

УДК 621.867.52

DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2026-44.0711>¹Максим Пирлик,

аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

<https://orcid.org/0009-0006-1343-9516>, e-mail: maxpirlik@gmail.com¹Микола Нестеренко

кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки,

<https://orcid.org/0000-0002-4073-1233>, e-mail : nesterenkonikola@gmail.com²Анна Аніщенко,кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, <https://orcid.org/0000-0002-3411-0385>, e-mail : aanishchenko@ukr.net,³Василь Ведмідь

директор

вул. Героїв Пожежників, 1, Полтава, Україна, 36000, <https://orcid.org/0000-0003-1514-1212>,e-mail : vvedmyd@gmail.com¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», просп. Першотравневий 24, м. Полтава, 36011, Україна²Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова,³ТОВ «МАКОТЕЧ ЧПК», вул. Героїв Пожежників, 1, Полтава, Україна, 36000

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВІБРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ З БЕЗІНЕРЦІЙНИМ ПРИВАНТАЖУВАЧЕМ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖ

АНОТАЦІЯ. У статті наведено результати експериментальних досліджень вібраційної установки для формування залізобетонних елементів інженерних мереж із використанням безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем. Дослідження спрямовані на встановлення впливу маси привантажувача та режимів роботи віброзбуджувача на амплітудні характеристики коливального процесу під час ущільнення бетонної суміші у формі виробу типу КС 7-9. Експериментально визначено зміну горизонтальних амплітуд коливальних по висоті форми, а також вертикальні амплітуди привантажувача за різних режимів роботи. Показано, що застосування привантажувача з автономним віброзбуджувачем забезпечує додатковий вертикальний вібраційний вплив на бетонну суміш, що сприяє підвищенню інтенсивності ущільнення та поліпшенню умов формування виробу. Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування раціональних конструктивних і технологічних параметрів вібраційного обладнання для виробництва залізобетонних кілець.

Ключові слова: вібраційна установка, бетонна суміш, залізобетонне кільце, привантажувач, віброзбуджувач, амплітуда коливальних, ущільнення, експериментальні дослідження.

EXPERIMENTAL STUDIES OF A VIBRATORY INSTALLATION WITH AN INERTIALESS SURCHARGE DEVICE FOR FORMING REINFORCED CONCRETE ELEMENTS OF ENGINEERING NETWORKS

ABSTRACT. The article presents the results of experimental studies of a vibratory installation for forming reinforced concrete elements of engineering networks using an inertialess surcharge device with an autonomous vibration exciter. The research is aimed at determining the influence of the surcharge mass and the operating modes of the vibration exciter on the amplitude characteristics of the oscillatory process during the compaction of a concrete mixture in a KS 7-9 product mould. The variation of horizontal vibration amplitudes along the height of the mould, as well as the vertical amplitudes of the surcharge device under different operating modes, was experimentally determined. It is shown that the use of a surcharge device with an autonomous vibration exciter provides an additional vertical vibratory effect on the concrete mixture, which contributes to increasing the intensity of compaction and improving the conditions for product

formation. The obtained results can be used to substantiate rational design and technological parameters of vibratory equipment for the production of reinforced concrete rings.

Keywords: *vibratory installation, concrete mixture, reinforced concrete ring, surcharge device, vibration exciter, vibration amplitude, compaction, experimental studies.*

1. Постановка проблеми. Підвищення ефективності формування залізобетонних елементів інженерних мереж є важливою науково-практичною задачею для підприємств будівельної індустрії. До таких виробів належать залізобетонні кільця, які широко застосовуються під час будівництва оглядових, каналізаційних, водопровідних та інших інженерних колодязів. Їх якість значною мірою визначається рівномірністю ущільнення бетонної суміші, відсутністю порожнин, раковин, розшарування, а також стабільністю геометричних параметрів після розпалублення.

Одним із найбільш поширених способів ущільнення бетонних сумішей під час формування таких виробів є вібраційний вплив. У процесі вібрування зменшується внутрішнє тертя між частинками суміші, покращується її рухливість, відбувається витіснення повітряних включень і формується більш щільна структура бетону. Водночас ефективність цього процесу залежить не лише від наявності вібрації, а й від правильного вибору її параметрів: частоти, амплітуди, напрямку дії збурювальної сили, тривалості ущільнення, маси робочих органів і характеру взаємодії вібраційної системи з бетонною сумішшю.

