

І.І. Назаренко¹, М.М. Нестеренко²¹ Київський Національний Університет Будівництва і Архітектури, Україна² Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Україна

ВЗАЄМОДІЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ З ВЕРТИКАЛЬНИМИ СТІНКАМИ ФОРМИ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ КОЛИВАННЯХ

Процес вібраційного ущільнення бетонної суміші є ключовим фактором у формуванні якісних бетонних виробів. Одним із перспективних підходів до підвищення ефективності ущільнення є використання горизонтальних коливань віброплощадки, які впливають на взаємодію бетонної суміші з вертикальними стінками форми. У даній роботі досліджено динамічну систему «віброплощадка – бетонне середовище», розглянуто механізми передачі коливань та їх вплив на рівномірність ущільнення. Отримані результати дозволяють визначити оптимальні параметри вібраційного впливу, що сприятиме покращенню фізико-механічних характеристик бетонних виробів та підвищенню енергоефективності технологічного процесу.

Ключові слова: бетонна суміш, вібраційне ущільнення, горизонтальні коливання, віброплощадка, будівельні технології

Постановка проблеми

Однією з актуальних задач у сучасному бетонному виробництві є забезпечення ефективного ущільнення бетонної суміші при використанні вібротехнологій. Якість ущільнення безпосередньо впливає на міцність, довговічність і експлуатаційні характеристики будівельних конструкцій. Одним із перспективних методів є застосування горизонтальних коливань віброплощадки, що дозволяє покращити однорідність структури бетонної суміші та зменшити кількість дефектів у готових виробках.

Проте механіка взаємодії бетонної суміші з вертикальними стінками форми під час таких коливань залишається недостатньо дослідженою. Зокрема, не до кінця вивчено розподіл напружень і деформацій у бетонному середовищі, а також вплив різних режимів вібрації на процес ущільнення. Важливим аспектом є також урахування пружно-в'язкопластичних властивостей бетонної суміші, що визначають її поведінку при вібраційному впливі.

Недостатня вивченість цих факторів може призводити до нерівномірного ущільнення, утворення повітряних включень та зниження експлуатаційних характеристик готових виробів. Тому необхідно провести детальний аналіз динамічної системи «віброплощадка – бетонне середовище», враховуючи особливості взаємодії бетонної суміші з вертикальними стінками форми під дією горизонтальних коливань. Це дозволить оптимізувати параметри вібропроцесів та підвищити якість бетонних виробів, що є важливим для сучасного будівельного виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Вивчення процесу вібраційного ущільнення бетонних сумішей є важливим напрямом досліджень у галузі будівництва, оскільки правильне застосування вібраційного впливу значно покращує механічні та фізичні властивості бетону. З моменту впровадження вібрацій у технологію ущільнення бетонних сумішей наприкінці XIX століття з'явилася велика кількість публікацій, які досліджують різноманітні аспекти цього процесу та його впливу на матеріали.

Одним із ключових напрямків досліджень є аналіз впливу амплітуди та частоти вібрацій на ефективність ущільнення бетонних сумішей. Дослідження Фрейсіна (1899 р.) започаткували науковий підхід до визначення оптимальних параметрів вібрації, що забезпечують найкращі характеристики бетону. Зокрема, в роботах [1-3] підкреслюється, що для ефективного ущільнення амплітуда коливань має бути не меншою за 0,2 мм при частоті 314 с⁻¹. Водночас інші дослідження [2] розглядають ширший діапазон значень амплітуд (0,35–0,5 мм), що свідчить про необхідність точного налаштування параметрів залежно від умов виробництва.

Дослідження [3] вказують на те, що амплітуда та частота вібрацій не можуть розглядатися як незалежні параметри. Оптимізація ущільнення потребує комплексного підходу, оскільки матеріал демонструє нелінійну реакцію на зовнішній вплив. Так, у дослідженнях [4, 5] аналізуються віброударні режими ущільнення, де частота коливань може бути знижена до 5–10 Гц, але з одночасним збільшенням

амплітуди до 10 мм. Це дозволяє зменшити час ущільнення без втрати якості.

Особливу увагу привертають роботи, що аналізують вплив горизонтальних вібрацій та їх поєднання з вертикальними коливаннями. Дослідження [4-6] демонструють, що горизонтальні коливання сприяють виникненню зсувних напружень у бетонній суміші, що покращує її ущільнення. Додаткове застосування вертикальних вібрацій підвищує ефективність процесу за рахунок домінування вертикальної складової силових впливів.

Останні дослідження [5-7] підтверджують, що комбіноване застосування горизонтальних і вертикальних вібрацій дозволяє значно підвищити енергоефективність ущільнення бетонних сумішей, зменшуючи витрати енергії при досягненні необхідних характеристик матеріалу. Однак залишається відкритим питання точного визначення методик оцінки енергетичних характеристик процесу, таких як питома енергія ущільнення та коефіцієнт енергетичної ефективності, що потребує подальших досліджень.

В роботі [8] аналізується реологічна поведінка бетону під впливом вібрації, розглядається модель, яка враховує зміну властивостей суміші залежно від часу вібрації та відстані до джерела коливань.

Авторами роботи [9-10] розглядається вплив консистенції бетону, швидкості укладання та режиму вібрації на бічний тиск бетону на вертикальні стінки опалубки. Вивченню зміни реології бетону під дією вібрації присвячена робота [11] де описано перехід від бінгемівської моделі до псевдопластичної поведінки.

Дослідження [7] підтверджують енергоефективність та технологічну доцільність застосування горизонтальних вібрацій у процесі ущільнення бетонних сумішей. Вони підкреслюють важливість подальшого вивчення цього напрямку, зокрема впливу параметрів коливань на механіку взаємодії бетонної суміші зі стінками форми, а також удосконалення технологій вібраційного ущільнення для підвищення якості та економічної ефективності будівельних процесів.

Мета статті

Дослідити механіку взаємодії бетонної суміші з вертикальними стінками форми під впливом горизонтальних коливань віброплощадки.

