

А.І. Аніщенко<sup>1</sup>, В.В. Блажко<sup>1</sup>, М.Ю. Бугрименко<sup>1</sup>, Д.С. Каленіч<sup>1</sup>, В.В. Ведмідь<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова

<sup>2</sup>Національний університет «Полтавська політехніка ім. Юрія Кондратюка»

## КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ВИРОБНИЦТВА БЕТОННИХ БЛОКІВ ДЛЯ МОДУЛЬНОГО БУДІВНИЦТВА

У статті досліджено технологію виробництва бетонних леґо-блоків з акцентом на процес ущільнення суміші за допомогою комбінованого вібраційного привантаження. Проаналізовано технічні та експлуатаційні переваги використання модульних блоків із замковими з'єднаннями, зокрема в умовах мобільного та кризового будівництва. Розроблено математичну модель багатомасової вібраційної системи, яка враховує демпфування, пружно-в'язкопластичні властивості бетонної суміші, ударну взаємодію та вертикальні коливання. Запропоновано енергетичний підхід для оцінки ефективності ущільнення. Представлено оптимізовану технологічну лінію виробництва, яка забезпечує високу якість продукції, автоматизацію процесів та енергоефективність.

**Ключові слова:** бетонні леґо-блоки, ущільнення, вібрації, привантажувач, модульне будівництво, математичне моделювання, демпфування, енергоефективність

### Постановка проблеми

Однією з ключових проблем у сучасному будівництві є поєднання швидкості монтажу, економічної ефективності та екологічної безпеки матеріалів. Традиційні методи будівництва, такі як використання цегли та монолітного бетону, мають певні недоліки, зокрема тривалий час зведення конструкцій, високу вартість робочої сили та значне споживання ресурсів.

Газобетонні та пінобетонні блоки є більш економічними та мають хороші теплоізоляційні властивості, проте поступаються за міцністю. Леґо-блоки на основі бетонної суміші можуть стати компромісним рішенням, яке поєднує переваги різних будівельних матеріалів.

Однак недостатньо досліджені аспекти їхньої довговічності, загальної вартості будівництва та впливу на навколишнє середовище. Саме тому важливо провести детальний порівняльний аналіз цієї технології з альтернативними будівельними матеріалами, проаналізувати переваги та недоліки та аспекти використання леґо-блоків під час будівництва.

Таким чином, існує потреба в проведенні комплексного техніко-економічного й технологічного аналізу застосування модульних бетонних блоків різного складу з акцентом на оптимізацію процесу формування та ущільнення суміші, зокрема арболіту, із залученням засобів вібраційної техніки.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Оновлений аналіз останніх досліджень і публікацій у галузі модульного будівництва з використанням бетонних леґо-блоків демонструє зростаючий інтерес до цієї технології як ефективного рішення для швидкого, енергоефективного та екологічного зведення споруд. Зокрема, у роботі [1] розроблено математичну модель оцінювання стабільності конструкцій, зібраних із леґо-блоків без використання розчину, що дозволяє кількісно оцінити допустиме навантаження і забезпечити надійність таких систем. У дослідженні [2] розглянуто застосування будівельних композитів для виготовлення леґо-блоків, зокрема на основі вторинної сировини, що сприяє зниженню екологічного впливу та підвищенню міцності завдяки армуванню. Результати проведених досліджень в роботі [3] узгоджуються з сучасними науковими підходами до підвищення несучої здатності збірних бетонних елементів та їх адаптації до зовнішніх впливів, що підтверджує доцільність використання елементів із замковими з'єднаннями у конструкціях, де важлива структурна цілісність. Дослідження [4] акцентує увагу на багатомасштабному аналізі волокнистого бетону для досягнення сталого розвитку, що узгоджується з підходами, застосованими у розробці арболітових леґо-блоків із підвищеною теплоізоляційною здатністю. Крім того, актуальність використання як традиційних, так і інноваційних методів оцінювання властивостей бетонних матеріалів підтверджується у публікації [5], де підкреслено необхідність комплексного дослідження фізико-механічних характеристик конструкційних матеріалів. На рівні національних конференцій також фіксується інтерес

до вдосконалення процесів ущільнення. В роботі [6] досліджено застосування активного привантажувача, який дозволяє поєднувати вібраційну і динамічну дію на бетонну суміш, сприяючи глибшому ущільненню важкодоступних зон форми. У наступній роботі [7] наведено порівняльний аналіз конструкцій вібраційних привантажувачів та їх вплив на характеристики ущільнення, що дозволяє адаптувати технологію під різні види бетонних сумішей. Практична імплементація цих підходів продемонстрована у роботі [8], де представлено ефективну виробничу лінію для виготовлення бетонних леґо-блоків з використанням вібраційного ущільнення і теплової обробки. Технологія охоплює всі етапи – від підготовки сировини до формування та зберігання готової продукції – і дозволяє досягати стабільної якості виробів при зниженні енергозатрат.