Під час формування залізобетонних кілець особливу складність становить забезпечення рівномірного ущільнення суміші по всій висоті виробу. У традиційних вібраційних установках основний вплив часто створюється за рахунок коливань форми або вібраційного осердя. Такий вплив забезпечує ущільнення суміші, однак у верхній зоні виробу його інтенсивність може бути недостатньою, особливо за наявності жорсткіших бетонних сумішей або нерівномірного розподілу матеріалу у формі. У результаті можливе утворення дефектів поверхні, зниження щільності бетону у верхніх шарах, погіршення зовнішнього вигляду виробу та необхідність додаткового фінішного доведення після розпалублення.

Одним із перспективних напрямів удосконалення процесу формування є застосування безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем. Такий привантажувач створює додатковий вертикальний вібраційний вплив на бетонну суміш і забезпечує її доущільнення у верхній частині форми. У поєднанні з горизонтальними коливаннями основної вібраційної форми це дає змогу реалізувати комбінований просторовий вібраційний вплив на суміш, що є більш наближеним до реальних умов ефективного ущільнення об'ємного середовища.

Разом із тим застосування такого конструктивного рішення потребує експериментального обґрунтування. Недостатньо лише встановити додатковий віброзбуджувач на привантажувач, оскільки його маса, частота коливань і режим роботи можуть по-різному впливати на динаміку всієї системи. Надмірна маса привантажувача може зменшувати вертикальну амплітуду його коливань, а нераціонально вибраний режим роботи віброзбуджувача може не забезпечити необхідного технологічного ефекту. Водночас недостатня маса або занадто малі параметри збурення можуть не створити потрібного тиску та вібраційного впливу на бетонну суміш.

Окремої уваги потребує дослідження зміни амплітуди горизонтальних коливань по висоті форми. Для кільцевих залізобетонних виробів ця характеристика є важливою, оскільки вона дозволяє оцінити рівномірність передавання коливань від вібраційної установки до бетонної суміші в різних зонах виробу. Зміна амплітуди по висоті форми може свідчити про особливості роботи системи «віброформа – бетонна суміш – привантажувач» та про вплив додаткового вертикального збурення на загальний характер коливального процесу.

У сучасних дослідженнях значна увага приділяється питанням взаємодії вібруючих робочих органів із бетонною сумішшю, моделюванню оброблюваного середовища, аналізу

вібраційних систем і розробленню обладнання з керованими параметрами ущільнення. Проте питання експериментального визначення амплітудних характеристик вібраційної установки з безінерційним привантажувачем під час формування залізобетонних кілець залишається недостатньо розкритим. Особливо це стосується оцінювання впливу маси привантажувача та частоти роботи його автономного віброзбуджувача на горизонтальні й вертикальні амплітуди коливань.

2. Аналіз публікацій по темі дослідження. Питання підвищення ефективності ущільнення бетонних і залізобетонних виробів за допомогою вібраційного впливу тривалий час залишаються предметом уваги науковців і фахівців у галузі будівельного машинобудування. Це пояснюється тим, що процес ущільнення бетонної суміші є складним динамічним процесом, у якому одночасно відбуваються переміщення частинок заповнювача, витіснення повітря, зменшення внутрішнього тертя, перерозподіл цементного тіста та формування щільної структури майбутнього виробу.

У роботі [1] розглянуто особливості взаємодії віброуючої плити з цементобетонною сумішшю. Авторами показано, що ефективність передавання вібраційного впливу до бетонної суміші залежить не лише від параметрів коливань робочого органа, а й від фізико-механічних властивостей самої суміші. Важливим є врахування того, що бетонна суміш під час ущільнення не може розглядатися як абсолютно тверде або однорідне середовище. Її властивості змінюються в процесі вібраційної дії, що суттєво впливає на характер взаємодії з робочим органом машини.

Подібні положення розвинено у праці [2], де увагу приділено вивченню контакту віброуючого робочого органа з бетонною сумішшю. У таких дослідженнях важливе значення має визначення умов, за яких забезпечується ефективне ущільнення без надмірного динамічного впливу на конструкцію машини. Це є особливо актуальним для обладнання, яке працює з формами складної геометрії або з виробами значної висоти, де інтенсивність коливань може змінюватися в різних зонах формування.

У роботі [3] розглянуто застосування привантажувачів для ущільнення бетонних сумішей. Авторами обґрунтовано доцільність використання додаткового робочого органа, який діє на суміш зверху та сприяє її доущільненню. Такий підхід є важливим для формування виробів, у яких верхня частина бетонної суміші може ущільнюватися менш інтенсивно порівняно з нижніми шарами. Використання привантажувача дозволяє підвищити рівномірність ущільнення, зменшити кількість поверхневих дефектів і покращити якість сформованого виробу.