Проаналізувати вплив параметрів коливань (амплітуди, частоти) на ефективність ущільнення бетонної суміші, враховуючи її пружно-в'язкопластичні властивості.

На основі отриманих результатів розробити рекомендації щодо оптимізації режимів вібраційного ущільнення для покращення якості бетонних виробів

і підвищення енергоефективності технологічного процесу.

Виклад основного матеріалу

Для аналізу взаємодії вертикальних стінок форми з ущільнюваною бетонною сумішшю під впливом нормальних горизонтально спрямованих коливань розглядається динамічна система «віброплощадка – бетонне середовище» (рис. 1). У цій системі бетонна суміш моделюється як середовище з розподіленими параметрами, що дозволяє врахувати її пружно-в'язкопластичні властивості та особливості поведінки під час вібраційного впливу.

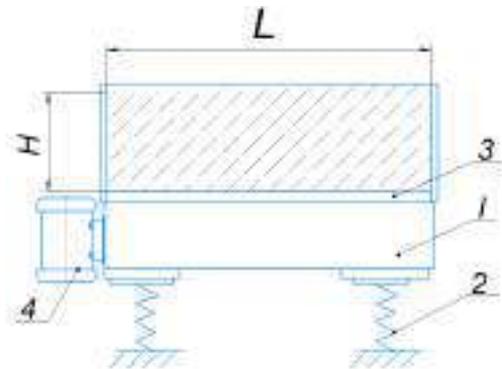


Рис. 1. Розрахункова схема динамічної системи «віброплощадка - бетонне середовище» при горизонтальному направленні коливань: 1 – рухома рама; 2 – пружні опори; 3 – форма з бетонною сумішшю; 4 – вібробуджувач

Віброплощадка закріплена на основі за допомогою пружних опор, що забезпечує її коливальний рух. На рухома раму віброплощадки діє збуджувальна сила у вигляді горизонтально спрямованої гармонічної дії, яка передається через вертикальні стінки форми на бетонну суміш. Це зумовлює виникнення у бетонній масі як нормальних, так і дотичних напружень, що сприяє її ущільненню та рівномірному розподілу частинок.

Горизонтальні коливання мають значний вплив на процес формування виробів, особливо складної геометрії. Вони сприяють ефективнішому усуненню порожнеч, підвищенню щільності суміші та покращенню зчеплення частинок. Оптимальний підбір параметрів коливального режиму – частоти, амплітуди та фазового співвідношення руху віброплощадки і бетонної суміші – є критично важливим для досягнення якісного ущільнення.

Отримані теоретичні залежності дозволяють визначити динамічні характеристики взаємодії бетонної суміші зі стінками форми, що необхідно для підвищення ефективності процесу ущільнення. Аналіз результатів дозволяє сформулювати рекомендації щодо оптимальних режимів роботи

віброплощадки, що сприятиме покращенню якості готових бетонних виробів та підвищенню енергоефективності технологічного процесу.

Під час аналізу взаємодії бетонної суміші з вертикальними стінками форми приймається припущення, що сили тертя між бетонною сумішшю та днищем форми не враховуються. Це дозволяє спростити математичний опис процесу та зосередитися на впливі горизонтальних коливань віброплощадки на ущільнюване середовище.

За таких умов динамічна поведінка бетонної суміші визначається її пружно-в'язкопластичними властивостями, а диференціальне рівняння руху ущільнюваної суміші у напрямку відповідної координати за певний проміжок часу набуває наступного вигляду [158]:

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

де u і y – Ейлерова й Лагранжева координати;

E – динамічний модуль пружної деформації цементно-бетонної суміші є одним з ключових параметрів, що характеризує її поведінку під дією вібраційного навантаження. Він визначає здатність суміші протидіяти деформаціям під впливом динамічних сил та залежить від ряду факторів, зокрема від складу суміші, її щільності, вмісту води, консистенції, швидкості навантаження та рівня ущільнення.;

ξ – коефіцієнт опору бетонної суміші є комплексним параметром, який враховує зчеплення та внутрішнє тертя між частинками, а також енергетичні витрати на їхню переорієнтацію та супутні фізико-механічні явища в процесі вібраційного ущільнення.

Розв'язок хвильового рівняння коливань (3.31) визначається із застосуванням відповідних граничних умов, які враховують особливості взаємодії ущільнюваної бетонної суміші з робочими органами віброплощадки та форми.

$$-m \frac{\partial^2 u(0,t)}{\partial t^2} - c_2 u(0,t) + EF_1 \frac{\partial u(0,t)}{\partial y} + \quad (2)$$

$$+ \xi F_1 u(0,t) = -Q \sin(\omega t);$$

$$u(0,t) = u(L,t). \quad (3)$$

де F_1 – площа поверхні однієї вертикальної стінки, що контактує із бетонною сумішшю;

L – відстань між вертикальними стінками (ширина оброблюваного шару);

c_2 – жорсткість пружних опор у горизонтальному напрямку.

Визначення аналітичного виразу розв'язку здійснюється на основі врахування впливу динамічного модуля пружної деформації,

коефіцієнта опору суміші, а також характеристик вібраційного навантаження, таких як частота, амплітуда та напрямок коливань.

Граничні умови враховують особливості поведінки бетонної суміші в межах контакту з поверхнею віброплощадки, зокрема величину переданого напруження та кінематичні параметри зміщення. При цьому особливе значення має правильний вибір моделі взаємодії, що дозволяє найбільш точно описати поведінку ущільнюваного середовища в процесі вібраційного ущільнення.

Для визначення розв'язку необхідно також враховувати, що бетонна суміш, як система з розподіленими параметрами, може демонструвати як пружно-в'язкі, так і пластичні властивості залежно від режиму вібрації та початкових характеристик матеріалу. Це накладає додаткові обмеження на форму розв'язку та вимагає застосування відповідних математичних методів, таких як методи інтегрування хвильових рівнянь або чисельне моделювання.