Таким чином, системний підхід до проектування, виготовлення та ущільнення леґо-блоків із бетонної суміші засвідчує, що ця технологія не лише відповідає вимогам швидкого, доступного й екологічного будівництва, а й має вагоме наукове підґрунтя. Актуальність подальших досліджень полягає в оптимізації динамічних режимів ущільнення та впровадженні інтелектуальних систем керування виробництвом для підвищення ефективності модульного будівництва.

### Мета статті

Проаналізувати технологію створення та використання леґо-блоків на основі бетонної суміші, їх переваги та недоліки.

Дослідити динаміку ущільнення бетонної суміші у формі під дією комбінованого вібраційного привантаження в системі «вібраційна установка – бетонна суміш – привантажувач».

Розробити та проаналізувати математичну модель багатомасової вібраційної системи з урахуванням вертикальних гармонічних коливань, імпульсних навантажень, пружно-в'язкопластичних властивостей суміші, демпфування та ударної взаємодії.

Ґрунтуючись на результатах проведених дослідження запропонувати технологічну лінію для створення леґо-блоків, яка дозволить ефективно використовувати наявне технологічне обладнання та підвищити показники продуктивності.

### Виклад основного матеріалу

У статті проаналізовано сучасні підходи до виробництва та застосування бетонних леґо-блоків у модульному будівництві з урахуванням техніко-економічних, технологічних та екологічних аспектів. Використання таких блоків ґрунтується на технології формування бетонної суміші у металевих прес-формах, які забезпечують високу точність

геометричних параметрів та наявність замкових з'єднань типу «шип–паз». Це дозволяє значно спростити і прискорити процес зведення конструкцій без використання традиційного розчину, зменшуючи трудомісткість та витрати на будівництво.

Основними компонентами бетонної суміші для леґо-блоків є цемент, пісок, щебінь і модифікуючі домішки (пластифікатори), які забезпечують оптимальне співвідношення міцності, пластичності та довговічності матеріалу. Після формування блоки піддаються сушінню та витримці до досягнення необхідної міцності.

Перевагами леґо-блоків є:

- висока швидкість монтажу;
- зменшене використання цементного розчину;
- точність з'єднання елементів без додаткового вирівнювання;
- добрі теплоізоляційні властивості;
- екологічна безпека матеріалів і можливість вторинного використання.

Разом із тим, технологія має певні обмеження. Необхідна висока точність підготовки фундаменту для запобігання перекосу конструкції, а міцність блоків, хоч і достатня для більшості приватних об'єктів, поступається монолітному бетону, що може обмежити їх використання в багатоповерховому будівництві. У холодному кліматі іноді виникає потреба в додатковому утепленні.

Порівняльний аналіз із традиційними стіновими матеріалами (газобетон, пінобетон, цегла, моноліт) дозволяє виділити конкурентні переваги леґо-блоків. За вартістю вони є проміжним варіантом між бюджетними (газобетон, пінобетон) і дорогими (цегла, моноліт) рішеннями. Швидкість монтажу, завдяки конструкції з'єднань, є однією з найвищих серед усіх матеріалів. Щодо теплоізоляції, леґо-блоки на основі полістиролбетону не поступаються сучасним легким бетонам і навіть можуть перевищувати їх за ефективністю: стіна товщиною 30 см відповідає цегляній стіні товщиною 180 см.

Особливу увагу у виробництві леґо-блоків заслуговує використання сталевих форм, які забезпечують точність і повторюваність геометрії. Блоки формуються шляхом заливання бетонної суміші у форми з подальшим її ущільненням. У даному дослідженні акцент зроблено на застосуванні активного привантажувача з комбінованою вібраційною дією, що забезпечує покращене ущільнення суміші. Система «шип–паз», втілена у формі, дозволяє створювати як постійні, так і мобільні конструкції (від житлових будинків до технічних споруд).

З технічної точки зору, обладнання для виробництва леґо-блоків включає: бункери для дозування сировини, бетонозмішувач, систему подачі суміші у форми, віброплощадки та

привантажувачі для ущільнення. Також необхідні транспортні візки або крани для переміщення блоків після формування.

Окрему роль у становленні технології відіграє поява перших багаторазових прес-форм зі змінними вставками, які дають змогу швидко адаптувати виробничу лінію до необхідних типорозмірів. Це суттєво знижує витрати на переналаштування та забезпечує гнучкість виробництва. Універсальність конструкцій блоків дозволяє їх застосовувати також у тимчасових відсіках для зберігання матеріалів, протишумових бар'єрах, вибухозахисних стінах тощо.

