

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

УДК 666.97.033.16(043.3)

ВЕДМІДЬ ВАСИЛЬ ВАСИЛЬОВИЧ

ДИСЕРТАЦІЯ

**РОЗРОБЛЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО КОМБІНОВАНОГО
ІМПУЛЬСНО-ВІБРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ
ФОРМУВАННЯ СТІНОВИХ ПАНЕЛЕЙ**

Спеціальність 133 – «Галузеве машинобудування»
Галузь знань 13 – «Механічна інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії
Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело.



Василь ВЕДМІДЬ

Науковий керівник –
Нестеренко Микола Миколайович,
кандидат технічних наук, доцент

Полтава - 2025

АНОТАЦІЯ

Ведмідь В. В. Розроблення вискоєфективного комбінованого імпульсно-вібраційного обладнання для формування стінових панелей. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – Галузеве машинобудування. Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Полтава, 2025.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-технічної проблеми підвищення ефективності процесу ущільнення бетонних сумішей при формуванні стінових панелей за рахунок розроблення нового типу вібраційного обладнання з комбінованим імпульсно-гармонічним режимом коливань. Актуальність роботи зумовлена необхідністю підвищення продуктивності й якості бетонних виробів в умовах післявоєнного відновлення будівництва, а також недосконалістю традиційних технологій ущільнення, які не забезпечують однорідність структури та енергоефективність процесу.

У першому розділі виконано огляд існуючих конструкцій вібраційного обладнання, визначено основні недоліки традиційних систем ущільнення та обґрунтовано доцільність застосування комбінованих коливань. Визначено мету дослідження – підвищення ефективності ущільнення бетонної суміші шляхом створення імпульсно-вібраційної установки нового типу.

У другому розділі розроблено математичну модель системи «вібраційна установка – бетонна суміш – форма», яка враховує хвильову природу коливань, демпфування, в'язко-пластичні властивості середовища та резонансні ефекти. Отримано аналітичні залежності для визначення оптимальних параметрів ущільнення.

У третьому розділі описано конструкцію експериментальної установки, що поєднує горизонтальні вібрації та вертикальні імпульси

через пружно-інерційний привантажувач. Проведено експериментальні дослідження ущільнення легких бетонів (арболіту, полістиролбетону). Встановлено підвищення щільності на 5–7%, зниження пористості на 1,2–1,5% і підвищення однорідності суміші.

У четвертому розділі подано методику проектування установок із комбінованим режимом коливань, наведено рекомендації для впровадження технології у виробництво. Розроблену установку використано як лабораторний стенд і впроваджено у навчальний процес.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у:

- вперше запропоновано комбінований просторовий режим ущільнення бетонної суміші з використанням імпульсно-вібраційної дії, який поєднує переваги гармонічного та ударного збудження для формування великогабаритних стінових панелей;

- встановлено механізм впливу енерго-кінетичних характеристик імпульсно-вібраційного впливу (частоти, амплітуди, тривалості імпульсу, фази зсуву) на ефективність ущільнення бетонної суміші з урахуванням її структурно-реологічних характеристик;

- розроблено механізм динамічної взаємодії системи «вібраційна установка – бетонна суміш – форма», яка враховує хвильову природу збудження та ефекти внутрішнього демпфування середовища;

- вперше встановлено аналітичні залежності для визначення раціональних параметрів імпульсно-вібраційного ущільнення, що забезпечують мінімальне енергоспоживання при збереженні високої якості готових виробів;

- удосконалено методику оцінювання ефективності ущільнення на основі аналізу релаксаційних характеристик бетонної суміші та фазового зсуву в системі «навантаження – деформація»;

- експериментально підтверджено ефективність застосування пружно-інерційних привантажувачів у складі комбінованої установки для ущільнення легких бетонів, зокрема арболіту та полістиролбетону.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в тому, що автором отримано нові науково обґрунтовані результати, які стали основою для створення високоефективного комбінованого імпульсно-вібраційного обладнання, здатного забезпечити рівномірне ущільнення бетонних сумішей різної жорсткості, зокрема легких бетонів, при зниженому енергоспоживанні та високій швидкості формування виробів.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблено інженерну методику вибору параметрів ущільнення із врахуванням хвильових і резонансних ефектів, а також розрахункову модель для проектування вібраційних машин нового покоління. Запропонована установка забезпечує скорочення циклу формування на 20–25%, зниження питомих енерговитрат на 10–15%, покращення рівномірності ущільнення та збільшення щільності виробу до 7%.

Результати дисертаційної роботи реалізовано у вигляді дослідного зразка комбінованої установки для ущільнення стінових панелей, яка була впроваджена у навчально-дослідну лабораторію кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Обладнання використовується для проведення лабораторних занять, підготовки кваліфікаційних робіт і виконання наукових досліджень.

Розроблене рішення рекомендовано до впровадження у виробництво, зокрема в умовах мобільних або децентралізованих майданчиків, що особливо актуально для потреб швидкомонтованого будівництва у відновлювальний період. Очікуваний техніко-економічний ефект від впровадження полягає в зменшенні вартості виготовлення виробів, підвищенні їх якості та зменшенні браку, що сумарно може дати економію понад 150 000 грн на кожні 1000 м² формованих панелей.