Отриманий розв'язок дозволяє визначити закономірності розподілу напружень і деформацій у бетонному середовищі під дією вібраційного впливу, що є ключовим для оптимізації режимів ущільнення та підвищення ефективності роботи віброплощадки. Це, в свою чергу, сприяє покращенню якості формованих бетонних виробів, зменшенню витрат енергії та матеріалів, а також забезпеченню їхньої довговічності.

Для розв'язання рівняння (1) представимо функцію у вигляді суперпозиції гармонічних складових, що дозволяє врахувати особливості хвильового процесу в ущільнюваній бетонній суміші. Такий підхід дає змогу відобразити взаємодію вібраційного впливу з різними зонами матеріалу та описати поширення напружень і деформацій у бетонному середовищі.

$$u(y,t) = U(y) \sin \omega t, \quad (4)$$

де $U(y)$ – комплексна амплітуда коливань, яка визначається з граничних умов (2) і (3).

Підставляючи вираз (4) у рівняння (1), отримаємо

$$\frac{\partial^2 U(y)}{\partial y^2} + 2\delta_1 \frac{\partial U(y)}{\partial y} + k^2 U(y) = 0. \quad (5)$$

Функція, що описує процес коливань, може бути представлена у вигляді добутку окремих функцій, кожна з яких відповідає певному фізичному аспекту руху, наприклад, часової та просторової залежності. Це дозволяє розділити хвильове рівняння на частини, що описують зміну параметрів коливань у часі та просторі. Вибір функціональної форми визначається граничними умовами, які враховують геометричні та фізико-механічні характеристики

ущільнюваного середовища, а також особливості вібраційної дії.

Такий метод представлення розв'язку дозволяє отримати рівняння, що характеризують кінетичну та потенціальну енергію системи, її інерційні та демпфуючі властивості, а також визначити основні параметри процесу ущільнення. Це, своєю чергою, сприяє встановленню ефективних режимів роботи віброплощадки, що забезпечують високу якість ущільнення бетонної суміші та мінімізацію енергетичних витрат.

Підставляючи розв'язок рівняння (5) у вираз (4), отримуємо узагальнену залежність для визначення функції, яка описує хвильовий процес у ущільнюваній бетонній суміші. Ця залежність враховує як гармонійну складову коливального руху, так і фізико-механічні характеристики бетонного середовища, включаючи його динамічний модуль пружності, коефіцієнт опору та фазову швидкість поширення збурень.

Отримане рівняння дозволяє простежити закономірності зміни напружень і деформацій у бетонній суміші під дією вібраційного впливу, визначити оптимальні режими ущільнення та оцінити енергетичні втрати, що виникають під час процесу. Використання цієї залежності дає можливість провести аналіз ефективності різних режимів роботи віброплощадки та розробити рекомендації щодо вдосконалення технологічного процесу ущільнення бетонних сумішей.

$$u(y,t) = e^{-\delta_1 y} (M \sin k_1 y + N \cos k_1 y) \sin \omega t \quad (6)$$

Підставляючи отриманий вираз (6) у граничну умову (3), отримаємо співвідношення між постійними інтегрування M і N, що дозволяє визначити їхні значення через параметри хвильового процесу та характеристики бетонної суміші. Це співвідношення враховує граничні умови взаємодії вібраційного впливу з ущільнюваним середовищем і забезпечує коректний математичний опис динамічного процесу.

З отриманого рівняння випливає, що значення M і N залежать від фізико-механічних властивостей бетонної суміші, таких як її густина, модуль пружності та коефіцієнт внутрішнього опору, а також від параметрів вібраційного впливу, включаючи частоту й амплітуду коливань. Встановлене співвідношення дозволяє сформулювати повний математичний опис хвильового процесу в ущільнюваному середовищі та є основою для подальших аналітичних розрахунків напружено-деформованого стану бетонної суміші.

$$M = N \frac{e^{\delta_1 L} - \cos k_1 L}{\sin k_1 L} \quad (7)$$

Підставляючи залежність (7) у вираз (6), отримаємо розв'язок рівняння (1) у такому вигляді, який описує розподіл хвильового процесу в

ущільнюваному бетонному середовищі під впливом вібраційної дії. Отриманий розв'язок враховує взаємозв'язок між параметрами хвилі, що поширюється, фізико-механічними характеристиками бетонної суміші та умовами зовнішнього впливу.

Цей розв'язок дозволяє визначити основні динамічні характеристики процесу ущільнення, зокрема амплітуду та фазу коливань частинок середовища, зміну напружено-деформованого стану бетонної суміші та вплив параметрів вібраційного навантаження на ефективність ущільнення.

$$u(y,t) = N e^{-\delta_1 y} \frac{e^{\delta_1 y} \sin k_1 y + \sin[k_1(L-y)]}{\sin k_1 L} \sin \omega t \quad (8)$$

Підставляючи вираз (8) у граничну умову (3), отримаємо рівняння, яке дозволяє визначити постійну інтегрування N.

$$N = \frac{Q \sin k_1 L}{(c_2 - m\omega^2 - 0,5\xi F_1) \sin k_1 L - E F_1 k_1 (e^{\delta_1 L} - \cos k_1 L)} \quad (9)$$

Рівняння (9) враховує взаємозв'язок між фізико-механічними параметрами бетонної суміші, граничними умовами взаємодії з віброплощадкою та хвильовими характеристиками процесу ущільнення.

Підставляючи одержане значення постійної інтегрування N у вираз (8), отримаємо шуканий розв'язок рівняння (1), що задовольняє граничні умови (2) і (3),

$$u(y,t) = \frac{Q e^{-\delta_1 y} \{e^{\delta_1 L} \sin k_1 y + \sin[k_1(L-y)]\}}{(c_2 - m\omega^2 - 0,5\xi F_1) \sin k_1 L - E F_1 k_1 (e^{\delta_1 L} - \cos k_1 L)} \sin \omega t \quad (10)$$

Розв'язавши отримане рівняння відносно N, можемо визначити його значення через параметри вібраційного навантаження, жорсткісні та інерційні характеристики бетонного середовища. Визначене значення N підставляється у загальний розв'язок хвильового рівняння, що дозволяє повністю описати динаміку процесу вібраційного ущільнення та сформулювати відповідні залежності для подальших розрахунків.

