

УМОВИ ОПТИМАЛЬНОГО РЕЖИМУ ДОУЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ ТА КРИТЕРІЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІБРАЦІЇ

Анотація. У статті розглянуто умови оптимального режиму доущільнення бетонної суміші вібраційною машиною з просторовим збудженням, у якій поєднується дія горизонтальних коливань форми та вертикальних коливань привантажувача. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності вібраційного ущільнення бетонних виробів, забезпечення інтенсивної структурної перебудови суміші та зниження енерговитрат у процесі формування. Метою роботи є встановлення критеріїв ефективності вібраційного доущільнення та обґрунтування параметрів оптимального режиму роботи установки на основі енергетичного підходу. У дослідженні використано методи аналітичного моделювання, засновані на балансі енергії за цикл коливань, визначенні дисипованої енергії у вертикальному та горизонтальному каналах деформування, а також на формулюванні порогових умов активного ущільнення за динамічним тиском і зсувними напруженнями. Отримано співвідношення, що дають змогу оцінити енергетичну ефективність процесу, встановити умови узгодження частот збудження та визначити коефіцієнт синергії комбінованої дії зсувних і компресійних механізмів. Показано, що оптимальний режим доущільнення досягається за умови максимізації дисипованої в суміші енергії, виконання порогових умов структурної перебудови середовища та підтримання квазірезонансного режиму з урахуванням зміни динамічних властивостей суміші в процесі ущільнення. Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованих критеріїв для вибору параметрів привантажувача та режимів роботи віброзбуджувачів при проектуванні й удосконаленні вібраційних установок для формування бетонних виробів.

Ключові слова: бетонна суміш, вібраційне ущільнення, доущільнення, просторове збудження, привантажувач, дисипована енергія, динамічний тиск, зсувні напруження, квазірезонансний режим, критерій ефективності.

Постановка проблеми. Одним із визначальних чинників, що впливають на якість бетонних виробів під час формування, є забезпечення ефективного режиму вібраційного доущільнення суміші в умовах просторового збудження. Недостатня інтенсивність або неузгодженість вертикальних і горизонтальних коливань призводить до неповної структурної перебудови бетонного середовища, зниження щільності, погіршення однорідності виробу та зростання енерговитрат на ущільнення. Особливої складності ця проблема набуває в установках, де ущільнення реалізується завдяки сумісній дії циклічного стиску з боку привантажувача та зсувних деформацій, що створюються горизонтальними коливаннями форми. За таких умов виникає необхідність визначення критеріїв ефективності вібрації, встановлення порогових умов структурної перебудови суміші та обґрунтування таких параметрів режиму, за яких дисипована в середовищі енергія буде максимальною, а процес доущільнення — технологічно результативним і енергетично доцільним.

Аналіз останніх досліджень.

Упродовж останніх років значна увага дослідників приділяється підвищенню ефективності вібраційного ущільнення бетонних сумішей шляхом удосконалення конструкцій привантажувачів, робочих органів та режимів динамічного впливу [1, 6, 7]. У працях [2–5] показано, що адекватне моделювання системи «вібраційна машина – оброблюване середовище» повинно враховувати пружно-дисипативні властивості суміші, особливості передачі коливань у шарі матеріалу та умови взаємодії віброуючої поверхні з бетонним середовищем. Дослідження [3, 5] підтверджують, що характер контакту віброуючої плити з бетонною сумішшю, а також співвідношення між амплітудою, частотою та масою робочого органу істотно впливають на інтенсивність ущільнення і рівномірність розподілу енергії в об’ємі суміші. У роботах [1, 6, 7] особливу увагу приділено конструктивним схемам привантажувачів і комбінованих імпульсно-вібраційних установок, які забезпечують поєднання статичного навантаження з динамічним впливом та відкривають можливості керування параметрами доущільнення. Водночас недостатньо дослідженими залишаються умови узгодження вертикального і горизонтального каналів збудження, критерії максимізації дисипованої в