У праці О. Дьяченка, В. Пригоцького та І. Маліцького [4] виконано огляд схем вібромайданчиків з вертикальними коливаннями та проаналізовано можливості керування параметрами ущільнення. Автори звертають увагу на те, що ефективність вібраційного обладнання значною мірою залежить від можливості регулювання параметрів коливального процесу відповідно до властивостей бетонної суміші та особливостей виробу. Це положення є важливим для сучасних машин, у яких доцільно передбачати зміну частоти, амплітуди або режиму дії віброзбуджувачів.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із моделюванням середовища, що піддається вібраційному впливу. У роботі Л. Сердюка, Ю. Давиденка та П. Костенка [5] розглянуто підходи до моделювання оброблюваного середовища у вібраційних пристроях. Автори підкреслюють, що під час побудови розрахункових моделей необхідно враховувати не тільки параметри машини, а й властивості матеріалу, який ущільнюється. Для бетонних сумішей це має принципове значення, оскільки їх поведінка під час вібрування залежить від складу, вологості, рухливості, розміру заповнювачів і тривалості дії коливань.

Теоретичну основу для аналізу роботи вібраційних машин становлять положення, викладені у праці І. І. Назаренка [6]. У ній розглянуто прикладні задачі теорії вібраційних систем, методи опису коливального руху, особливості взаємодії робочих органів із технологічним середовищем, а також підходи до визначення параметрів вібраційних машин. Ці положення є важливими для обґрунтування конструктивних рішень, пов'язаних із

використанням декількох джерел збурення, зокрема у випадку поєднання горизонтальних коливань форми та вертикальних коливань привантажувача.

У роботі В. Ведмеда, Т. Нестеренко, М. Нестеренка та М. Пирлика [7] наведено результати експериментальних досліджень комбінованої імпульсно-вібраційної установки. У цій праці показано доцільність застосування комбінованого вібраційного впливу, який дозволяє підвищити інтенсивність технологічного процесу та забезпечити більш ефективне передавання енергії до оброблюваного середовища. Отримані авторами результати підтверджують перспективність використання складних режимів збурення для машин, призначених для ущільнення бетонних сумішей.

Аналіз наукових публікацій свідчить, що значна увага приділяється питанням взаємодії віброуючих робочих органів із бетонною сумішшю, моделюванню оброблюваного середовища, керуванню параметрами вібраційного впливу та підвищенню ефективності роботи вібраційного обладнання. Разом із тим недостатньо дослідженим залишається питання експериментального визначення амплітудних характеристик вібраційної установки для формування залізобетонних кілець за умови одночасного використання горизонтальних коливань форми та вертикальних коливань безінерційного привантажувача.

3. Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є експериментальне визначення динамічних параметрів вібраційної установки з безінерційним привантажувачем та автономним віброзбуджувачем для обґрунтування раціональних режимів ущільнення бетонної суміші під час формування залізобетонних елементів інженерних мереж.

Для досягнення поставленої мети передбачається визначити вплив маси привантажувача та частоти роботи віброзбуджувача на зміну горизонтальних амплітуд коливань по висоті форми, а також оцінити вертикальні амплітуди привантажувача і характер їх узгодження з теоретичними розрахунками.

4. Обговорення результатів досліджень. Для проведення експериментальних досліджень відповідно до розробленої конструкторської документації на підприємстві КП «Підприємство «Теплотехбуд» було виготовлено дослідний зразок вібраційної установки. Її конструкцію розроблено з урахуванням технологічних вимог до формування залізобетонних кілець стінового типу КС 7-9, які застосовуються як елементи інженерних мереж.

Дослідний зразок установки відтворює основні конструктивні та функціональні вузли промислового обладнання для формування залізобетонних виробів. До його складу входять просторово-жорстка металева рама, циліндрична вібраційна форма, основний віброзбуджувач горизонтальних коливань, а також безінерційний привантажувач із пуансоном та автономним віброзбуджувачем. Основний віброзбуджувач забезпечує горизонтальні коливання форми, тоді як віброзбуджувач, установлений на привантажувачі, створює вертикальні коливання, спрямовані на додаткове доущільнення бетонної суміші у верхній частині виробу.

Для планування експериментальних досліджень було прийнято повний двофакторний трирівневий план 3^2 . Його вибір зумовлений тим, що в роботі досліджувалися два основні керовані фактори: маса привантажувача та кутова частота обертання дебалансів, кожен із яких варіювався на трьох рівнях. Такий підхід дав можливість оцінити не лише лінійний вплив факторів, а й можливу нелінійність процесу, що є характерним для вібраційних механічних систем.