Знайдений розв'язок (10) рівняння (11) описує динаміку взаємодії віброплощадки з ущільнюваним бетонним середовищем, що дозволяє визначити закон руху цієї системи. В межах певного діапазону координат $0 \leq y \leq L$, вираз (10) характеризує поведінку ущільнюваного середовища, описуючи його коливальний рух та взаємодію між окремими частинками бетонної суміші під впливом вібраційної дії.

При граничних значеннях координати, коли вона наближається до країв розглянутої області, розв'язок рівняння переходить у залежності, що

описують рух рухомої рами віброплощини. Це свідчить про безперервність процесу передачі енергії від вібраційного робочого органу до ущільнюваної бетонної суміші та дозволяє оцінити ефективність перетворення механічних коливань у процес ущільнення.

$$u(0,t) = u(L,t) = \frac{Q}{(c_2 - m\omega^2) - F_1 \left(0,5\xi + Ek_1 \frac{e^{\delta_1 L} - \cos k_1 L}{\sin k_1 L} \right)} \sin \omega t \quad (11)$$

Аналіз частинного розв'язку (11) рівняння (1) дозволяє трактувати отриманий вираз $F_1 \left(0,5\xi + Ek_1 \frac{e^{\delta_1 L} - \cos k_1 L}{\sin k_1 L} \right)$ як силу інерції бетонної

суміші, що взаємодіє з вертикальними стінками форми під впливом горизонтально спрямованих коливань. Це означає, що динамічні ефекти, які виникають у бетонному середовищі, можуть бути описані через відповідні інерційні характеристики, що суттєво впливає на ефективність ущільнення.

З цього випливає, що бетонну суміш, яка взаємодіє з вертикальними стінками форми при горизонтальних коливаннях, можна представити у вигляді приведеної маси m_{np2} . Це спрощує аналіз динамічної взаємодії та дозволяє використовувати класичні методи розрахунку коливальних систем для визначення оптимальних параметрів віброплощини.

$$m_{np2} = F_1 \left(0,5\xi + Ek_1 \frac{e^{\delta_1 L} - \cos k_1 L}{\sin k_1 L} \right) \frac{1}{\omega^2} \quad (12)$$

Величина питомої приведеної маси бетонної суміші, що взаємодіє з вертикальними стінками форми під впливом горизонтально спрямованих коливань, визначається згідно з виразом (12). Це співвідношення відображає залежність приведеної маси від параметрів бетонної суміші та характеристик динамічного впливу, що дозволяє точніше моделювати процес вібраційного ущільнення.

$$m_{y2} = m_{np2} / F_1 = \left(0,5\xi + Ek_1 \frac{e^{\delta_1 L} - \cos k_1 L}{\sin k_1 L} \right) \frac{1}{\omega^2} \quad (13)$$

З урахуванням виразу (12), отриманий розв'язок (11) можна подати в узагальненому вигляді, що дозволяє описати динаміку взаємодії бетонної суміші з формою у вигляді рівнянь руху приведеної маси. Це спрощує аналіз коливального процесу та сприяє встановленню оптимальних режимів вібрації, що забезпечують рівномірне ущільнення бетонної суміші та покращують якість готового виробу.

$$u(0,t) = u(L,t) = \frac{Q}{c_2 - (m + m_{2np})\omega^2} \sin \omega t \quad (14)$$

Значення приведеної маси ущільнюваного середовища, що взаємодіє з горизонтальними стінками форми під впливом горизонтально

спрямованих коливань m_{np2} , значною мірою визначається рядом фізико-механічних параметрів. До основних з них належать динамічний модуль пружної деформації E та коефіцієнт опору бетонної суміші ξ , які характеризують її здатність чинити опір коливальним навантаженням.

Крім того, важливу роль відіграють густина бетонної суміші ρ та фазова швидкість розповсюдження вимушуючої сили в ущільнюваному шарі a , які впливають на процес передачі енергії та формування хвильових процесів у середовищі. Кутова частота коливань ω визначає інтенсивність механічного впливу на бетонну суміш, а відстань між стінками форми L та площа поверхні вертикальної стінки F_1 впливають на розподіл напружень і ефективність ущільнення.

Підставляючи отриману залежність (10) у рівняння (1), визначаємо величину напружень, що виникають у шарі ущільнюваної бетонної суміші під час її взаємодії з вертикальними стінками форми при горизонтально спрямованих коливаннях.

Значення приведеної маси ущільнюваного середовища, яке бере участь у процесі взаємодії з вертикальними стінками, значною мірою залежить від ряду фізико-механічних параметрів. До них належать динамічний модуль пружної деформації, який визначає пружні властивості суміші, та коефіцієнт опору, що враховує внутрішнє тертя й енергетичні витрати на переорієнтацію частинок під час вібраційного ущільнення.

Додатково впливають такі параметри, як густина бетонної суміші, фазова швидкість розповсюдження вимушуючої сили, кутова частота коливань, а також геометричні характеристики форми – відстань між її стінками та площа поверхні однієї з вертикальних стінок. Усі ці фактори визначають закономірності розподілу напружень та ефективність ущільнення бетонної суміші.

Підставляючи отриману залежність (10) у рівняння (1), визначаємо величину напружень, що виникають в ущільнюваному шарі бетонної суміші при його взаємодії з вертикальними стінками форми під впливом горизонтально спрямованих коливань. Отримані результати дозволяють встановити оптимальні режими вібраційного ущільнення, що сприяє покращенню якості бетонних виробів, зменшенню витрат цементу та підвищенню ефективності виробничого процесу.

$$\sigma_2(y,t) = \frac{Q}{(c_2 - m\omega^2 - 0,5\xi F_1) \sin k_1 L - EF_1 k_1 (e^{\delta_1 L} - \cos k_1 L)} \times \left\{ k_1 E \left[e^{\delta_1(L-y)} \cos k_1 y - e^{-\delta_1 y} \cos[k_1(L-y)] \right] + 0,5\xi \left[e^{\delta_1(L-y)} \sin k_1 y - \sin[k_1(L-y)] \right] \right\} \sin \omega t \quad (15)$$

Отримана залежність (15) дає змогу визначити розподіл напружень у бетонній суміші залежно від координати x по всій довжині ущільнюваного шару. Це дозволяє оцінити зміну напружень у різних зонах суміші та визначити критичні ділянки, де можливе зниження ефективності ущільнення або виникнення дефектів у готовому виробі.