Отримані науково-технічні результати впроваджено у навчальний процес в курсах «Технічні основи створення машин» та «Експериментальні методи досліджень у інженерній механіці», що

викладаються студентам другого рівня вищої освіти за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування» у Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

Ключові слова: імпульсно-вібраційне ущільнення, вібрація, вібраційна машина, ущільнення, переміщення, стінові панелі, легкі бетони, комбіноване коливання, хвильова модель, динаміка бетонного середовища, полістиролбетон, пружно-інерційне привантаження, привантажувач, енергоефективність, технологічний цикл, експериментальна установка.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ

Праці, які відображають основні наукові результати дисертації
*Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових
 видань України категорії «Б» :*

1. Nesterenko M. M., **Vedmid V. V.** Movement of air voids in lightweight concrete mixtures during vibration compaction. System technologies. – 2025. – Т. 3, № 158. – С. 201–208. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-158-2025-20> (*Отримав залежності швидкості дрейфу бульбашок від параметрів вібрації та довів переваги комбінованого коливального збудження*).

2. Reasoning of the expediency of using vibration supports with variable parameters / O. Sheka, A. Yakovenko, **V. Vedmid** // Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво = Academic journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering / голов. ред. С.Ф. Пічугін. – Полтава : Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2022. – Вип. 2 (59). – С. 27–34. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.59.3096> <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14825> (*Проведення досліджень та аналіз даних*)

3. Нестеренко М.М., **Ведмідь В.В.** Теоретичні положення та аналіз робочого процесу ущільнення бетонних сумішей. Техніка

будівництва. – 2025. – № (42). – С. 4–13. <https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0501> <http://tehbud.knuba.edu.ua/article/view/331978/320980> (Зробив теоретичне моделювання впливу вібрацій на бетонну суміш, провів дослідження та аналіз даних)

4. Nesterenko M. M., **Vedmid V. V.** Дослідження впливу вертикальних вібраційних режимів на взаємодію робочого органу віброплощадки з бетонною сумішшю. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. – 2025. – No. 2. – P. 182–188. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.2.23> (Розробив математичну модель та провів експеримент).

5. Аніщенко А.І. Комплексний підхід до виробництва та ущільнення бетонних блоків для модульного будівництва / А.І. Аніщенко, М.Ю. Бугрименко, Д.С. Каленіч, В.В. Блажко, **В.В. Ведмідь** // Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова/ 2025 – №112. – 179–187. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.22> (здійснив комплексний науково-технічний аналіз і розроблення комбінованої вібраційної системи ущільнення арболітової суміші з активним привантажувачем, обґрунтував вплив конструктивних і режимних параметрів на процес ущільнення)

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. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-160-2025-19> . <https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st/article/view/2237> (Проводив ущільнення зразків стінових панелей, провів випробування міцності на стиск зразків, виконав побудову поверхонь відгуків у вигляді графічного зображення тривимірних поверхонь).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. Нестеренко М.М. Використання імпульсного вібраційного привантажувача для доущільнення бетонних сумішей / М.М. Нестеренко,

О.І. Панфілов, М.О. Пирлик, **В.В. Ведмідь** [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.
<https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/16748>

8. Назаренко І.І. Вібраційне обладнання для формування стінових панелей / І.І. Назаренко, М.М. Нестеренко, Т.М. Нестеренко, **В.В. Ведмідь** // Енергоощадні машини і технології : матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф., 17-19 трав. 2022 р. – К. : КНУБА, 2022. – С. 12–14.
<https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/11137>

9. Нестеренко М.М. Дослідження динаміки ущільнення полістиролбетону при вертикальних гармонійних коливаннях віброплощадки / М.М. Нестеренко, О.І. Панфілов, **В.В. Ведмідь**, М.О. Пирлик // Тези 77-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів (16 травня – 22 травня 2025 р.). – Полтава : Нац. ун-т ім. Ю. Кондратюка, 2025. – Т. 1. – С. 246-247.
<https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/18771>

10. Назаренко І.І. Дослідження напружено-деформованого стану складових та формоутворюючих елементів вібраційних машин із мінімізацією металоємності / І.І. Назаренко, М.М. Нестеренко, Т.М. Нестеренко, **В.В. Ведмідь** // Тези за матеріалами X Міжнародної науково-практичної конференції «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд» (Харків, 26 – 27 жовтня 2021р.). – Х. : ХНУБА, 2021. – С. 75-76. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/10090>

11. Назаренко І.І. Лабораторний вібромайданчик зі змінно направленими коливаннями для ущільнення бетонних сумішей / І.І. Назаренко, М.М. Нестеренко, Т.М. Нестеренко, **В.В. Ведмідь** // Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного часу (CSCS-2022) : зб. наук. пр. за матеріалами XIV Міжнар. наук.- техн.