Таким чином, технологія виробництва бетонних леґо-блоків має високий потенціал у сфері модульного будівництва завдяки поєднанню простоти монтажу, ефективності ущільнення та гнучкості конструктивних рішень. Подальше вдосконалення процесу ущільнення, зокрема за допомогою активного привантажувача, дозволяє підвищити якість виробів та зменшити енерговитрати на одиницю продукції.

Модульний підхід до створення сталевих форм для бетонних блоків забезпечує високу гнучкість у виробничих процесах (рис. 1) [9]. Конструкція прес-форми може бути адаптована до специфічних вимог і потреб замовника, що дозволяє виробляти блоки з різними характеристиками, розмірами та формами. Це особливо важливо для сучасної будівельної індустрії, де кожен проект може вимагати індивідуальних рішень.



Рис. 1. Сталеві форми для виробництва бетонних блоків

Модульна система дозволяє розширювати можливості виробництва без необхідності заміни основних елементів обладнання. Наприклад, можна створювати різноманітні типи замкових блоків, що легко з'єднуються між собою, забезпечуючи швидкість і точність при будівництві. Гнучкість прес-форми полягає в її здатності до швидкої адаптації під різні проекти, що робить її універсальним інструментом для виготовлення великого асортименту продукції.

З огляду на вимоги сучасного ринку, такий метод виробництва відрізняється не лише ефективністю, а й довговічністю та економічністю. Сталеві форми можуть витримувати високі навантаження та забезпечують тривалий термін служби, що знижує витрати на їх обслуговування та заміну. Це робить їх надійним та економічно вигідним рішенням для виробників, які прагнуть оптимізувати свої виробничі процеси.

Використання модульних конструкцій (рис. 2) форм є стратегічно вигідним вкладенням у розвиток бетонної промисловості. Це інноваційний підхід, який підвищує продуктивність, забезпечує високу якість блоків і мінімізує витрати на виробництво. BetonErgo, виробляє бетонні модульні блоки ЛБ з високоякісного бетону марки С30/35, що забезпечує їм надзвичайну міцність, довговічність та морозостійкість [9]. Завдяки продуманій конструкції з системою замикання, монтаж блоків-конструкторів відбувається швидко та легко, скорочуючи витрати часу і коштів на робочу силу. Крім того, ці блоки можуть бути повторно використані, що робить їх ідеальним рішенням для тимчасових споруд та сприяє екологічному будівництву.

В основі модульного підходу лежить принцип взаємозамінності панелей і вставок у прес-формі. Наявність змінних елементів дозволяє швидко адаптувати форму до виготовлення нових типів продукції, не вдаючись до дорогих переналаштувань або придбання нових комплектів оснастки. Наприклад, змінні вставки забезпечують можливість виробництва блоків із різними геометричними особливостями (наприклад, змінною глибиною пазів чи формою виступів), що є особливо актуальним для модульного будівництва та створення багаторазових розбірних конструкцій (рис. 2).



Рис. 2. Переставна, розбірна конструкція форми для виготовлення блоків

Важливою перевагою сталевих форм є їхня довговічність: вони здатні витримувати високі навантаження під час ущільнення бетонної суміші, що знижує витрати на технічне обслуговування та підвищує загальну надійність виробничого циклу.

Застосування якісних сталевих сплавів і точне виготовлення елементів форм сприяють досягненню високої точності геометрії блоків, що є критично важливим для монтажу без розчину.

Окрім економічних переваг, модульні форми демонструють високу адаптивність до змін ринку: у випадку зміни попиту виробник може швидко модифікувати асортимент продукції без значних капіталовкладень. Це забезпечує не лише гнучкість виробництва, але й конкурентну перевагу на будівельному ринку.

Описана технологія також сприяє розвитку конструкційного підходу в проектуванні споруд: блоки, за аналогією з елементами конструктора, можна комбінувати у довільних конфігураціях, що особливо ефективно при зведенні мобільних, розбірних або тимчасових будівель. Високоточні форми дозволяють створювати блоки з виступами та гніздами, які забезпечують міцне фіксування без застосування клею або цементного шва. Такий підхід відповідає сучасним вимогам до адаптивної архітектури, підвищеної екологічності та мінімізації витрат при будівництві й утилізації (рис. 3).



Рис. 3. Модульна конструкція стіни виконана з леґо-блоків

Однією з важливих переваг модульних бетонних блоків є їхня ефективність і функціональність в умовах надзвичайних ситуацій, зокрема під час воєнного стану та бойових дій. Конструктивна гнучкість та швидкість монтажу дозволяють оперативно створювати тимчасові захисні споруди, укриття, перегородки, логістичні відсіки та бар'єри з підвищеним рівнем безпеки.

Відсіки для зберігання, виготовлені із з'єднаних бетонних блоків (рис. 4), відзначаються універсальністю, багаторазовістю та адаптивністю. Вони застосовуються для організації зберігання сипучих і твердих матеріалів у логістичних зонах, на будівельних майданчиках, військових базах і складах. Завдяки конструкції замкових з'єднань, такі відсіки легко монтуються, розширюються або

переміщуються згідно з оперативними потребами користувачів.