Зокрема, напруження σ , що виникають у бетонній суміші поблизу вертикальних стінок форми, визначаються безпосередньо з виразу (15). Ці значення є ключовими для встановлення оптимальних параметрів вібраційного впливу, які забезпечують рівномірне ущільнення бетонної суміші, мінімізуючи ризики розшарування або утворення пустот.

Таким чином, отримані залежності дозволяють не лише кількісно оцінити напружено-деформаційний стан ущільнюваного середовища, а й сформувані науково обґрунтовані рекомендації щодо раціонального вибору режимів вібраційного ущільнення, що сприяє підвищенню міцності та довговічності бетонних виробів.

$$\sigma_2(0,t) = Q \frac{0,5\xi + Ek_1 \frac{e^{\delta_1 L} - \cos k_1 L}{\sin k_1 L}}{c_2 - (m + m_{2np})\omega^2} \sin \omega t. \quad (16)$$

Коефіцієнт опору, що використовується у рівнянні (1) та подальших розрахунках, для випадку взаємодії бетонної суміші з протилежними вертикальними стінками визначається за формулою (3) з урахуванням поправкового коефіцієнта $K_p = 0,5$.

$$\xi = K_p a r \omega. \quad (17)$$

Це коригування враховує особливості розподілу напружень у середовищі та вплив протилежних стінок форми на динамічні процеси ущільнення.

З урахуванням цього поправкового коефіцієнта значення коефіцієнта опору приймає уточнений вигляд, що дозволяє більш точно враховувати ефекти зчеплення та внутрішнього тертя бетонної суміші, а також витрати енергії на переорієнтацію частинок під час вібраційного ущільнення.

Виведена залежність (10) описує закон руху динамічної системи, що охоплює всі основні складові процесу вібраційного ущільнення. Вона враховує рух як рухомої рами віброплощадки, днища форми та її торців, так і поведінку ущільнюваного середовища в горизонтальному напрямку. При конкретних значеннях параметрів, зокрема при $y = 0$ і $y = L$, ця залежність трансформується у вираз (14), який описує кінематичні характеристики форми та її торців, беручи до уваги параметри віброплощадки, фізико-механічні властивості ущільнюваного шару бетонної суміші та відстань між торцевими стінками форми.

Отримані теоретичні залежності дозволяють з високою точністю врахувати фізико-механічні характеристики ущільнюваного середовища, що дає можливість визначити оптимальні параметри віброплощадки та режими вібраційного впливу. Це, своєю чергою, забезпечує ефективне ущільнення бетонних сумішей, сприяє зниженню енерговитрат, мінімізації використання цементу та покращенню якості готових бетонних виробів.

Отримані вирази (10–16) дозволяють визначити закон руху динамічної системи та фізико-механічні характеристики бетонної суміші, що є важливими для аналізу складних динамічних систем із просторовими коливаннями. Ці залежності можуть бути використані при дослідженні процесів ущільнення бетонних сумішей у конструкціях складної форми, зокрема коробчастих залізобетонних виробів, де взаємодія матеріалу з опалубкою відіграє ключову роль у забезпеченні рівномірності ущільнення та підвищенні міцності кінцевого виробу.

Для підтвердження теоретичних висновків проводиться функціональний аналіз отриманих аналітичних залежностей шляхом експериментального дослідження процесу взаємодії ущільнюваної бетонної суміші з вертикальними стінками форми при горизонтально спрямованих коливаннях [7]. Дослідження виконуються на лабораторній віброплощадці (зображено на рис.2) [12], яка забезпечує можливість регулювання параметрів вібрації та має такі технічні характеристики: маса рухомої рами разом із формою (без бетонної суміші) становить 2000 Н, жорсткість пружних опор у горизонтальному напрямку – 120 кН/м, а внутрішній розмір форми відповідає встановленим нормативним параметрам.

Отримані експериментальні дані дозволяють оцінити вплив параметрів вібраційного навантаження на процес ущільнення та уточнити математичну модель взаємодії бетонної суміші з вертикальними поверхнями форми.

Дослідження проводилися на двох режимах роботи віброплощадки. У першому режимі встановлювалася кутова частота вимушених коливань $\omega = 292$ рад/с, амплітуда вимушуючої сили $F = 2200$ Н, амплітуда коливань рухомої рами на холостому ходу (без бетонної суміші) становила $A = 0,05$ см. У другому режимі параметри змінювалися: кутова частота коливань $\omega = 256$ рад/с, амплітуда сили $F = 1900$ Н, амплітуда коливань рами $A = 0,06$ см.

Товщина ущільнюваного шару бетонної суміші у горизонтальному напрямку змінювалася в діапазоні від 200 мм до 600 мм шляхом коригування положення рухомого торця форми, що дозволяло дослідити вплив геометричних параметрів форми на

ефективність ущільнення. Товщина ущільнюваного шару бетонної суміші приймалася сталою і відповідала нормативним значенням.



Рис. 2. Лабораторна віброплощадка

На рисунках 3-5 наведено графічні залежності зміни коефіцієнта приєднаної маси бетонної суміші $k_{np} = m_{np1} / m_0$ функції відносної пластичної деформації, консистенції бетонної суміші, товщини ущільнюваного шару H та частоти вимушених коливань ω . Коефіцієнт приєднаної маси визначався відношенням маси фізичного об'єму ущільнюваної бетонної суміші m до її щільності ρ у різних станах: початковому (неущільненому), поточному та кінцевому (ущільненому).