Маса привантажувача приймалася на рівнях 20, 30 і 50 кг, а кутова частота обертання дебалансів – 180, 250 і 290 рад/с. У результаті було сформовано 9 дослідних точок, які охоплювали весь прийнятий факторний простір. Як вихідний параметр було прийнято вертикальну амплітуду коливань. Застосування трирівневого плану дозволило побудувати регресійну модель другого порядку, у якій враховано лінійні складові, квадратичні члени та взаємодію факторів. Це дало можливість не тільки кількісно оцінити вплив маси привантажувача і частоти збудження, а й встановити характер зміни амплітуди в межах досліджуваного діапазону режимів.

У загальному вигляді модель мала вигляд:

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2,$$

де Y – вертикальна амплітуда коливань, x_1 – кодоване значення маси привантажувача, x_2 – кодоване значення кутової частоти обертання дебалансів.

Матриця планування експерименту наведена в таблиці 1

Таблиця 1 Матриця планування експериментальних досліджень

Table 1 Experimental research planning matrix

№	X1	X2	Маса привантажувача, кг	Кутова частота, рад/с
1	-1	-1	20	180
2	-1	0	20	250
3	-1	+1	20	290
4	0	-1	30	180
5	0	0	30	250
6	0	+1	30	290
7	+1	-1	50	180
8	+1	0	50	250
9	+1	+1	50	290

За результатами оцінювання ефектів встановлено, що регресійна модель достатньо добре описує зміну вертикальної амплітуди коливань, про що свідчать значення $R^2=0,98994$. Найбільший вплив на амплітуду має маса привантажувача: статистично значущими є як її лінійна, так і квадратична складові. Обидва коефіцієнти мають від'ємний знак, що вказує на зменшення вертикальної амплітуди зі збільшенням маси привантажувача. Кутова частота також впливає на амплітуду, однак достовірною є лише її лінійна складова. Квадратичний член за частотою та взаємодія факторів не підтвердили статистичної значущості, тому їхній внесок у межах дослідженого факторного простору можна вважати несуттєвим. Отже, вертикальна амплітуда коливань у більшій мірі визначалася масою привантажувача, тоді як вплив частотного режиму проявлявся слабше і переважно у лінійній формі.

$$Y = 0,976398 - 0,373324x_1 - 0,125722x_1^2 - 0,213178x_2 + 0,008818x_2^2 + 0,049395x_1x_2,$$

де Y – вертикальна амплітуда коливань, мм; x_1 – кодоване значення маси привантажувача; x_2 – кодоване значення кутової частоти.

Однак коефіцієнти при x_2^2 та x_1x_2 не є статистично значущими, оскільки для них $p > 0,05$. Тому для подальшого аналізу краще використовувати скорочене рівняння з урахуванням тільки значущих впливів:

$$Y = 0,976398 - 0,373324x_1 - 0,125722x_1^2 - 0,213178x_2$$

Графічне відображення наведено на рисунку 1.

Проведено перехід від кодованих змінних до натуральних змінних, а потім для узагальнення отриманої залежності виконано перехід до безрозмірних координат. Масу привантажувача подано у вигляді відносного параметра $\mu = m/m_0$, а кутову частоту – у вигляді $\Omega = \omega/\omega_0$, де $m_0 = 30$ кг та $\omega_0 = 250$ рад/с відповідають центральним рівням плану експерименту. У результаті рівняння вертикальної амплітуди набуло вигляду:

$$A_v = 0,285108 + 3,4785\mu - 4,752\mu^2 + 2,07441\mu^3 - 0,28269\mu^4 + 1,47075\Omega - 1,2975\Omega^2$$

Це рівняння можна використовувати для попереднього прогнозування вертикальної амплітуди коливань привантажувача при зміні його маси та кутової частоти віброзбуджувача. У практичному застосуванні воно дає змогу ще до проведення експерименту оцінити, як зміниться амплітуда при вибраному режимі роботи, і підібрати такі параметри, за яких коливання залишатимуться в допустимих межах.

Оскільки рівняння записане в безрозмірних параметрах μ та Ω , його зручно використовувати для порівняння різних режимів роботи установки. Зокрема, збільшення відносної маси привантажувача μ приводить до зменшення вертикальної амплітуди, тоді як зміна відносної кутової частоти Ω дозволяє уточнювати режим коливань у заданому діапазоні.

У виробничих умовах було виконано серію випробувань дослідного зразка з метою перевірки його працездатності, надійності функціонування та відповідності параметрів процесу формування заданим технологічним вимогам. Під час випробувань оцінювали стабільність роботи віброзбуджувачів, характер коливального процесу, взаємодію робочих органів установки з бетонною сумішшю, а також якість сформованих залізобетонних виробів після розпалублення.