суміші енергії та обґрунтування оптимального режиму доущільнення бетонної суміші в установках із просторовим збудженням, що й зумовлює актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Мета досліджень. Метою досліджень є розроблення та обґрунтування аналітичного підходу до визначення оптимального режиму доущільнення бетонної суміші у вібраційній машині з просторовим збудженням, з урахуванням динамічної взаємодії системи «форма – бетонна суміш – привантажувач», а також встановлення умов, за яких забезпечується максимальна ефективність передачі енергії в оброблюване середовище. Додатковою метою є дослідження впливу параметрів вертикальних і горизонтальних коливань на інтенсивність структурної перебудови бетонної суміші, величину дисипованої енергії та досягнення технологічно доцільного режиму ущільнення.

Викладення основного матеріалу дослідження. У досліджуваній установці (рисунок 1) ущільнення реалізується завдяки сумісному прояву: зсувних деформацій (горизонтальний віброзбуджувач у формі), циклічного стискання (вертикальний віброзбуджувач у привантажувачі). Тому доцільно ввести узагальнений критерій ефективності як відношення середньої корисної потужності, що витрачається на перебудову структури суміші, до підведеної потужності віброзбуджувачів. У дисертаційній постановці це можна подати через баланс енергії за період коливань.

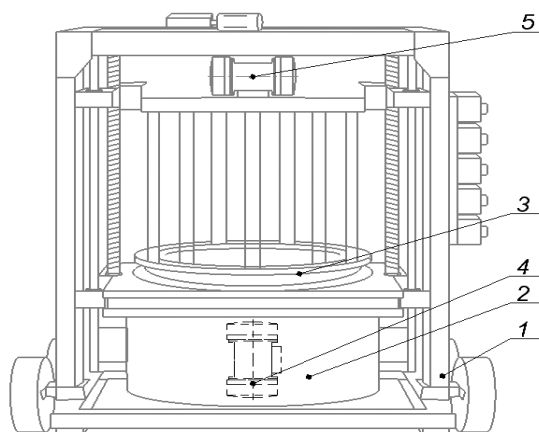


Рисунок 1 – Вібраційна машина для ущільнення залізобетонних елементів інженерних мереж

а) круглого та б) квадратного перерізу

1 – рама, 2 – вібраційна форма, 3 – привантажувач-пуансон,

4 – вібратор основний, 5 – вібратор привантажувача

Нехай W_{Σ} – підведена енергія за цикл, а ΔW_b – енергія, яка дисипується в бетонній суміші (саме вона пов’язана з руйнуванням структурних зв’язків та ущільненням).

Тоді коефіцієнт енергетичної ефективності:

$$\eta_b = \frac{\Delta W_b}{W_{\Sigma}}. \quad (1)$$

Дисипована енергія в суміші при комбінованій дії у загальному випадку складається з двох складових: вертикальної (стиск) і горизонтальної (зсув):

$$\Delta W_b = \Delta W_{b,v} + \Delta W_{b,h}. \quad (2)$$

Для гармонічних коливань із круговою частотою ω , коли відносні швидкості деформацій у середовищі описуються як $\dot{\varepsilon}(t)$, дисипація за цикл визначається інтегралом

$$\Delta W_b = \int_0^T \int_{V_b} \sigma_d(r,t) \dot{\varepsilon}(r,t) dV dt, \quad (3)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (4)$$

де σ_d – дисипативна складова напруження, V_b – об’єм бетонної суміші.

Оскільки в рамках прийнятої реологічної моделі дисипативні напруження пропорційні швидкості деформацій, то для двох домінуючих механізмів деформування (стискання по осі Z та зсув у площині $r - \theta$):

$$\sigma_{d,v} = K_v \dot{\varepsilon}_v, \quad (5)$$

$$\tau_{d,h} = K_h \dot{\gamma}_h \quad (6)$$

де K_v – в’язкий коефіцієнт при стиску, K_h – в’язкий коефіцієнт при зсуві, ε_v – відносна вертикальна деформація, γ_h – кутова деформація зсуву.