Ключовою перевагою бетонних блоків у кризовий період є їхня стійкість до динамічних навантажень, включаючи впливи вибухів, ударів, снарядних або артилерійських хвиль. Це дозволяє використовувати їх для створення вибухозахисних (вибухобезпечних) стін, бар'єрів або заслонів на території об'єктів, де існує ризик ворожих дій, вибухів або витоків небезпечних речовин (рис. 5). Подібні структури можуть бути встановлені навколо складів із боєприпасами, резервуарів з паливом, захисних сховищ для людей чи техніки.



Рис. 4. Відсіки, створені з бетонних леґо-блоків для зберігання матеріалів



Рис. 5. Вибухозахисні стіни з бетонних блоків у зоні підвищеної небезпеки

Міцність та довговічність бетонних леґо-блоків дає змогу реалізовувати подібні інженерні рішення без потреби у масивних фундаментах або капітальному будівництві. Це скорочує час і ресурсні витрати при зведенні конструкцій у зоні бойових дій або на об'єктах подвійного призначення. Крім того, можливість багаторазового використання блоків після демонтажу робить такі системи рентабельними навіть при короткостроковому застосуванні.

У сільському господарстві, промисловості та логістиці ці конструкції також використовуються для ізоляції, сортування та накопичення сировини або готової продукції. У випадках евакуації, блоки

можуть бути перетворені на тимчасові укриття або пункти розміщення персоналу. Наявність виступів і пазів дозволяє збирати блоки у стабільні конструкції без використання цементу або додаткових кріплень, що є надзвичайно важливим у польових умовах.

На рис. 6 представлено запропоновану авторами технологічну лінію створення бетонних леґо-блоків, яка охоплює ключові етапи: приготування бетонної суміші, заливку у сталеві прес-форми з замковими елементами, ущільнення суміші за допомогою активного привантажувача, витримку, виймання блоків та їх подальше складування.

Така лінія є прикладом комплексного підходу до автоматизації та оптимізації виробничого процесу, що дозволяє досягати високої повторюваності геометрії блоків, мінімізувати людський фактор та забезпечувати стабільну якість продукції. Особливо важливою є реалізація комбінованого методу ущільнення, що поєднує вертикальні вібрації та статичне привантаження, що дозволяє покращити однорідність та щільність структури, зменшити кількість повітряних пор і підвищити міцнісні характеристики готового виробу.

Для покращення структури виробу в процесі ущільнення блоків пропонується використовувати активний привантажувач [6]. Він встановлюється на залиту суміш у форму, розміщену в прямику, що не порушує описану вище технологію виробництва.

Активний привантажувач забезпечує одночасний вплив двох незалежних джерел вібраційної енергії на виріб від основної форми та від самого привантажувача. Ця комбінована дія сприяє ефективнішому ущільненню суміші за рахунок поєднання вібраційних коливань та співударяння рухомих елементів привантажувача.

На рис. 7 зображено вібраційну установку 1 із формою 2 та сумішшю 3. Зверху розташований привантажувач, який складається з двох частин нижньої 5 та верхньої 6, з'єднаних між собою пружинами 7. На основній частині привантажувача встановлено два віброзбуджувачі 8.

Під час роботи віброзбуджувачі привантажувача генерують додаткові коливання, що накладаються на вібрації від віброзбуджувача 4 установки. Це призводить до коливального руху маси 6 та її співударяння з масою 5 ударними елементами 9. У результаті створюється інтенсивний вплив на суміш, що підсилює її ущільнення завдяки динамічному ущільненню матеріалу під дією вібрацій та імпульсних ударів.

Для опису ущільнення арболітової суміші в умовах вібраційного навантаження використовується комбінована модель, що поєднує систему мас-пружин та пружнов'язке середовище [10, 11].



Рис. 6. Технологічна лінія виробництва леґо-блоків

1 – бункер для бетону, 2 – бункер для піску, 3 – силос для цементу 4 – силос для води, 5 – конвеєр, 6 – стрічковий конвеєр, 7 – труба, 8 – дробарка конусна, 9 – гуркіт, 10 – змішувач, 11 – бункер накопичувач, 12 – візок, 13 – форма з матеріалом, 14 – етажерка, 15 – камера теплової обробки,

16 – стрічковий конвеєр, 17 – мостовий кран, 18 – піддони, 19 – готовий виріб, 20 – леґо-блок, 21 – форма для матеріалу