конф. – Полтава : Нац. ун-т імені Юрія Кондратюка, 2022. – С. 84–86.
<https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/11135>

12. Назаренко І.І. Оцінка ефективності вібраційного ущільнення бетонних сумішей / І.І. Назаренко, В.С. Слюсар, М.М. Нестеренко, **В.В. Ведмідь** // Академічна й університетська наука: результати та перспективи : зб. наук. пр. XVII Міжнар. наук.–практ. конф., 12 – 13 груд. 2024 р. – Полтава: Нац. ун-т ім. Ю. Кондратюка, 2024. – С. 102–104.
<https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/17822>

13. Нестеренко М.М. 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.
<https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/12843>

14. Мороз В.М. Підвищення ефективності процесу вібраційного ущільнення великогабаритних залізобетонних виробів / В.М. Мороз; наук. кер.: М.М. Нестеренко, **В.В. Ведмідь** // Матеріали 77-ї студентської наукової конференції Харківського національного університету будівництва та архітектури : тези доп. – Х. : ХНУБА, 2022. – С. 282–283.
<https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/11128>

15. Назаренко І.І. Розроблення високоефективного вібраційного обладнання для формування залізобетонних стінових панелей / І.І. Назаренко, М.М. Нестеренко, **В.В. Ведмідь** // Тези 74-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, 25 квітня–21 травня 2022 р.). – Полтава : Національний університет імені Юрія Кондратюка, 2022. – Т. 1. – С. 152–153. <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/10893>

16. Назаренко І.І. Структурний та параметричний синтез вібраційних машин / І.І. Назаренко, М.М. Нестеренко, О.В. Орисенко, **В.В. Ведмідь** // Академічна й університетська наука: результати та перспективи : зб. наук. пр. XIV Міжнар. наук.-практ. конф. 09 груд. 2021 р. – Полтава : Нац. ун-т імені Юрія Кондратюка, 2021. – С. 282–285 с.
<https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/10096>

ABSTRACT

Vedmid V. V. Engineering of high-efficiency combined impulse-vibration equipment for the formation of wall panels. – As manuscript.

Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Specialty 133 – Industrial Engineering.

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». Poltava, 2025.

The dissertation is devoted to solving a current scientific and technical problem of increasing the efficiency of concrete mix compaction processes during the formation of wall panels by developing a new type of vibration equipment with a combined impulse-harmonic oscillation mode. The relevance of the work is due to the need to increase the productivity and quality of concrete products in the context of post-war construction recovery, as well as the imperfections of traditional compaction technologies, which do not ensure uniform structure and energy efficiency of the process.

Chapter 1 presents a review of existing designs of vibration equipment, identifies the main shortcomings of conventional compaction systems, and substantiates the feasibility of applying combined oscillations. The aim of the study is defined as increasing the efficiency of concrete mix compaction by creating a new-type impulse-vibration machine.

Chapter 2 develops a mathematical model of the system "vibration unit – concrete mix – mold," which accounts for wave nature of oscillations, damping, visco-plastic properties of the medium, and resonance effects. Analytical dependencies are derived to determine optimal compaction parameters.

Chapter 3 describes the design of the experimental unit, which combines horizontal vibrations and vertical impulses via an elastic-inertial load system. Experimental studies on the compaction of lightweight concretes (woodcrete, polystyrene concrete) were conducted. The results showed a 5–7% increase in

density, a 1.2–1.5% reduction in porosity, and improved homogeneity of the mixture.

Chapter 4 presents a methodology for designing machines with combined oscillation modes and provides recommendations for industrial implementation. The developed unit was used as a laboratory test rig and integrated into the educational process.

Scientific novelty of the obtained results includes:

- A combined mode of concrete mix compaction using impulse-vibration action is proposed for the first time, combining the advantages of harmonic and impact excitation for shaping large wall panels;
- The patterns of influence of impulse-vibration parameters (frequency, amplitude, impulse duration, phase shift) on the compaction rate of concrete mix were established, considering its structural and rheological characteristics;
- A mathematical model of dynamic interaction in the system "vibration unit – concrete mix – mold" was developed, accounting for wave excitation and internal damping effects;
- Analytical expressions were derived to determine optimal parameters of impulse-vibration compaction ensuring minimal energy consumption while maintaining high product quality;
- The efficiency of using elastic-inertial load systems as part of the combined compaction setup for lightweight concretes, including woodcrete and polystyrene concrete, was experimentally confirmed;
- The method for evaluating compaction efficiency was improved based on the analysis of relaxation characteristics of the concrete mix and phase shift in the "load – deformation" system.

The practical value of the dissertation lies in the newly substantiated results, which became the foundation for creating high-efficiency combined impulse-vibration equipment capable of uniformly compacting concrete mixtures of varying stiffness, especially lightweight concrete, with reduced energy consumption and high forming speed.

Based on theoretical and experimental studies, an engineering methodology was developed for selecting compaction parameters considering wave and resonance effects, along with a calculation model for designing new-generation vibration equipment. The proposed system ensures a 20–25% reduction in forming time, a 10–15% reduction in specific energy consumption, improved compaction uniformity, and up to 7% increased product density.

The research results were implemented in a prototype of the combined system for wall panel compaction, introduced in the educational and research laboratory of the Department of Industrial Engineering and Mechatronics at the National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». The equipment is used for laboratory training, thesis preparation, and scientific research.

The proposed solution is recommended for industrial implementation, particularly on mobile or decentralized sites, which is especially relevant for rapid construction in recovery periods. The expected techno-economic effect includes cost reduction in product manufacturing, improved quality, and lower rejection rates, potentially saving over 150,000 UAH per 1000 m² of panels formed.