Тоді, виділяючи вертикальну та горизонтальну частини дисипації:

$$\Delta W_{b,v} = \int_0^T \int_{V_b} K_v \dot{\varepsilon}_v^2(r,t) dV dt. \quad (7)$$

$$\Delta W_{b,h} = \int_0^T \int_{V_b} K_h \dot{\gamma}_h^2(r,t) dV dt \quad (8)$$

Для інженерного переходу до приведених параметрів (модель зосереджених параметрів), вводимо еквівалентні коефіцієнти дисипації у вертикальному та горизонтальному каналах:

$$B_v = \frac{K_v S_\Sigma}{h_b}, \quad (9)$$

$$B_h = \frac{K_h S_h}{h_b}. \quad (10)$$

де S_Σ – площа контакту пуансона, S_h – ефективна площа зсувної взаємодії, h_b – поточна висота шару.

Тоді енергія дисипації за цикл для гармонічних переміщень:

$$x_2(t) = A_v \sin(\omega_2 t), \quad (11)$$

$$u_1(t) = A_h \sin(\omega_1 t) \quad (12)$$

становить:

$$\Delta W_{b,v} = \int_0^{T_2} B_v \dot{x}_2^2(t) dt = \int_0^{T_2} B_v (A_v \omega_2)^2 \cos^2(\omega_2 t) dt = \pi B_v A_v^2 \omega_2. \quad (13)$$

$$\Delta W_{b,h} = \int_0^{T_1} B_h \dot{u}_1^2(t) dt = \int_0^{T_1} B_h (A_h \omega_1)^2 \cos^2(\omega_1 t) dt = \pi B_h A_h^2 \omega_1 \quad (14)$$

Отже, узагальнена дисипація в суміші (за умови узгодження частот або усереднення за спільний інтервал) може бути оцінена як

$$\Delta W_b \approx \pi (B_v A_v^2 \omega_2 + B_h A_h^2 \omega_1). \quad (15)$$

Саме максимізація цієї величини при заданих обмеженнях є фізично обґрунтованою умовою оптимального режиму ущільнення.

Процес ущільнення починається інтенсивно лише тоді, коли динамічні напруження в суміші перевищують порогове значення, що відповідає руйнуванню первинних структурних зв'язків та подоланню внутрішнього тертя. Для вертикального каналу таку умову доцільно формулювати через динамічний тиск на суміш.

Нехай статичний тиск від привантажувача:

$$P_{st} = \frac{F_{st}}{S_{\Sigma}}, \quad (16)$$

а динамічна складова тиску, зумовлена вертикальними коливаннями привантажувача:

$$P_{dyn}(t) = \frac{F_{dyn}(t)}{S_{\Sigma}}. \quad (17)$$

У зосередженій моделі F_{dyn} визначається як інерційна сила маси привантажувача, в абсолютному русі:

$$F_{dyn}(t) = m_2 \ddot{x}_2(t). \quad (18)$$

Для гармонічних коливань $x_2(t) = A_v \sin(\omega_2 t)$:

$$\ddot{x}_2(t) = -A_v \omega_2^2 \sin(\omega_2 t). \quad (19)$$

$$P_{dyn}(t) = -\frac{m_2 A_v \omega_2^2}{S_{\Sigma}} \sin(\omega_2 t) \quad (20)$$

Максимальний за модулем динамічний тиск:

$$P_{dyn}^{\max} = \frac{m_2 A_v \omega_2^2}{S_{\Sigma}}. \quad (21)$$

Тоді повний тиск на суміш:

$$P_{\Sigma}(t) = P_{st} + P_{dyn}(t). \quad (22)$$

Порогова умова активного ущільнення у вертикальному каналі може бути записана як

$$P_{st} + P_{dyn}^{\max} \geq P_{cr}, \quad (23)$$

де P_{cr} – критичний тиск, при якому структура суміші переходить у стан інтенсивної перебудови.