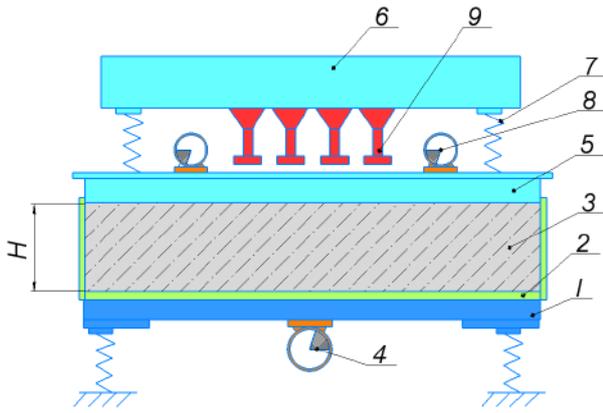


Рис. 7. Схема вібраційної установки з активним привантажувачем для ущільнення суміші  
 1 – вібраційна установка, 2 – форма, 3 – суміш, 4 – вібробуджувач, 5 – нижня шстатина привантажувача, 6 – верхня частина привантажувача, 7 – пружини, 8 – вібробуджувач привантажувача, 9 – ударні елементи

Модель коливань з двома масами платформа – привантажувач може бути описана системою рівнянь (1), що складається з: платформи масою  $m_1$ , привантажувача масою  $m_2$ , демпфуючих і пружних зв'язків між елементами.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_1(x_1 - x_2) = F_0 \sin(\omega t) \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k_1(x_1 - x_2) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

де  $x_1(t), x_2(t)$  — переміщення платформи та привантажувача,

$F_0 \sin(\omega t)$  — збуджувальна сила,  
 $c_1, c_2$  — коефіцієнти внутрішнього тертя (демпфери),  
 $k_1, k_2$  — жорсткості відповідно між платформою та привантажувачем і відносно основи.

Модель поширення вібрацій у тілі арболітової суміші

Суміш моделюється як пружнов'язке середовище (модель Кельвіна-Фойгта):

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

або у нормалізованому вигляді:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + 2\beta \frac{\partial u}{\partial t} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (3)$$

де  $u(z, t)$  — зміщення частинки суміші на висоті  $z$  у момент часу  $t$ ,

$\beta = \frac{\eta}{2\rho}$  — коефіцієнт демпфування,

$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$  — швидкість пружної хвилі в арболіті.

Граничні умови наступні:

На дні форми (віброплатформа):  $u(0, t) = A \sin(\omega t)$

На вільній поверхні:  $\left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=H} = 0$

де  $H$  — висота шару суміші у формі.

Енергетичний підхід розв'язку можна описати формулою (4) для оцінки енерговитрат ущільнення, залежність густини від тривалості вібрації, інтенсивності впливу з подальшим наростанням густини

$$\rho = \rho_k \left( 1 - e^{-0.5 \frac{P_{екв} \cdot t \cdot f_i}{P_k}} \right) \quad (4)$$

де  $\rho_k$  — кінцева щільність,

$P_{екв}$  — еквівалентне навантаження,

$f_i$  — частота,  $t$  — тривалість ущільнення.

Визначення напружень для шарів арболіту можна визначити за формулою (5)

$$\sigma(z, t) = \rho \cdot g \cdot (H - z) - A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t + \phi) \quad (6)$$

де враховується як вага суміші, так і динамічна дія платформи.

Розраховувати потрібну тривалість ущільнення до досягнення заданої щільності

$$t = \frac{1}{f_i \cdot P_{екв}} \cdot \ln \left( \frac{\rho_k - \rho_0}{\rho_k - \rho} \right) \quad (7)$$

Відповідно до рисунку 13 описана система є складною багатомасовою вібраційною системою з ударною взаємодією, у якій на ущільнювану арболітову суміш впливають: коливання від вібробуджувача самої установки (вертикально спрямовані), коливання від двох вібробуджувачів на верхній масі привантажувача, імпульсні удари між верхньою та нижньою масами привантажувача та передача навантаження через контакт із формою та сумішшю. Рух системи можна описати диференціальними рівняннями руху системи (8)

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_{12}(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + k_{12}(x_1 - x_2) = F_u(t) + F_{конт}(t); \\ m_2 \ddot{x}_2 + c_{12}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_{12}(x_2 - x_1) + c_{23}(\dot{x}_2 - \dot{x}_3) + k_{23}(x_2 - x_3) = -F_{уд}(t); \\ m_3 \ddot{x}_3 + c_{23}(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_{23}(x_3 - x_2) = F_{v1}(t) + F_{v2}(t) + F_{уд}(t). \end{cases} \quad (8)$$

де  $m_1$  — рухома рама з формою та сумішшю,

$m_2$  — нижня частина привантажувача,

$m_3$  — верхня частина привантажувача,

$k_{23}, c_{23}$  — жорсткість і демпфування між  $m_2$  та  $m_3$ ,

$F_u(t)$  — збуджувальна сила від вібробуджувача установки (на  $m_1$ ),

$F_{v1}(t), F_{v2}(t)$  — сили від вібробуджувачів на  $m_3$ ,

$F_{уд}(t)$  — ударна сила між , якщо між ними відбувається контакт (співудар).