За основу прототипу та первинних експериментальних досліджень було прийнято вібраційну установку для формування залізобетонних кілець, розроблену в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (рис. 2). Крім того, використано обладнання КП «Підприємство «Теплотехбуд», до якого додатково виготовлено безінерційний привантажувач з автономним віброзбуджувачем (рис. 3).

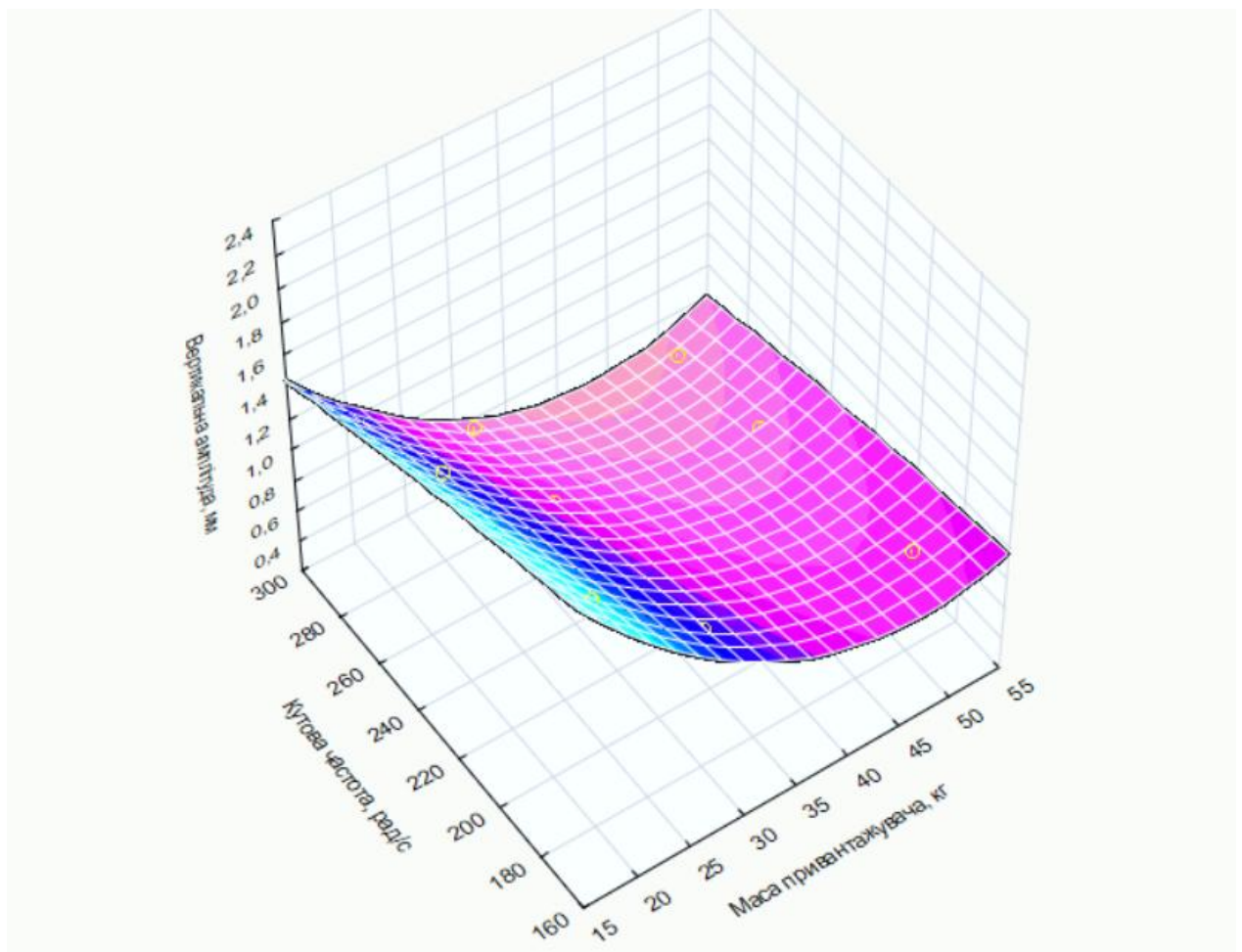


Рисунок 1. Поверхня відгуку вертикальної амплітуди коливань залежно від маси привантажувача та кутової частоти обертання віброзбуджувача
Figure 1. Response surface of vertical oscillation amplitude depending on the loader mass and the angular frequency of rotation of the vibrator



Рисунок 2 Прототип лабораторної установки
Figure 2 Prototype laboratory setup



Рисунок 3 Вібраційна установка з привантажувачем
Figure 3 Vibration installation with loader

Аналіз експериментальних даних показав, що амплітуда горизонтальних коливань форми змінюється по висоті виробу нерівномірно. Для всіх досліджуваних режимів спостерігається загальна тенденція до збільшення амплітуди від нижньої частини форми до її верхньої зони. Такий характер зміни амплітуди пояснюється особливостями роботи системи «віброформа – бетонна суміш – привантажувач», у якій нижня частина форми має більший зв'язок з основою та масивом установки, тоді як верхня частина є більш чутливою до дії коливального процесу.