Для горизонтального каналу аналогічну умову задаємо через зсувні напруження. Нехай середнє зсувне напруження у шарі суміші, викликане горизонтальними коливаннями форми, дорівнює:

$$\tau(t) = G_b \gamma(t) + K_h \dot{\gamma}(t), \quad (24)$$

де G_b – ефективний модуль зсуву суміші.

Тоді порогова умова:

$$\tau^{\max} \geq \tau_{cr}, \quad (25)$$

де τ_{cr} – критичне зсувне напруження, пов’язане з руйнуванням структурних зв’язків та початком «зсувної текучості».

Оскільки система має два незалежних джерела збудження, оптимізація режиму повинна враховувати узгодження частот горизонтального та вертикального каналів, яке забезпечує синергетичний ефект.

Для введення узгодження розглянемо спільну інтенсивність деформацій як функцію частот:

$$I(\omega_1, \omega_2) = \alpha_h B_h A_h^2 \omega_1 + \alpha_v B_v A_v^2 \omega_2, \quad (26)$$

де α_h, α_v – вагові коефіцієнти, що враховують чутливість ущільнення до зсувних та компресійних механізмів на відповідних стадіях.

Оптимальний режим визначається умовою максимуму:

$$\frac{\partial I}{\partial \omega_1} = 0 \quad (27)$$

$$\frac{\partial I}{\partial \omega_2} = 0 \quad (28)$$

з урахуванням обмежень на прискорення, амплітуду та недопущення розшарування:

$$a_h^{\max} = A_h \omega_1^2 \leq a_{h, \lim}, \quad (29)$$

$$a_v^{\max} = A_v \omega_2^2 \leq a_{v, \lim} \quad (30)$$

$P_{\Sigma}(t) \geq 0 \quad \forall t$ умова відсутності відриву пуансона від суміші,

$\Phi(\omega_1, \omega_2, A_h, A_v) \leq \Phi_{\lim}$ умова відсутності відриву пуансона від суміші,

У практичній постановці часто доцільно вводити коефіцієнт синергії просторового навантаження як відношення ефекту комбінованого режиму до суми ефектів окремих режимів:

$$K_{syn} = \frac{\Delta W_b^{(h+v)}}{\Delta W_b^{(h)} + \Delta W_b^{(v)}} \quad (31)$$

За наведеними виразами дисипації:

$$K_{syn} = \frac{\pi(B_v A_v^2 \omega_2 + B_h A_h^2 \omega_2)}{\pi(B_h A_h^2 \omega_1 + \pi B_v A_v^2 \omega_1)} = 1, \quad (32)$$

що для лінійної моделі відображає адитивність ефектів. Однак у реальних умовах B_v, B_h, C_b, G_b залежать від ступеня ущільнення та амплітуди, тобто $C_b = C_b(\rho, A_v, \omega_2, P_{st}), B_v = B_v(\rho, A_v, \omega_2, P_{st}), G_b = G_b(\rho, A_h, \omega_1), B_h = B_h(\rho, A_h, \omega_1)$ де ρ – поточна щільність суміші.

Тоді коефіцієнт синергії стає функцією режиму й може перевищувати одиницю:

$$K_{syn} = K_{syn}(\omega_1, \omega_2, A_h, A_v, P_{st}, \rho) > 1, \quad (33)$$

що означає, що комбінована дія прискорює перебудову структури середовища за рахунок взаємного впливу зсувних і компресійних механізмів.