The scientific and technical results are also implemented in the educational process through courses such as «Technical Foundations of Machine Design» and «Experimental Methods in Engineering Mechanics» taught to master's students in specialty 133 «Industrial Engineering» at the National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic».

Keywords: concrete mixture, impulse-vibration compaction, vibration, vibration machine, vibrator, excitation force, compaction, displacement, wall panels, lightweight concrete, combined oscillation, wave model, dynamics of the concrete medium, polystyrene concrete, elastic-inertial loading, compaction device, energy efficiency, experimental setup.

ЗМІСТ

ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	26
1.1.Теоретичні основи вібраційного ущільнення при формуванні стінових панелей	26
1.2.Динамічні особливості ущільнення бетонних сумішей та хвильові явища при формуванні панелей.....	28
1.3.Реологічні особливості ущільнення бетонних сумішей і роль повітряної фази у формуванні структури	30
1.4.Альтернативні підходи до моделювання бетонної суміші у процесі віброущільнення.....	32
1.5.Реологічне моделювання бетонних сумішей для визначення оптимальних режимів ущільнення	34
1.6 Огляд конструкцій і оцінка параметрів формувальних площадок для виготовлення будівельних виробів вібраційними методами.....	39
1.7 Висновки з розділу, мета та задачі дослідження.	58
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ІМПУЛЬСНО-ВІБРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ УЩІЛЬНЕННЯ СТІНОВИХ ПАНЕЛЕЙ ІЗ ВРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ КОЛИВАЛЬНИХ ЕФЕКТІВ	60
2.1. Передумови, припущення і постановка задачі	60
2.2. Вибір оптимальної компоновки вібраційної установки для ущільнення стінових панелей із легких сумішей	61
2.3 Релаксаційні явища при ущільненні арболітових та полістиролбетонних сумішей.	76
2.4 Дослідження хвильових процесів, що виникають при ущільненні легкобетонних розчинів.....	80

2.5 Особливості хвильових процесів в арболітових сумішах при ущільненні.....	84
2.5.1 Фізичні особливості поширення імпульсів	85
2.5.2 Розповсюдження коливань в арболітовій суміші від імпульсних джерел коливань та горизонтальної вібрації.....	86
2.5.3 Характеристика горизонтального вібраційного поля	88
2.5.4 Явище інтерференції і його вплив на формування хвильового поля в арболітовій суміші.....	89
2.5.4.1 Математичне представлення з урахуванням інтерференції	90
2.5.4.2 Практичне значення інтерференції для ущільнення	91
2.6 Аналіз спектрів коливань імпульсних режимів ущільнення для арболіту та полістиролбетону	92
2.7 Динаміка імпульсно-вібраційних машин	97
2.7.1 Безрозмірна форма рівнянь руху ударно-вібраційної системи ...	100
2.7.2 Енергетичні та кінематичні характеристики ударно-вібраційної системи	101
2.7.3 Енергія пружної деформації обмежувача та її втрати.....	102
2.7.4 Енергетичне навантаження на привід системи.....	103
2.8 Визначення законів руху та напружень в шарі бетонної суміші при кінематичному збудженні коливань.....	104
2.9 Визначення напружень у бетонній суміші, що ущільнюється.....	108
2.10 Аналіз та оцінка отриманих результатів аналітичних досліджень.	110
2.11 Висновки з розділу 2.....	113
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ ІМПУЛЬСНО-ВІБРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ.....	115
3.1. Основні вихідні положення та задачі досліджень.	115

3.2	Опис конструкції лабораторної установки для проведення експериментальних досліджень та особливості розрахунку	115
3.2.1	Визначення основних параметрів приводного кулачкового механізму.....	118
3.2.2	Прототип установки та дослідження пружних опор	126
3.3.	Аналіз режимів ущільнення легкобетонних сумішей на комбінованій імпульсно-вібраційній установці з використанням методу планування експерименту	129
3.3.1.	Методика планування експериментальних досліджень	129
3.3.2	Методика проведення експериментальних досліджень.....	135
3.3.3	Статистична обробка експериментальних даних	141
3.3.4	Оптимізація результатів експериментальних досліджень	155
3.4	Висновки з розділу 3	157
РОЗДІЛ 4 ІНЖЕНЕРНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ.....		159
4.1.	Техніко-технологічне обґрунтування режимів ущільнення легких бетонів розробленою комбіновано імпульсно-вібраційною установкою ...	159
4.2.	Методика технічного розрахунку комбінованої імпульсно-вібраційної установки з двокомпонентним привантажувачем для ущільнення виробів із легких бетонів.....	161
4.3	Результати виробничих випробувань дослідного зразка комбінованої імпульсно-вібраційної установки для ущільнення легкобетонних сумішей.....	167
4.4	Рекомендації щодо подальшого вдосконалення конструкції установки для ущільнення легкобетонних виробів	169
4.5	Розрахунок економічної ефективності впровадження комбінованої імпульсно-вібраційної установки	171

4.7. Висновки з розділу 4.....	175
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	176
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	178
ДОДАТОК А ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ	198
ДОДАТОК Б СТІНОВІ ПАНЕЛІ ВИГОТОВЛЕНІ ЗА ДОПОМОГОЮ ЛАБОРАТОРНОГО КОМБІНОВАНОГО ІМПУЛЬСНО-ВІБРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ.....	200

ВСТУП

У післявоєнний період відбудови критично зруйнованої інфраструктури України, особливого значення набуває швидке та якісне спорудження житлових і громадських будівель. У цих умовах пріоритетним напрямом розвитку будівельної галузі є підвищення ефективності технологій виробництва бетонних виробів, зокрема стінових панелей, що є основою сучасного каркасно-панельного будівництва. Значне зростання потреб у збірному залізобетоні на фоні дефіциту ресурсів та необхідності швидкої реалізації будівельних проєктів обумовлює актуальність розроблення високоефективного вібраційного обладнання для його формування.

