуди переміщення платформи без суміші визначені експериментально (таблиця 1). Але після завантаження сумішшю загальна маса системи зростає на

$$m_{\text{суміш}} = \rho_{\text{псб}} \cdot V_{\text{сум}} = \rho \cdot (L \cdot B \cdot H), \quad (10)$$

де L B H – внутрішні габарити форми.

Таблиця 1

Режими вібраційного збудження

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

Можна визначити зміну резонансних характеристик і амплітуди рухомої рами вібраційної установки:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m + m_{\text{суміш}}}}. \quad (11)$$

Ураховуючи наявність полістирольних кульок локальні градієнти тиску формуються у вузьких міжгранулярних проміжках, в'язкість розчинової частини і її динаміч-

на деформація визначає швидкість витіснення повітря. Через аморфну структуру заповнювача ефективно ущільнення залежить від частоти коливань платформи та тривалості впливу.

Швидкість підйому повітряних бульбашок у суміші можна оцінити за модифікованим законом Стокса:

$$v_{\text{підйом.пов}} = \frac{1}{9} \cdot \frac{(\rho_{\text{д}} - \rho_{\text{пов}}) \cdot g \cdot d^2}{\mu}. \quad (12)$$

Але для вібраційного режиму ми розглядаємо міграцію з урахуванням динамічного тиску

$$\frac{dt}{dz} = \alpha \cdot \nabla p(t). \quad (13)$$

Відповідно провівши розрахунки можна стверджувати, що для суміші висотою $H = 50$ мм вплив динамічного навантаження передається повністю, і повітряні вclusions мігрують до поверхні, а при $H \geq 150$ мм ефективність ущільнення залежить від комбінації: достатнього збудження (режим 1 або 2) та зменшення часу дії, щоб уникнути псевдопластичних потоків у суміші. Найкраща ефективність полістиролбетонних сумішей буде при режимі 1 (290 рад/с, 2100 Н), коли система наближається до умов резонансу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Назаренко І. І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем : навч. посіб. / І. І. Назаренко. – 2-ге вид. – Київ : Видавничий Дім «Слово», 2010. – 440 с.
2. 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>
3. Назаренко І., Дєдов О., Дьяченко О. Обґрунтування алгоритму розрахунку вібраційної установки для ущільнення бетонних сумішей зі змінним режимом роботи // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2019. – No 93. – С. 19–26.
4. Назаренко І. І., Дьяченко О. С. Експериментальні дослідження робочого процесу вібраційної установки для ущільнення бетонних сумішей зі змінним режимом роботи // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2018. – Вип. 92. – С. 24–31.
5. 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
6. Nesterenko M., Maslov A., Salenko J. Investigation of vibration machine interaction with compacted concrete mixture // International Journal of Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 7, No 3.2. – P. 260–264. – DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14416>

7. Черевко О. М., Давиденко Ю. О., Черевко П. О. Вплив параметрів вібрації на процес ущільнення бетонних сумішей // 3б. наук. пр. (Галузеве машинобудування, будівництво) / редкол.: О. Г. Онищенко (голов. ред.) [та ін.]. – Полтава : ПолтНТУ, 2010. – Вип. 26. – С. 138–146.

REFERENCES

1. Nazarenko, I. I. (2010). *Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system: Navchalnyi posibnyk* [Applied Problems of Vibration Systems Theory: Textbook] (2nd ed.). Kyiv: Vydavnychi Dim "Slovo".
2. 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>
3. Nazarenko, I., Dedov, O., & Diachenko, O. (2019). Obgruntuvannya alhorytmu rozrakhunku vibratsiinoi ustanovky dlia ushchilnennia betonnykh sumishei zi zminnym rezhymom roboty [Justification of the algorithm for calculating a vibration unit for compacting concrete mixtures with a variable operating mode]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Reclamation Machinery*, (93), 19–26.
4. Nazarenko, I. I., & Diachenko, O. S. (2018). Eksperymentalni doslidzhennia robochoho protsesu vibratsiinoi ustanovky dlia ushchilnennia betonnykh sumishei zi zminnym rezhymom roboty [Experimental research of the working process of a vibration unit for compacting concrete mixtures with a variable operating mode]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Reclamation Machinery*, (92), 24–31.
5. 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
6. Nesterenko, M., Maslov, A., & Salenko, J. (2018). Investigation of vibration machine interaction with compacted concrete mixture. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(3.2), 260–264. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14416>
7. 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]. In O. H. Onyshchenko (Ed.), *Zbirnyk naukovykh prats "Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo"* [Collected Scientific Works "Industry Mechanical Engineering, Construction"] (Issue 26, pp. 138–146). Poltava: Poltava National Technical University.

Received 25.04.2025.
Accepted 28.04.2025.

***Movement of air voids in lightweight concrete
mixtures during vibration compaction***

The article investigates the process of vibrational compaction of polystyrene concrete mixture under the influence of combined harmonic excitation. The relevance of the study is due to the need to improve the structural uniformity and reduce the porosity of lightweight concrete products by optimizing compaction regimes. The study addresses the specific problem of inefficient air inclusion removal in mixtures with a high content of deformable polystyrene aggregates. The aim is to develop a dynamic model of the "platform – concrete mixture – mold" system and to determine optimal vibration parameters that ensure effective expulsion of air bubbles. The research methodology includes analytical modeling of dynamic pressure fields, numerical estimation of air bubble drift velocity using modified Stokes law, and evaluation of pressure gradients during vertical, horizontal, and combined excitation modes. The results demonstrate that combined excitation significantly enhances the upward migration of air inclusions due to spiral drift and pressure wave interaction. The highest compaction efficiency is achieved near the resonance frequency of the system. The findings can be applied to improve the technological parameters of vibrational compaction in the production of polystyrene concrete elements.

Keywords: polystyrene concrete, vibrational compaction, combined oscillations, air inclusions, dynamic pressure, wave effects, setup model, amplitude, pressure gradient, bubble drift.

Нестеренко Микола Миколайович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID:0000-0002-4073-1233

Ведмідь Василь Васильович - аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID: 0000-0003-1514-1212

Nesterenko Mykola - PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ORCID: 0000-0002-4073-1233

Vedmid Vasyil - Postgraduate student of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». ID ORCID: 0000-0003-1514-1212