Отримані результати дозволяють оцінити динамічну взаємодію бетонної суміші з вертикальними стінками форми та визначити оптимальні режими вібраційного ущільнення для забезпечення рівномірної структури бетону.

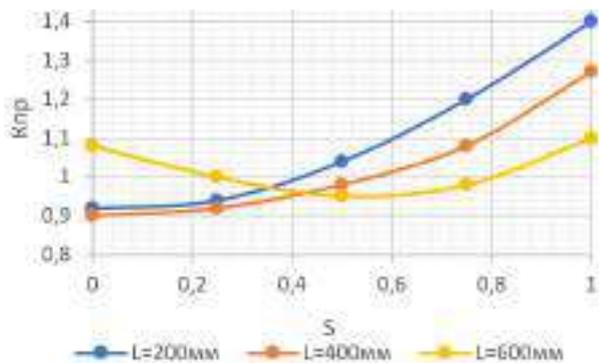


Рис. 3. Зміна коефіцієнта приєднаної маси бетонної суміші k_{np} залежно від коефіцієнта відносної пластичної деформації S при кутовій частоті вимушених коливань $\omega = 292$ с-1 при осіданні конуса суміші $O_k=3,5 - 4$ см при ширині ущільнюваного шару L

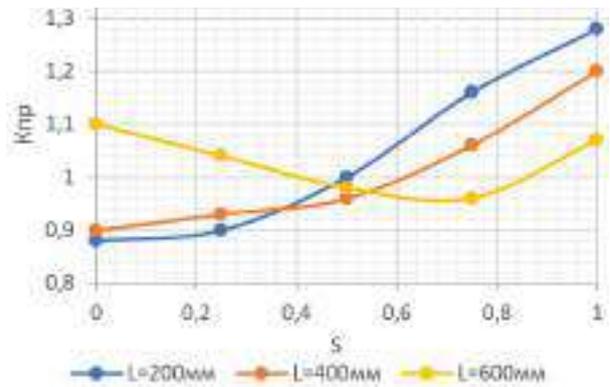


Рис. 4. Зміна коефіцієнта приєднаної маси бетонної суміші k_{np} залежно від коефіцієнта відносної пластичної деформації S при кутовій частоті вимушених коливань $\omega = 292$ с-1 при осіданні конуса суміші $Ж=30$ с при ширині ущільнюваного шару L

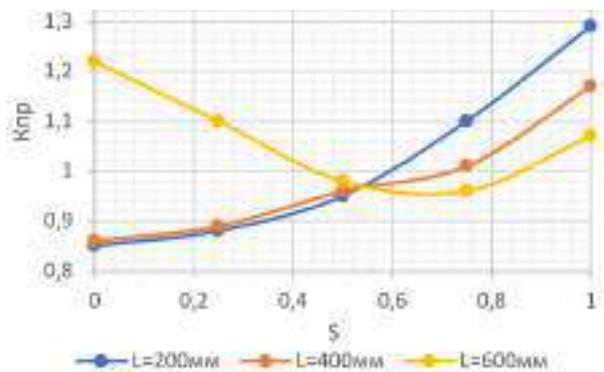


Рис. 5. Зміна коефіцієнта приєднаної маси бетонної суміші k_{np} залежно від коефіцієнта відносної пластичної деформації S при кутовій частоті вимушених коливань $\omega = 292$ с-1 при осіданні конуса суміші $Ж=60$ с при ширині ущільнюваного шару L

Аналіз отриманих даних свідчить, що протягом усього процесу ущільнення різних типів бетонних сумішей амплітуда коливань рухомої рами змінюється в незначних межах. Основним фактором, що впливає на цей показник, є довжина ущільнюваного шару, яка визначається відстанню між торцями форми.

Графічні залежності, наведені на рисунках 3-5, демонструють, що коефіцієнт приведеної маси бетонної суміші суттєво залежить від коефіцієнта відносної пластичної деформації S , консистенції бетонної суміші, довжини ущільнюваного шару L та кутової частоти вимушених коливань.

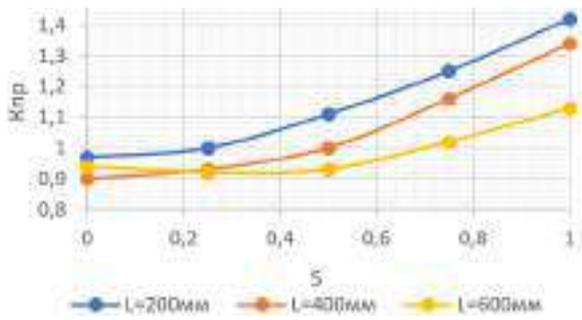


Рис. 6. Зміна коефіцієнта приєднаної маси бетонної суміші $K_{пр}$ залежно від коефіцієнта відносної пластичної деформації S при кутовій частоті вимушених коливань $\omega = 256 \text{ c}^{-1}$ при осіданні конуса суміші $O_k=3,5 - 4 \text{ см}$ при ширині ущільнюваного шару L

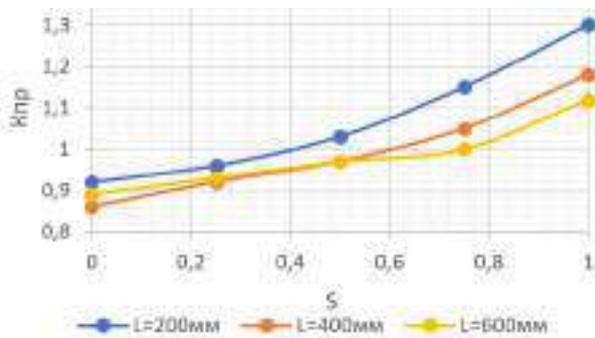


Рис. 7. Зміна коефіцієнта приєднаної маси бетонної суміші $K_{пр}$ залежно від коефіцієнта відносної пластичної деформації S при кутовій частоті вимушених коливань $\omega = 256 \text{ c}^{-1}$ при осіданні конуса суміші $Ж=30\text{с}$ при ширині ущільнюваного шару L