З урахуванням росту жорсткості суміші в процесі ущільнення, власні частоти системи з часом зміщуються. Тому раціональним є не точний резонанс, а квазірезонанс, коли збудження підтримується в області максимуму при допустимому рівні динамічних навантажень. У дисертаційному вигляді це формулюється через мінімізацію відхилення між частотою збудження та поточною власною частотою:

$$(\omega_2) = |\omega_2 - \omega_2^*(\rho)| \rightarrow \min, \quad (34)$$

де $\omega_2^*(\rho)$ – власна частота вертикальної підсистеми, що залежить від поточної щільності (а отже – від $C_b(\rho)$).

Умову квазірезонансного режиму можна подати як інтервал

$$\omega_2^*(\rho)(1 - \delta) \leq \omega_2 \leq \omega_2^*(\rho)(1 + \delta), \quad (35)$$

де δ – допустиме відносне відхилення з урахуванням демпфування та конструктивних обмежень.

Висновки: Отримані співвідношення показують, що оптимальний режим доущільнення у системі з просторовим збудженням визначається: максимізацією дисипованої у суміші енергії за цикл за рахунок вертикального стиску та горизонтального зсуву; виконанням порогових умов, що гарантують проходження процесу структурної перебудови середовища; узгодженням частот і амплітуд збудження з поточними динамічними властивостями суміші при забезпеченні обмежень на прискорення, тиск та недопущення розшарування. Подальший розвиток моделі полягає у формуванні алгоритму вибору параметрів привантажувача та режимів роботи віброзбуджувачів на основі визначених критеріїв.

ЛІТЕРАТУРА

1. Nesterenko M. Loaders for Concrete Compaction / M. Nesterenko, O. Panfilov, M. Pырlyk // Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering. – 2023. – Vol. 2, Iss. 61. – P. 80-85. – DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3874>
2. Сердюк Л.І., Давиденко Ю.О., Костенко П.М. Деякі підходи до моделювання середовища, що обробляється вібраційним пристроєм // Ресурсоекономні матер., констр., будівлі та споруди. – Рівне : НУВГП, 2005. – Вип. 12. – С. 69–72.
3. Маслов, О., Саленко, Ю., & Маслова, Н. (2011). Дослідження взаємодії віброуючої плити з цементобетонною сумішшю. Вісник КНУ імені Михайла Остроградського, (2/201 (67), ч. 1), 93–98.
4. Назаренко, І. І. (2010). Прикладні задачі теорії вібраційних систем (2-е вид.). Київ. 440 с.
5. Maslov A.G., Salenko J.S., Maslova N.A. Study of interaction of vibrating plate with concrete mixture // Вісник КНУ імені Михайла Остроградського. – 2011. – Вип. 2 (67). – С. 93–98.
6. Ведмідь В.В. Експериментальні дослідження комбінованої імпульсно-вібраційної установки / В.В. Ведмідь, Т.М. Нестеренко, М.М. Нестеренко, М.О. Пирлик // Системні технології. – 2025. – Т. 5, № 160. – С. 178–188. – URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-19> . <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/2237>
7. Дьяченко О., Пригоцький В., Маліцький І. Огляд схем вібромайданчиків з вертикальними коливаннями та аналіз можливостей керування параметрами ущільнення // Енергоощадні машини і технології : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 17–19 трав. 2022 р.). – Київ : КНУБА, 2022. – С. 28–31.

Received 10.03.2026.

Accepted 16.04.2026.