$$F_{уд}(t) = \begin{cases} K_{y\delta} \cdot (\dot{x}_3 - \dot{x}_2) \\ 0 \end{cases} \quad (9)$$

Сумарне динамічне напруження в тілі суміші на глибині  $z$  з урахуванням дії платформи та імпульсних ударів описується як:

$$\sigma(z, t) = \rho(t) \cdot g \cdot (H - z) - A_u \cdot \omega_u^2 \cdot \cos(\omega_u t) + \frac{\Delta P_{y\delta}}{S_{форми}} \cdot \delta(t - t_i) \quad (10)$$

$A_u \cdot \omega_u$  – амплітуда і частота вібробудувача установки,

$\Delta P_{y\delta} = m_3 \cdot v$  – імпульс від удару верхньої маси по нижній,

$S_{\text{форми}}$  – площа контактної поверхні,

$\delta(t - t_i)$  – дельта-функція, що описує імпульс у момент удару  $t_i$ .

## Висновки

У результаті дослідження встановлено, що технологія виробництва бетонних леґо-блоків є перспективною для модульного будівництва завдяки точності геометрії, швидкому монтажу та можливості багаторазового використання. Застосування замкових з'єднань дозволяє знизити витрати на будівництво, а використання активного привантажувача з комбінованою вібраційною дією – покращити ущільнення суміші та якість готових виробів.

Математичне моделювання процесу ущільнення включає побудову багатомасової вібраційної системи з урахуванням пружнов'язких властивостей суміші, демпфування, ударної взаємодії та граничних умов. Рівняння руху дозволяють аналізувати динаміку ущільнення, а модель Кельвіна-Фойгта – описати поширення хвиль у бетоні. Розрахунки підтверджують ефективність комбінованого ущільнення та лягають в основу розробленої технологічної лінії. Подальші дослідження слід спрямувати на уточнення параметрів моделі та впровадження цифрових систем управління ущільненням.

## Література

- Liu R., Deng K., Wang Z., Liu C. StableLego: Stability Analysis of Block Stacking Assembly // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2024. – P. 1–8. – DOI: 10.1109/LRA.2024.3414281.
- Lesovik V., Elistratkin M., Salnikova A. Construction composites for Lego-blocks production // *AIP Conference Proceedings*. – 2022. – Vol. 2696. – Art. 020006. – DOI: 10.1063/5.0115526.
- Zhang W., Ding Z., Kang H., Lin P., Wen G., Yong D., Lu C., Wang J., Meng X., Rong K., Tian L. Research on Bearing Capacity of a Novel Prestressed Concrete Prefabricated Foundation with High Uplift Resistance Characteristic // *Buildings*. – 2024. – Vol. 14, № 12. – Art. 3743. – DOI: 10.3390/buildings14123743.
- Wang X.Q., Chow C., Lau D. Multiscale perspectives for advancing sustainability in fiber reinforced ultra-high performance concrete // *npj Materials Sustainability*. – 2024. – Vol. 2. – DOI: 10.1038/s44296-024-00021-z.
- Habib A., al Hourri A., Al-Toubat S., Junaid M.T. Conventional and non-conventional experimental techniques for evaluating the properties of construction materials // *Discover Civil Engineering*. – 2024. – Vol. 1. – DOI: 10.1007/s44290-024-00148-x.
- Використання імпульсного вібраційного привантажувача для доущільнення бетонних сумішей / М.М. Нестеренко, О.І. Панфілов, М.О. Пирлик [та ін.] // Створення, експлуатація і ремонт автомобільного

транспорту та будівельної техніки : матеріали VII Всеукр. наук.-техн. конф. (25 квіт. 2024 р., м. Полтава). – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2024. – С. 128–130.

- Оцінка та аналіз конструкцій і параметрів вібраційних привантажувачів для доущільнення бетонних сумішей / М.М. Нестеренко, О.І. Панфілов, М.О. Пирлик, В.В. Ведмідь // Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки : матеріали VI Всеукр. наук.-техн. конф., 11 трав. 2023 р. – Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. – С. 90–91.
- Бугрименко М.Ю., Аніщенко А.І. Виробництво леґо-блоків на основі бетонної суміші // *Матеріали VIII міжнар. наук.-практ. конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених*. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2024. – С. 327–329.
- BETON ENERGO. Бетонні модульні блоки ЛБ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://betonenergo.com.ua/modular\\_concrete\\_blocks\\_lb/](https://betonenergo.com.ua/modular_concrete_blocks_lb/) (дата звернення: 20.09.2024).
- Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем : навч. посіб. / І.І. Назаренко. – 2-ге вид. – Київ : Видавничий Дім «Слово», 2010. – 440 с.
- Дослідження режимів ущільнення легкобетонних сумішей на ударно-вібраційній установці / І.А. Марченко, Ш. Насуллов, М.М. Нестеренко, Т.М. Нестеренко // *Збірник матеріалів III Всеукр. студент. наук.-практ. конф. "Досвід впровадження у навчальний процес сучасних комп'ютерних технологій"*. – Кропивницький : ЦНТУ, 2021. – С. 107-109.