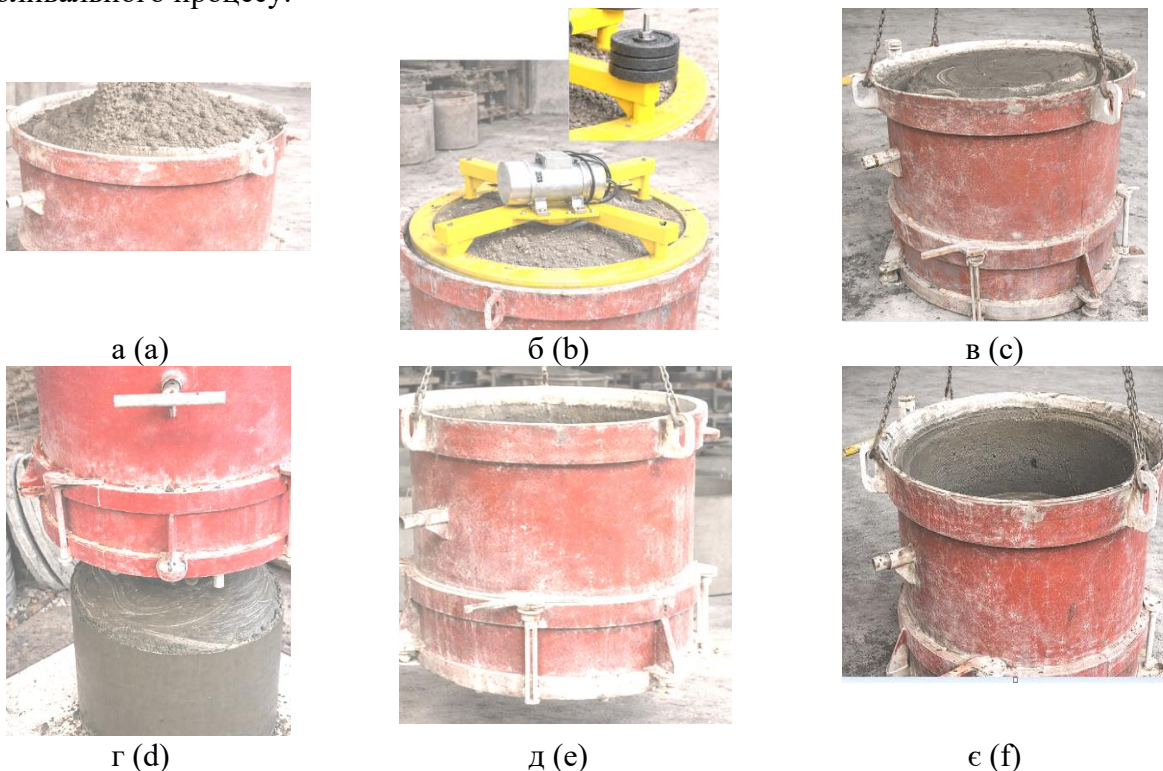
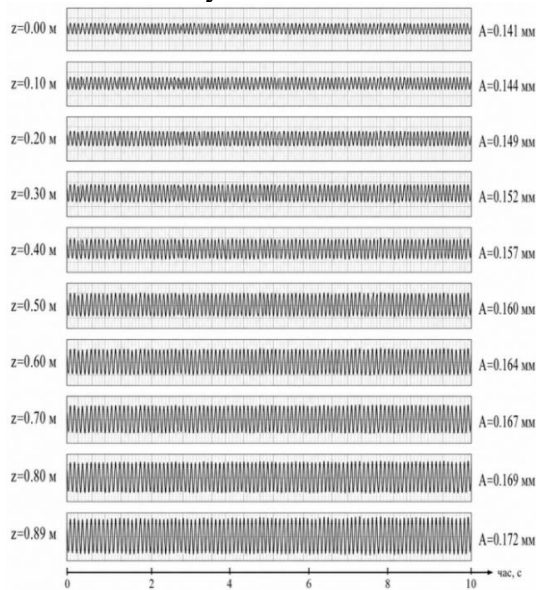