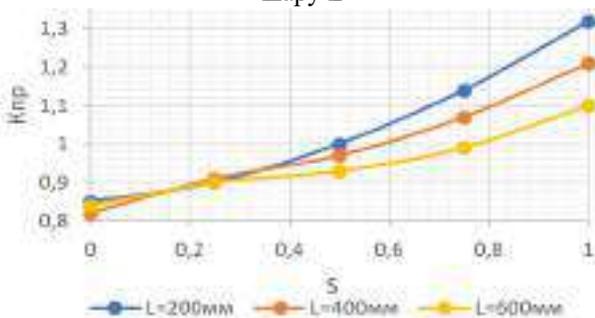


Рис. 8. Зміна коефіцієнта приєднаної маси бетонної суміші $K_{пр}$ залежно від коефіцієнта відносної пластичної деформації S при кутовій частоті вимушених коливань $\omega = 256 \text{ c}^{-1}$: при осіданні конуса суміші $Ж=60\text{с}$ при ширині ущільнюваного шару L

Для всіх розглянутих консистенцій бетонної суміші значення коефіцієнта приведеної маси $K_{пр}$ зростає зі збільшенням густини бетонної суміші та зменшується зі збільшенням довжини ущільнюваного шару.

На завершальній стадії ущільнення, коли довжина ущільнюваного шару становить $L=200\text{мм}$, а кутова частота вимушених коливань $\omega=292 \text{ рад/с}$, значення коефіцієнта приведеної маси змінюється в межах $K_{пр} = 1,2 - 1,4$ при цьому вищі значення відповідають більш рухомим бетонним сумішам.

Зі збільшенням довжини ущільнюваного шару значення коефіцієнта приведеної маси поступово зменшуються. Так, при $L=350$ коефіцієнт приведеної маси бетонної суміші на фінальній стадії ущільнення знаходиться в діапазоні $K_{пр} = 1,01 - 1,10$, що підтверджує вплив геометричних параметрів форми та динамічних характеристик процесу на ефективність ущільнення бетонної суміші.

Висновки

У результаті дослідження механіки взаємодії бетонної суміші з вертикальними стінками форми під впливом горизонтальних коливань віброплощадки встановлено, що цей процес суттєво впливає на якість ущільнення бетонної суміші.

Аналіз динамічної системи «віброплощадка – бетонне середовище» показав, що горизонтальні коливання сприяють рівномірному розподілу частинок суміші та ефективному усуненню порожнеч, що підвищує щільність та міцність матеріалу.

Оптимізація параметрів коливального режиму (амплітуди, частоти та фазового співвідношення) є ключовим фактором у забезпеченні якісного ущільнення, що дозволяє покращити характеристики готових виробів та підвищити енергоефективність технологічного процесу.

Результати дослідження можуть бути використані для розробки нових підходів до вібраційного ущільнення бетонних сумішей, що сприятиме вдосконаленню технологій формування бетонних виробів та зменшенню витрат на їх виробництво.

Проведене дослідження підтверджує доцільність застосування горизонтальних коливань віброплощадки для підвищення ефективності ущільнення бетонної суміші. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розширення експериментальної бази та вдосконалення математичних моделей для точнішого прогнозування поведінки бетонної суміші під дією вібраційних впливів.