Published 30.04.2026

CONDITIONS FOR THE OPTIMAL RE-COMPACTION MODE OF A CONCRETE MIXTURE AND CRITERIA FOR VIBRATION EFFICIENCY

Abstract. *The article considers the conditions for the optimal re-compaction mode of a concrete mixture in a vibration machine with spatial excitation, in which the action of horizontal oscillations of the mould is combined with vertical oscillations of the surcharge device. The relevance of the study is обусловлена by the need to improve the efficiency of vibration compaction of concrete products, ensure intensive structural rearrangement of the mixture, and reduce energy consumption during the forming process. The aim of the study is to establish criteria for the efficiency of vibration re-compaction and to substantiate the parameters of the optimal operating mode of the installation based on an energy approach. The study uses methods of analytical modeling based on the energy balance over one oscillation cycle, determination of dissipated energy in the vertical and horizontal deformation channels, as well as formulation of threshold conditions for active compaction according to dynamic pressure and shear stresses. Relations were obtained that make it possible to assess the energy efficiency of the process, establish the conditions for coordinating excitation frequencies, and determine the synergy coefficient of the combined action of shear and compression mechanisms. It is shown that the optimal re-compaction mode is achieved under the condition of maximizing the energy dissipated in the mixture, fulfilling the threshold conditions for structural rearrangement of the medium, and maintaining a quasi-resonant mode while taking into account changes in the dynamic properties of the mixture during compaction. The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the proposed criteria to select the parameters of the surcharge device and the operating modes of vibration exciters in the design and improvement of vibration installations for forming concrete products.*

Keywords: *concrete mixture, vibration compaction, re-compaction, spatial excitation, surcharge device, dissipated energy, dynamic pressure, shear stresses, quasi-resonant mode, efficiency criterion.*

REFERENCES

1. Nesterenko, M., Panfilov, O., & Pyrlyk, M. (2023). Loaders for concrete compaction. Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering, 2(61), 80–85. <https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3874>
2. Serdiuk, L. I., Davydenko, Yu. O., & Kostenko, P. M. (2005). Some approaches to modeling a medium processed by a vibration device [Deiaki pidkhody do modeliuvannia seredovyshcha,

- shcho obrobliatsia vibratsiinym prystroiem]. Resource-Efficient Materials, Structures, Buildings and Constructions – Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy, 12, 69–72. Rivne: NUWM.
3. Maslov, O., Salenko, Yu., & Maslova, N. (2011). Investigation of interaction between a vibrating plate and cement concrete mixture [Doslidzhennia vzaiemodii vibruiuchoi plyty z tsementobetonnoi sumishshiu]. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University – Visnyk KNU imeni Mykhaila Ostrohradskoho, 2(67), Pt. 1, 93–98.
 4. Nazarenko, I. I. (2010). Applied problems of vibration systems theory [Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system] (2nd ed.). Kyiv, Ukraine.
 5. Maslov, A. G., Salenko, J. S., & Maslova, N. A. (2011). Study of interaction of vibrating plate with concrete mixture. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, 2(67), 93–98.
 6. Vedmid, V. V., Nesterenko, T. M., Nesterenko, M. M., & Pyrlyk, M. O. (2025). Experimental studies of a combined impulse–vibration installation [Eksperymentalni doslidzhennia kombinovanoi impulsno-vibratsiinoi ustanovky]. System Technologies, 5(160), 178–188. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-19>
 7. Diachenko, O., Pryhotskyi, V., & Malitskyi, I. (2022). Review of vibration platform schemes with vertical oscillations and analysis of compaction control possibilities [Ohliad skhem vibromaidanchyviv z vertykalnymy kolyvanniamy ta analiz mozhlyvostei keruvannia parametramy ushchilnennia]. In Energy-Saving Machines and Technologies: Proceedings of the 3rd International Scientific and Practical Conference (pp. 28–31). Kyiv: KNUCA.

Пирлик Маклим Олександрович - аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», проспект Віталія Грицаєнка, 24, Полтава, Україна, 36011, maxpirlik@gmail.com ORCID:0009-0006-1343-9516

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

Maklym Pyrlyk– Postgraduate student of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Vitaliya Hrytsayenka, 24, Poltava, Ukraine, 36011, E-mail: maxpirlik@gmail.com ORCID: 0009-0006-1343-9516

Mykola Nesterenko - PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Vitaliya Hrytsayenka, 24, Poltava, Ukraine, 36011, E-mail – nesterenkonikola@gmail.com, ID ORCID: 0000-0002-4073-1233