## References

- Liu, R., Deng, K., Wang, Z., & Liu, C. (2024). StableLego: Stability analysis of block stacking assembly. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *PP*, 1–8. <https://doi.org/10.1109/LRA.2024.3414281>
- Lesovik, V., Elistratkin, M., & Salnikova, A. (2022). Construction composites for Lego-blocks production. *AIP Conference Proceedings*, *2696*, 020006. <https://doi.org/10.1063/5.0115526>
- Zhang, W., Ding, Z., Kang, H., Lin, P., Wen, G., Yong, D., Lu, C., Wang, J., Meng, X., Rong, K., & Tian, L. (2024). Research on bearing capacity of a novel prestressed concrete prefabricated foundation with high uplift resistance characteristic. *Buildings*, *14*(12), 3743. <https://doi.org/10.3390/buildings14123743>
- Wang, X. Q., Chow, C., & Lau, D. (2024). Multiscale perspectives for advancing sustainability in fiber reinforced ultra-high performance concrete. *npj Materials Sustainability*, *2*. <https://doi.org/10.1038/s44296-024-00021-z>
- Habib, A., al Hourri, A., Al-Toubat, S., & Junaid, M. T. (2024). Conventional and non-conventional experimental techniques for evaluating the properties of construction materials. *Discover Civil Engineering*, *1*. <https://doi.org/10.1007/s44290-024-00148-x>
- Nesterenko, M. M., Panfilov, O. I., & Pyrylyk, M. O. (2024). Vykorystannia impulsnoho vibratsiinoho pryvantazhuvacha dlia doushchilnennia betonnykh sumishei [Use of an impulse vibration load applicator for concrete mix recompaction]. In *Stvorennia, ekspluatatsiia i remont avtotransportu ta budivelnoi tekhniki – Creation, operation and repair of motor and construction equipment* (Proceedings of the 7th All-Ukrainian Scientific and Technical Conference, Poltava, Ukraine, April 25, 2024, pp. 128–130). [in Ukrainian].
- Nesterenko, M. M., Panfilov, O. I., Pyrylyk, M. O., & Vedmid, V. V. (2023). Otsinka konstrukttsii i parametriv vibratsiinykh pryvantazhuvachiv dlia doushchilnennia betonnykh sumishei [Evaluation of designs and parameters of vibration load

applicators for concrete mix recompaction]. In *Stvorennia, ekspluatatsiia i remont avtotransportu ta budivelnoi tekhniki – Creation, operation and repair of motor and construction equipment* (Proceedings of the 6th All-Ukrainian Scientific and Technical Conference, Poltava, Ukraine, May 11, 2023, pp. 90–91). [in Ukrainian].

8. Buhrymenko, M. Yu., & Anishchenko, A. I. (2024). Vyrobnystvo leho-blokv na osnovi betonnoi sumishi [Production of concrete-based Lego blocks]. In *Materialy VIII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh – Proceedings of the 8th International Scientific-Practical Conference of Higher Education Seekers and Young Scientists* (pp. 327–329). Kharkiv, Ukraine: KhNUMG im. O. M. Beketova. [in Ukrainian].

9. BETON ENERGO. (2024). *Betonni modulni bloky LB [Modular concrete blocks LB]*. Retrieved September 20, 2024, from [https://betonenergo.com.ua/modular\\_concrete\\_blocks\\_lb/](https://betonenergo.com.ua/modular_concrete_blocks_lb/) [in Ukrainian].

10. Nazarenko, I. I. (2010). *Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system [Applied problems in the theory of vibrational systems]* (2nd ed.). Kyiv, Ukraine: Vydavnychi Dim "Slovo". [in Ukrainian].

11. Marchenko, I. A., Nasulloiev, Sh., Nesterenko, M. M., & Nesterenko, T. M. (2021). Doslidzhennia rezhymiv ushchilnennia lehkobetonnykh sumishei na udarno-vibratsiinii ustanovtsi [Research of compaction modes of lightweight concrete mixtures on an impact-vibration unit]. In *Zbirnyk materialiv III Vseukrainskoi studentskoi naukovo-praktychnoi konferentsii “Dosvid vprovadzhennia u navchalnyi protses suchasnykh komp'uternykh tekhnolohii” – Proceedings of the 3rd All-Ukrainian Student Scientific-Practical Conference “Experience of Implementing Modern Computer Technologies in the Educational Process”* (pp. 107–109). Kropyvnytskyi, Ukraine: ЦНТУ. [in Ukrainian].