Протягом останніх десяти років (2015–2025 рр.) спостерігається тенденція до модернізації заводських ліній виробництва збірного залізобетону. За даними Державної служби статистики України та галузевих аналітичних центрів, з 2022 року обсяги виробництва залізобетонних конструкцій почали зростати на тлі урядових програм з відновлення зруйнованого житла, мостів, шкіл та медичних закладів. У 2023 році сукупний обсяг виробництва збірного залізобетону перевищив 10 млн м³, що є показником активізації будівельної індустрії навіть в умовах обмеженого фінансування та логістичних викликів.

Переважає більшість бетонних виробів в Україні формується за допомогою потоково-агрегатних ліній, що забезпечують близько 60% загального випуску, тоді як стендове формування становить приблизно 25%, а частка конвеєрних технологій зросла до 15% завдяки автоматизації та цифровізації виробництва [74]. Водночас сучасні виклики вимагають не лише кількісного нарощування, а й підвищення якості виробів, зниження енерговитрат та екологічного впливу.

Одним із ключових етапів виробництва бетонних елементів є ущільнення бетонної суміші у формі. Саме якість ущільнення визначає кінцеві характеристики панелі – щільність, міцність, морозостійкість та водонепроникність. Найбільш поширеним і технологічно обґрунтованим

методом ущільнення є вібраційне ущільнення, яке використовується приблизно у 80–85% випадків формування бетонних виробів [76]. Проте традиційне віброустаткування, розроблене ще в 1970–1990-х роках, не повною мірою відповідає сучасним вимогам до енергоефективності, керованості процесу та адаптації до легких і надлегких бетонів нового покоління (зокрема, пінобетону, полімербетону, геополімерного бетону тощо).

У цьому контексті розроблення високоефективного вібраційного обладнання, яке забезпечує не лише глибоке ущільнення бетонної суміші, але й гнучкість налаштувань відповідно до типу суміші, геометрії форми та заданих режимів ущільнення, є пріоритетним напрямком технічного прогресу у виробництві збірного залізобетону [81]. Особливо актуальним це завдання є для виробництва великогабаритних стінових панелей, що вимагають рівномірного ущільнення по всьому об'єму, враховуючи динамічні втрати енергії, а також хвильові процеси передачі зусиль в бетонному тілі.

Актуальність теми. У сучасних умовах та післявоєнної відбудови України, коли постає нагальна потреба у швидкому спорудженні великої кількості житлових, громадських та інфраструктурних об'єктів, особливого значення набуває застосування індустріальних методів будівництва, зокрема каркасно-блочного та панельно-блочного. Ці методи дозволяють забезпечити високу швидкість монтажу будівель, уніфікацію елементів та економію трудових і матеріальних ресурсів. Як огорожувальні конструкції у таких спорудах широко використовуються блоки з легких бетонів, які мають відмінні теплоізоляційні та звукоізоляційні характеристики, що відповідає вимогам сучасного енергоефективного будівництва.

Проте формування таких бетонних виробів, особливо в умовах децентралізованого виробництва або на тимчасових виробничих майданчиках, переважно здійснюється на устаткуванні, виготовленому локально підприємствами або невеликими машинобудівними

організаціями. Відсутність стандартизованих технічних підходів до проєктування та виготовлення цього обладнання, а також обмежене врахування механіки взаємодії бетонної суміші з формою та робочим органом машини призводить до виготовлення виробів, які не завжди відповідають нормативним вимогам за міцністю, тріщиностійкістю, морозостійкістю та геометричною точністю.

Особливої уваги потребують методи ущільнення бетонної суміші, оскільки саме на цьому етапі формується структура матеріалу, що визначає його експлуатаційні характеристики. Найбільш ефективними для ущільнення жорстких і легких бетонів є вібраційні машини, зокрема з ударно-вібраційною дією. Такі машини забезпечують інтенсивне ущільнення бетонної суміші навіть при високій її жорсткості, дозволяють знімати опалубку відразу після формування, що суттєво підвищує продуктивність, знижує витрати на оснащення та сприяє скороченню витрат енергії під час подальшої термообробки.

Проте на сьогодні недостатньо вивченими залишаються питання оптимізації параметрів вібраційного впливу з урахуванням фізико-механічних властивостей бетонної суміші, геометрії форми та характеристик робочого органа. Відсутній науково обґрунтований підхід до оцінки ефективності процесу ущільнення, що базувався б на комплексному врахуванні динаміки системи «вібраційна машина – бетонне середовище». Саме тому дослідження процесів взаємодії робочого органа вібраційної машини з бетонною сумішшю при формуванні огорожувальних конструкцій із легких бетонів є науково і практично актуальним завданням.