Рисунок 4 Етапи формування виробу
Figure 4 Stages of product formation

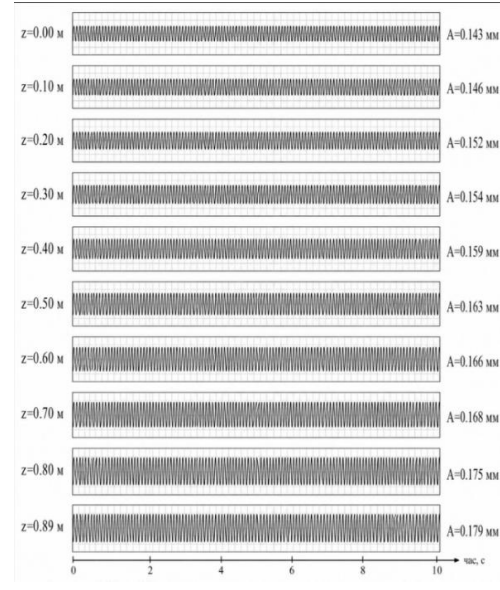
Автономний віброзбуджувач привантажувача працював у трьох режимах. Перший режим відповідав найбільшій частоті обертання 2840 об/хв, що становить приблизно 46 Гц, із вимушуючою силою 2,1 кН. Другий режим реалізовувався за частоти обертання 2300 об/хв, або близько 38,9 Гц, із вимушуючою силою 1,7 кН. Третій режим відповідав частоті обертання 1700 об/хв, або близько 28,5 Гц, із вимушуючою силою 1,3 кН. Таким чином, у процесі експерименту змінювалися як частотні параметри вертикального збурення, так і величина динамічного впливу на бетонну суміш.

Для маси привантажувача 20 кг середні значення горизонтальних амплітуд змінювалися в межах приблизно від 0,141 до 0,185 мм залежно від висоти вимірювання та режиму роботи віброзбуджувача (рисунк 5). Найменші значення амплітуди спостерігалися в нижній частині форми, а найбільші – у верхній зоні виробу. При цьому зниження частоти роботи привантажувача супроводжувалося збільшенням горизонтальних амплітуд, що свідчить про зміну характеру взаємодії між привантажувачем, бетонною сумішшю та формою.

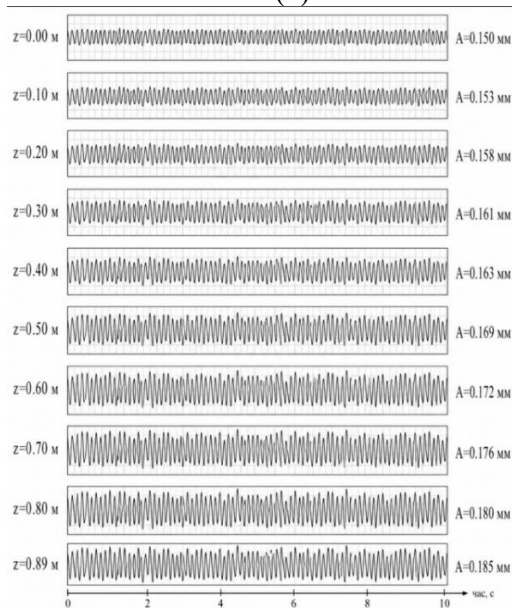
За маси привантажувача 30 кг було зафіксовано дещо вищі значення горизонтальних амплітуд порівняно з варіантом 20 кг. У цьому випадку амплітуди також зростали по висоті форми, а найбільші значення були отримані у верхній частині виробу. Це свідчить про те, що збільшення маси привантажувача до 30 кг сприяє більш активному передаванню вібраційного впливу на бетонну суміш і форму. Такий режим можна розглядати як один із найбільш ефективних з погляду поєднання достатньої маси притискання та збереження необхідної амплітуди коливань.



а (а)



б (б)



в (в)

Рисунок 5 Віброграми амплітуд горизонтальних коливань форми по висоті виробу КС 7-9 при масі привантажувача 20 кг та частоті коливань

а) 46Гц б) 38,9 Гц в) 28,5 Гц

Figure 5 Vibrograms of amplitudes of horizontal vibrations of the shape along the height of the product KS 7-9 with a loader mass of 20 kg and a vibration frequency a) 46 Hz b) 38.9 Hz c) 28.5 Hz

Для привантажувача масою 50 кг горизонтальні амплітуди також мали тенденцію до зростання по висоті форми, однак характер впливу привантажувача змінювався. Збільшення маси призводило до більшого статичного притискання бетонної суміші, проте одночасно могло обмежувати інтенсивність вертикальних коливань самого привантажувача. Це підтверджується результатами вимірювання вертикальних

амплітуд, де зі збільшенням маси привантажувача спостерігалось зменшення амплітуди його вертикального руху.