**Автор:** АНИЩЕНКО Анна Ігорівна,  
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій,  
Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова  
Anna ANISHCHENKO,  
PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv  
E-mail – [aanishchenko@ukr.net](mailto:aanishchenko@ukr.net),  
ID ORCID: 0000-0002-3411-0385

**Автор:** БЛАЖКО Володимир Володимирович,  
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій,

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова  
Vladimir BLAZHKO,  
PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv  
E-mail – [blazhko.vladimir@kname.edu.ua](mailto:blazhko.vladimir@kname.edu.ua),  
ID ORCID: /0000-0002-5649-9379

**Автор:** БУГРИМЕНКО Микола Юрійович,  
Здобувач вищої освіти другого (магістерського) рівня освіти,  
Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова  
Mykola BUHRYMENKO,  
A student of higher education of the second (master's) level of education,  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv  
E-mail – [Mykola.buhrymenko@kname.edu.ua](mailto:Mykola.buhrymenko@kname.edu.ua)  
ID ORCID: 0000-0002-3370-0535

**Автор:** КАЛІЄНІЧ Дар'я Сергіївна,  
Здобувач вищої освіти першого (бакалаврського) рівня освіти,  
Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова  
Darya KALIENICH,  
A student of higher education of the second (master's) level of education,  
O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv  
E-mail – [darya.kalienich@kname.edu.ua](mailto:darya.kalienich@kname.edu.ua)  
ID ORCID: 0009-0002-5351-7495

**Автор:** ВЕДМІДЬ Василь Васильович,  
аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки,  
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
VEDMID Vasyly,  
Department of industrial mechanical engineering and mechatronics  
National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»  
E-mail – [vvedmyd@gmail.com](mailto:vvedmyd@gmail.com)  
ID ORCID: 0000-0003-1514-1212

## COMPREHENSIVE APPROACH TO THE PRODUCTION OF CONCRETE BLOCKS FOR MODULAR CONSTRUCTION

A. Anishchenko<sup>1</sup>, V. Blazhko<sup>1</sup>, M. Buhrymenko<sup>1</sup>, B. Kalienich<sup>1</sup>, V. Vedmid<sup>2</sup>

<sup>1</sup> O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

<sup>2</sup> National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

*This article presents an in-depth investigation into the development and application of concrete interlocking blocks designed for modular construction, with a particular focus on optimizing the compaction process of the*

---

concrete mixture. The study explores the technological, mechanical, and operational aspects of using interlocking modular units, emphasizing their relevance in rapid-deployment construction, emergency infrastructure, and environmentally responsible building practices.

A key innovation highlighted in this research is the application of a combined vibration loading system for compaction, involving simultaneous vertical vibration and impact-induced pressure. This method significantly improves the internal homogeneity, mechanical strength, and surface quality of the formed blocks. The research introduces a dynamic multi-mass model of the “vibration platform – concrete medium – loading device” system that includes elastic-plastic-viscous properties of the concrete mixture, damping behavior, and impulsive interactions between moving components. The behavior of the system under harmonic and shock excitation is analyzed using a system of differential equations that consider both internal damping forces and stiffness parameters, providing a detailed representation of the compaction dynamics.

Furthermore, a wave propagation model based on the Kelvin–Voigt viscoelastic framework is implemented to simulate the distribution of stress and deformation throughout the concrete layer during vibration. Boundary conditions are established at the contact surfaces of the formwork and the upper free surface of the mixture. The model allows for accurate prediction of stress evolution and density changes as a function of compaction time, vibration intensity, and material properties.

The study also proposes an energy-based approach for estimating the effectiveness of compaction, integrating the energy input from vibration and loading mechanisms to evaluate the final compaction quality. This allows the identification of optimal operating parameters and the reduction of air voids in the structure.

In addition, the article presents a detailed concept for an optimized production line for the manufacturing of modular concrete blocks. This production system is designed to support high-precision geometry replication through the use of steel forms with replaceable inserts, enabling rapid adaptation to various block designs. The modularity of the formwork system enhances flexibility, allowing manufacturers to meet diverse construction needs without extensive retooling. The production line integrates concrete preparation, filling, compaction with an active loading system, thermal treatment, and stacking of finished elements.

The study concludes that the proposed technological approach ensures consistent quality, reduced energy consumption, and minimized labor intensity. The system's adaptability is particularly advantageous in modern construction scenarios that require rapid assembly, material reuse, and structural reliability. Future research should focus on refining the dynamic parameters of the compaction system, incorporating real-time control systems, and extending the model to other lightweight concrete types used in modular and emergency construction.

**Keywords:** concrete interlocking blocks, compaction, vibrations, loading device, modular construction, mathematical modeling, damping, energy efficiency.