Розв'язання цієї проблеми можливе шляхом створення нового покоління вібраційного обладнання з адаптивним керуванням, що має науково обґрунтовані технологічні параметри ущільнення. Такі машини повинні забезпечувати стабільно високу якість готової продукції, економічність у споживанні ресурсів та відповідність сучасним вимогам до індустріального будівництва.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота відповідає тематиці кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки та виконувалася у відповідності до напрямків і завдань науково – технічних програм Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» у складі держбюджетних науково-дослідницьких тем: «Створення ефективного малогабаритного обладнання для комплексної механізації робіт в умовах будівельного майданчика» (номери державної реєстрації 0115U001078), «Дослідження і розроблення інженерних методів розрахунку опору руйнуванню і деформуванню бетонних, залізобетонних, кам'яних і армокам'яних елементів, що зазнають неоднорідний напружено-деформований стан при різному характері навантаження та впливів» (номер державної реєстрації 0117U003248), що затверджені Міністерством освіти і науки України.

Мета і задачі дослідження. Метою даної роботи є створення та дослідження високоефективного комбінованого імпульсно-вібраційного обладнання для формування стінових панелей із заданими експлуатаційними характеристиками, що забезпечує рівномірне ущільнення бетонної суміші завдяки керованому поєднанню гармонічних та імпульсних коливань. Для досягнення означеної мети в роботі вирішувалися наступні задачі:

- Провести аналіз існуючих конструкцій вібраційних машин та обладнання для ущільнення бетонних сумішей.
- Обґрунтувати доцільність використання комбінованого (гармонічного - імпульсного) режиму вібраційного впливу для формування виробів із легких і жорстких бетонів.
- Розробити математичну модель динамічної взаємодії елементів установки з бетонною сумішшю з урахуванням хвильових ефектів та реологічних властивостей середовища.
- Встановити залежності між основними параметрами коливального збудження та показниками ущільнення бетонної суміші.

- Розробити інженерну методику визначення оптимальних режимів ущільнення для заданих типів бетонів.
- Спроектувати та виготовити дослідний зразок імпульсно-вібраційної установки.
- Провести експериментальні дослідження процесу ущільнення бетонної суміші в новій установці та порівняти результати з традиційними методами.
- Надати рекомендації щодо впровадження результатів дослідження у практику виробництва стінових панелей.

Об'єкт дослідження – процес ущільнення стінових панелей з використанням імпульсно-вібраційного ущільнення.

Предмет дослідження – комбіноване імпульсно-вібраційне обладнання та режими дії на бетонну суміш у процесі ущільнення.

Методи дослідження.

Методи дослідження ґрунтуються на положеннях класичної теорії коливань механічних систем, механіки суцільних середовищ, теорії хвильових процесів і реології багатофазних середовищ. Для побудови математичної моделі динамічної взаємодії імпульсно-вібраційного обладнання з бетонною сумішшю застосовано диференціальні рівняння коливального руху з урахуванням демпфування та пружно-в'язких властивостей середовища.

Аналіз моделей здійснювався аналітичними та чисельно-аналітичними методами. Розрахунок параметрів коливань, амплітудно-частотної характеристики та внутрішніх напружень проводився з урахуванням умов хвильової резонансної взаємодії.

Експериментальні дослідження проводилися на спеціально створеній лабораторній установці за методикою математичного планування експерименту. Обробка результатів включала застосування методів дисперсійного аналізу, регресійного моделювання, оцінки адекватності та критеріїв достовірності згідно з положеннями математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

- вперше запропоновано комбінований режим ущільнення бетонної суміші з використанням імпульсно-вібраційної дії, який поєднує переваги гармонічного та ударного збудження для формування великогабаритних стінових панелей;
- встановлено закономірності впливу параметрів імпульсно-вібраційного впливу (частоти, амплітуди, тривалості імпульсу, фази зсуву) на швидкість ущільнення бетонної суміші з урахуванням її структурно-реологічних характеристик;
- розроблено математичну модель динамічної взаємодії системи «вібраційна установка – бетонна суміш – форма», яка враховує хвильову природу збудження та ефекти внутрішнього демпфування середовища;
- отримано аналітичні залежності для визначення оптимальних параметрів імпульсно-вібраційного ущільнення, що забезпечують мінімальне енергоспоживання при збереженні високої якості готових виробів;
- експериментально підтверджено ефективність застосування пружно-інерційних привантажувачів у складі комбінованої установки для ущільнення легких бетонів, зокрема арболіту та полістиролбетону;
- удосконалено методику оцінювання ефективності ущільнення на основі аналізу релаксаційних характеристик бетонної суміші та фазового зсуву в системі «навантаження – деформація».