Особливо показовими є результати вимірювання вертикальних амплітуд привантажувача рисунок 6. За маси 20 кг вертикальні амплітуди були найбільшими і для окремих режимів перевищували 1,7–2,0 мм. Це свідчить про високу рухливість привантажувача та інтенсивний вертикальний вплив на бетонну суміш. Однак надмірно велика амплітуда за малої маси не забезпечувала достатній ущільнювальний тиск, оскільки притискна дія робочого органа залишалася обмеженою.

При збільшенні маси привантажувача до 30 кг вертикальні амплітуди зменшувалися, але залишалися достатніми для забезпечення ефективного доущільнення бетонної суміші. Такий режим є більш збалансованим, оскільки поєднує достатню масу привантажувача з помітним вертикальним коливальним впливом. Саме за таких умов можна очікувати більш рівномірного ущільнення верхніх шарів бетонної суміші та зменшення кількості поверхневих дефектів виробу.

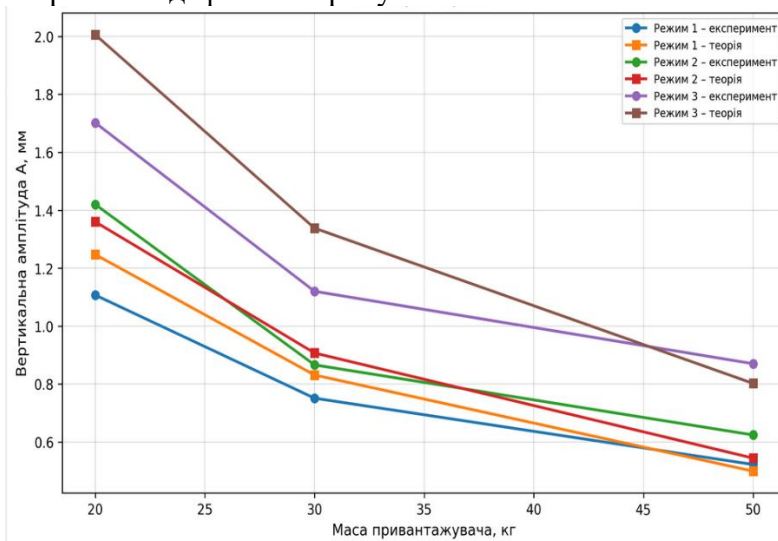


Рисунок 6 Порівняння експериментальних і теоретичних значень вертикальних амплітуд при ущільненні бетонного виробу КС 7-9

Figure 6 Comparison of experimental and theoretical values of vertical amplitudes during compaction of concrete product KS 7-9

Це підтверджує правильність прийнятих теоретичних передумов щодо впливу масових параметрів на динаміку привантажувача. Водночас відмінності між теоретичними та експериментальними значеннями можуть бути пояснені реальними умовами роботи установки, зокрема неоднорідністю бетонної суміші, зміною її властивостей у процесі ущільнення, наявністю втрат енергії, тертя, зазорів у конструктивних елементах і впливом контактної взаємодії між пуансоном та сумішшю.

5. Висновки Отримані результати підтверджують доцільність застосування безінерційного привантажувача з автономним віброзбуджувачем під час формування залізобетонних кілець. Його використання дозволяє створити додатковий вертикальний вібраційний вплив на бетонну суміш, що є особливо важливим для ущільнення верхньої частини виробу. Поєднання горизонтальних коливань форми з вертикальними коливаннями привантажувача забезпечує більш складний просторовий характер впливу на суміш і створює передумови для підвищення якості ущільнення.

Для маси 50 кг вертикальні амплітуди були найменшими. Це пояснюється тим, що більша маса привантажувача підвищує інерційний опір системи і зменшує амплітуду його вертикальних коливань. Маса 50 кг забезпечує більший статичний тиск на бетонну суміш, але – знижує динамічну складову ущільнення.

Порівняння експериментальних і теоретичних значень вертикальних амплітуд показало однакову загальну тенденцію, що зі збільшенням маси привантажувача амплітуда його вертикальних коливань зменшується.

Список використаних джерел:

1. Nesterenko M. Loaders for Concrete Compaction / M. Nesterenko, O. Panfilov, M. Pyrlyk // *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 вібруючої 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.

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 seredovyscha, shcho obrobliatsia vibratsiynym prystroiem]. *Resource-Efficient Materials, Structures, Buildings and Constructions – Resursoekonomni materialy, konstruksii, 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 vzaemodii vibruiuchoi plyty z tsementobetonnoi sumishshiu]. *Transactions of Kremenichuk 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 Kremenichuk 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 vibromaidanchykyv 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.