Література

1. 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.
2. 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.
3. 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 (галузево машинобудування, будівництво)*. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – Вип. 4 (34). – С. 249–254.
4. 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, науковців, аспірантів і студентів (17.04 – 11.05.2012)*. – Полтава: ПолтНТУ, 2012. – Т. 3. – С. 56–57.
5. 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.
6. 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. (Вінниця, 15 трав. 2021 р.)*. – Вінниця: ВНТУ, 2021. – С. 377–378.
7. 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/gbmm1892.0301>
8. Assaad J., Khayat K. H. Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state // *Cement and Concrete Research*. – 2004. – Vol. 34, No. 3. – P. 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.019>
9. Nguyen H., Kim D. J. An experimental study on the lateral pressure of fresh concrete in vertical formwork // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 113. – P. 1035–1043. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.145>
10. Wyrzykowski M., Lura P., Bentz D. P. Formwork pressure of highly workable concrete – Experiments focused on setting, vibration and design approach // *Proceedings of International RILEM Conference on Rheology and Processing of Construction Materials*. – 2010. – P. 195–204. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-90-481-9664-7_22
11. Tattersall G. H. The effect of vibration on the rheological properties of fresh concrete // *Magazine of Concrete Research*. – 1988. – Vol. 40, No. 143. – P. 79–89. <https://doi.org/10.1680/mac.1988.40.143.79>
12. Назаренко І. І., Нестеренко М. М., Нестеренко Т. М., Анищенко 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>
1. 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 – Vibrations in Engineering and Technology*, (2)(40), 1–6. [in Ukrainian].
2. Yemelyanova, I. A., Hordiienko, A. T., & Anishchenko, A. I. (2010). *Vyznachennia traiektorii rukhu betonnoi sumishi z urakhuvanniam syl oporu* [Determining the trajectory of concrete mix movement considering resistance forces]. *Naukovyi visnyk budivnytstva – Scientific Bulletin of Construction*, (52), 444–447. [in Ukrainian].
3. Maslov, O. H., Nesterenko, M. P., & Skliarenko, T. O. (2012). *Analitychni doslidzhennia kolyvan vibromashyny dlia dorozhnogo budivnytstva* [Analytical study of vibrations in a vibration installation for forming concrete products for road construction in idle mode]. *Zbirnyk naukovykh prats (Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo) – Collection of Scientific Papers (Mechanical Engineering, Construction)*, 4(34), 249–254. [in Ukrainian].
4. Nesterenko, M. P., Skliarenko, T. O., Ped, D. S., & Molchanov, P. O. (2012). *Matematychnie modelivannia kolyvan rukhomoj ramy vibroustanovky* [Mathematical modeling of vibrations of a moving frame in a vibration installation]. *Tezy naukovoi konferentsii – Abstracts of the Scientific Conference*, Vol. 3, 56–57. [in Ukrainian].
5. Nazarenko, I. I., Nesterenko, M. M., Nesterenko, T. M., & Vedmid, V. V. (2022). *Vibratsiine obladnannia dlia formuvannia stynovykh panelei* [Vibration equipment for forming wall panels]. *Enerhooshchadni mashyny i tekhnolohii – Energy-Efficient Machines and Technologies*, 12–14. [in Ukrainian].
6. Nazarenko, I. I., & Nesterenko, M. M. (2021). *Doslidzhennia konstruktivnykh ta tekhnolohichnykh parametriv vibromashyn* [Study of structural and technological parameters of vibration machines for small concrete products]. *Perspektyvy rozvytku mashynobuduvannia ta transportu – Prospects of Mechanical Engineering and Transport*, 377–378. [in Ukrainian].
7. Nazarenko, I. I., & Dyachenko, O. S. (2019). *Eksperymentalni doslidzhennia protsesu ushchilnennia betonnoi sumishi* [Experimental study of the compaction process of concrete mixtures]. *Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Reclamation Machines*, (92), 24–31. <https://doi.org/10.31493/gbmm1892.0301>
8. Assaad, J., & Khayat, K. H. (2004). *Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state* [Reolohichni vlastyvoli ta model svizhoho betonu u stan vibratsii]. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.019>
9. Nguyen, H., & Kim, D. J. (2016). *An experimental study on the lateral pressure of fresh concrete in vertical formwork* [Eksperymentalne doslidzhennia bokovoho tysku svizhoho betonu na opalubku]. *Construction and Building Materials*, 113, 1035–1043. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.145>
10. Wyrzykowski, M., Lura, P., & Bentz, D. P. (2010). *Formwork pressure of highly workable concrete – Experiments focused on setting, vibration and design approach* [Tysk opalubky pratsiuozdatnogo betonu – eksperymenty, zoseredzheni na tverdenni, vibratsii ta proektuvanni]. In *Proceedings of the International RILEM Conference on Rheology and Processing of Construction Materials* (pp. 195–204). Springer. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-90-481-9664-7_22
11. Tattersall, G. H. (1988). *The effect of vibration on the rheological properties of fresh concrete* [Vplyv vibratsii na reolohichni vlastyvoli svizhoho betonu]. *Magazine of Concrete Research*, 40(143), 79–89. <https://doi.org/10.1680/mac.1988.40.143.79>
12. Nazarenko, I. I., Nesterenko, M. M., Nesterenko, T. M., & Anishchenko, A. I. (2020). *Laboratoryni vibromaidanchyk zi zminno napriamlenymy kolyvanniamy dlia ushchilnennia betonnykh sumishei* [Laboratory vibration platform with variably directed oscillations for compacting concrete mixtures].

References

1. Bernyk, P. S., Chubyk, R. V., & Tayanov, R. V. (2005). *Alhorytm dlia vyznachennia chastyoty ta amplitudy kolyvan vibromashyn* [Algorithm for determining the frequency and

Naukovi visnyk budivnytstva – Scientific Bulletin of Construction, 101(3), 177–181. <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2018-101-3-177-181>

Автор: НАЗАРЕНКО Іван Іванович,
доктор технічних наук, кафедри Машин і
Обладнання Технологічних Процесів,
Київський Національний Університет Будівництва і
Архітектури,
Ivan NAZARENKO,
Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the
Department of Machines and Equipment of
Technological Processes,
Kyiv National University of Construction and
Architecture, Kyiv,
E-mail – ii_nazar@ukr.net.
ID ORCID: 0000-0002-1888-3687

Автор: НЕСТЕРЕНКО Микола Миколайович,
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри
галузевого машинобудування та мехатроніки,
Національний університет «Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка»
Mykola NESTERENKO,
PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of
the Department of industrial mechanical engineering
and mechatronics
National University «Yuri Kondratyuk Poltava
Polytechnic»
E-mail – nesterenkonikola@gmail.com,
ID ORCID: 0000-0002-4073-1233

INTERACTION OF CONCRETE MIXTURE WITH VERTICAL MOLD WALLS UNDER HORIZONTAL VIBRATIONS

I. Nazarenko¹, M. Nesterenko²

¹ Kyiv National University of Construction and Architecture

² National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

Vibration compaction of concrete mixtures is one of the most effective methods for improving concrete quality, enabling high mechanical properties and ensuring the even distribution of the mixture particles. However, traditional compaction methods that use only vertical vibrations have certain limitations. These can lead to inefficient compaction of the concrete mixture, the formation of voids, and defects in the finished products, which reduce their strength and durability. This is why the study of the mechanics of interaction between the concrete mixture and vertical mold walls under the influence of horizontal vibrations becomes crucial for improving concrete production technologies.

This paper considers the dynamic system “vibration platform – concrete medium,” where the concrete mixture is modeled as a medium with distributed parameters, allowing for the inclusion of its elastic-viscoplastic properties. The interaction between horizontal vibrations of the vibration platform and the concrete mixture is studied, resulting in normal and tangential stresses that significantly improve the compaction process and ensure the even distribution of mixture particles. It is established that the optimal vibration parameters, including frequency, amplitude, and phase relationship between the vibration platform movement and the concrete mixture, determine the effectiveness of compaction and improve the physico-mechanical properties of the concrete.

The study also expands the potential use of horizontal vibrations for compaction of concrete mixtures in the production of complex-shaped products, such as tiles, blocks, and structural elements. The proposed theoretical dependencies can be used to develop new technologies and improve existing compaction methods, enhancing energy efficiency and reducing costs in the manufacturing of concrete products.

The results of the work are practically significant for optimizing technological processes in the construction industry, particularly for improving vibration equipment, increasing the quality of finished products, and reducing energy consumption. The suggested approaches can be applied to improve concrete mixture compaction techniques in various construction areas, including the construction of complex structures and enhancing energy efficiency in building processes.

Keywords: concrete mixture, vibration compaction, horizontal vibrations, vibration platform, construction technologies