Практичне значення одержаних результатів полягає у:

- розробленні науково обґрунтованої методики інженерного розрахунку конструктивних і динамічних параметрів комбінованих імпульсно-вібраційних установок для ущільнення бетонних сумішей із заданими характеристиками;
- створенні експериментально-дослідного зразка імпульсно-вібраційної установки для формування великогабаритних стінових панелей

із легких бетонів, яка забезпечує рівномірне ущільнення по висоті форми та скорочення тривалості формувального циклу на 20–25%;

- підвищенні технологічної ефективності процесу ущільнення за рахунок використання резонансно-імпульсного режиму, що дозволяє зменшити енергоспоживання та покращити однорідність структури бетонної суміші;

- впровадженні результатів дослідження у навчальний процес Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» та на кафедрі галузевого машинобудування та мехатроніки;

- використанні розробленої установки як базового стенду для подальших експериментальних досліджень впливу параметрів коливань на формування виробів із різних типів легких бетонів (арболіт, полістиролбетон тощо).

Особистий внесок автора. Результати досліджень, викладені в дисертації, отримані автором самостійно. У наукових публікаціях, виконаних у співавторстві, особистий внесок здобувача полягає у: – [26, 30, 95] – проведенні теоретичних досліджень динаміки взаємодії робочого органа з бетонною сумішшю, побудові математичних моделей хвильових процесів, розрахунках резонансних режимів і фазових зсувів; – [73, 85, 89, 105] проведено аналіз конструкцій вібраційних привантажувачів, виконано оцінку ефективності ущільнення великогабаритних виробів, здійснено ескізне проектування вібраційного обладнання для формування стінових панелей та обґрунтовано параметричний синтез елементів вібраційної машини. – [35, 49, 97] – розробленні технічної концепції комбінованої імпульсно-вібраційної установки, виконанні розрахунків її основних параметрів, побудові 3D-моделі та конструюванні дослідного зразка; – [43, 86] – організації та проведенні експериментальних досліджень, підготовці методик вимірювань, зборі та статистичній обробці експериментальних даних; – [87, 92, 103] – обґрунтуванні технічних рішень щодо форми для

формування стінових панелей, виборі матеріалів і параметрів ущільнення з урахуванням фізико-механічних властивостей бетонів; – [88] – виведенні формул для врахування впливу демпфуючих властивостей бетонного середовища на рух елементів установки, а також формулюванні аналітичних залежностей для оцінки ефективності ущільнення. – [49] – сплановано експеримент та проведено ущільнення зразків стінових панелей із використанням комбінованої установки, виконано випробування на міцність та побудовано поверхні відгуків у вигляді просторових графіків.

Апробація результатів дослідження. Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідались та схвалені в період 2022–2025 рр. на таких наукових семінарах, конференціях та симпозіумах:

- X Міжнародна науково-практична конференція «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд» (м. Харків, 2021 р.);
- III Міжнародна науково-практична конференція «Енергоощадні машини і технології» (м. Київ, 2022 р.);
- XIV Міжнародна науково-технічна конференція «Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного часу (CSCS-2022)» (м. Полтава, 2022 р.);
- VI Всеукраїнська науково-технічна конференція «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки» (м. Полтава, 2023 р.);
- XVII Міжнародна науково-практична конференція «Академічна й університетська наука: результати та перспективи» (м. Полтава, 2024 р.);
- VII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки» (м. Полтава, 2024 р.);

- 77-ма наукова конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (м. Полтава, 2025 р.);
- Семінари кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (2023–2025 рр.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано **16 друкованих робіт**, які відображають її основний зміст, у тому числі:

- **6 статей** у наукових фахових виданнях, внесених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б»;
- **10 публікацій** у збірниках матеріалів і тез доповідей на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях.

РОЗДІЛ 1 СТАН ПРОБЛЕМИ І ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Теоретичні основи вібраційного ущільнення при формуванні стінових панелей

Одним із ключових процесів при виробництві стінових панелей є ущільнення бетонної суміші у формі, від якості якого залежить щільність, однорідність, міцність і довговічність готових виробів. В умовах масового будівництва, зокрема в період післявоєнної відбудови, особливого значення набуває створення високоефективного вібраційного обладнання, здатного забезпечити надійне формоутворення виробів із різних типів бетонних сумішей. Найбільш технологічно доцільним методом ущільнення залишається вібраційне формування, яке дозволяє керовано змінювати параметри впливу з урахуванням властивостей суміші та геометрії форми.

Протягом останніх десятиліть значний внесок у розвиток наукових основ вібраційного ущільнення бетонів зробили українські та закордонні дослідники, серед яких слід відзначити І.І. Назаренка [24, 74-76], Ю.С. Саленко [12, 69], О.Г. Маслова [12, 13, 70], М.П. Нестеренка [106, 105, 110, 114], О.В. Орісенка [123, 124, 126], Л.І. Сердюка [135, 136], М.П. Кузьмінець [142], М.М. Ручинський [18, 22, 75], О.П. Дєдов [17, 19, 75], В.Й. Сівка [138, 139], І.В. Кузьо [67], В.О. Повідайло [128], Z. Despotovic [5], J. Michalczyk [14, 15], D. J. Wagg [38], G. Luo [10, 11], Nguyen H. [32, 33], та інших [1, 7, 8, 34]. Їхні дослідження спрямовані на вивчення механіки взаємодії вібраційного поля з бетонною сумішшю, оптимізацію параметрів збудження, мінімізацію енергетичних витрат та підвищення якості ущільнення.

Формування бетонних виробів супроводжується двома основними технологічними процесами – ущільненням бетонної суміші та її формоутворенням. Ці процеси відбуваються одночасно та взаємопов'язано, а вібраційне обладнання забезпечує їх ефективне

протікання, особливо у випадку використання жорстких або легких бетонів.

Ущільнення бетонної суміші вібраційним методом можна умовно розділити на три стадії. На першій стадії суміш перебуває у структурно нестійкому стані з високою пористістю (до 30%) і неповним контактом зерен, що зумовлює переукладання частинок заповнювача під дією коливань. У другій стадії утворюється структура, коли заповнювач обволікається рідкою фазою, і суміш набуває плинності, що забезпечує рівномірне заповнення форми. Третя стадія є стадією компресійного ущільнення, на якій завершується процес видалення повітряних включень і досягається максимально можлива щільність матеріалу.

Особливої уваги вимагає ущільнення жорстких бетонних сумішей із низьким водоцементним співвідношенням. У таких випадках динамічний тиск і імпульсне навантаження від вібраційного приводу є основними засобами ущільнення, оскільки традиційне вібраційне збудження не забезпечує переходу суміші в плинний стан. Формування щільної структури відбувається шляхом зсуву, повороту і перекочування зерен, що потребує точного налаштування частоти, амплітуди та форми коливань.

У наукових працях [52, 66] процес ущільнення аналізується як з позицій корпускулярної моделі, яка розглядає суміш як динамічну систему твердих частинок, так і з феноменологічних позицій, що описують реологічну еволюцію середовища під впливом зовнішнього збудження. Ці підходи є основою для створення математичних моделей та цифрового моделювання процесів ущільнення, що активно впроваджується у сучасне інженерне проєктування формувального обладнання.

Таким чином, глибоке розуміння фізичних основ вібраційного ущільнення бетонних сумішей є критично важливим для розроблення сучасних вібраційних установок, які забезпечують високоякісне формування бетонних стінових панелей при зниженні енерговитрат та підвищенні технологічної гнучкості обладнання.

1.2. Динамічні особливості ущільнення бетонних сумішей та хвильові явища при формуванні панелей

Механізм ущільнення бетонної суміші доцільно розглядати як безперервний динамічний процес, що супроводжується поступовим переходом системи з початкового реологічного стану до кінцевого – ущільненого [76, 140]. Такий підхід дозволяє комплексно оцінювати динаміку перетворень структури матеріалу під впливом зовнішнього збудження, з урахуванням трансформації сил сухого тертя у в'язкі, появи пружних та дисипативних реакцій, а також механізмів зниження внутрішньої в'язкості суміші. Вивчення цих процесів має суттєве значення для встановлення раціональних режимів вібраційного навантаження, які забезпечують високу якість ущільнення бетонної маси та мінімізацію енергетичних витрат.

Для аналітичного опису процесів ущільнення доцільно застосовувати підходи, що сформовані в галузях механіки суцільних і сипучих середовищ, теорії пружності, коливань та акустики [56, 61]. Такий міждисциплінарний підхід дозволяє глибше зрозуміти взаємозв'язки між механічними характеристиками бетонної суміші, геометрією форми та динамічними параметрами вібраційного впливу.

Особливий науково-практичний інтерес становить вивчення поширення коливань у бетонній суміші в умовах імпульсного ущільнення [43, 53, 64]. Залежно від геометрії форми, консистенції бетонної суміші та її ступеня попереднього ущільнення, стовп матеріалу в формі здатен мати кілька власних частот коливань. Утворення резонансних режимів може призводити як до посилення ущільнення, так і до появи негативних ефектів – зокрема, розриву суцільності структури, утворення зон зниженого тиску або накопичення повітряних пор, що критично впливає на однорідність і якість формованих панелей.

Поширення гармонійних хвиль у межах бетонного середовища може викликати суперпозицію та інтерференцію, що в багатьох випадках не сприяє ефективному ущільненню через нерівномірний розподіл енергії коливань [69, 77]. Це знижує якість готових виробів, призводить до перевитрати цементу, виникнення внутрішніх напружень та, в окремих випадках, до вибракування елементів. Проте кероване використання інтерференційних явищ – зокрема в ударно-імпульсних режимах ущільнення – може бути ефективним засобом забезпечення однорідності структури бетонної суміші по всій висоті форми.

У практиці ущільнення одним із найпоширеніших показників є амплітуда коливань. Водночас, як показали дослідження українських науковців І.І. Назаренка, Ю.С. Саленко, та інших, орієнтація виключно на амплітуду не завжди є обґрунтованою [70, 75]. Дійсно визначальним є характер деформації середовища, тобто відносна деформація, яка визначає реальний напружено-деформований стан матеріалу. Саме від неї залежить утворення контактів між зернами заповнювача, зниження пористості та забезпечення рівномірності ущільнення.

Таким чином, для розроблення високоефективного вібраційного обладнання необхідно враховувати не лише кінематичні параметри збудження (частоту, амплітуду), але й структурно-реологічні характеристики суміші, геометричні резонансні ефекти, а також поширення й взаємодію хвиль у межах робочого об'єму форми. Комплексне вивчення цих процесів забезпечує наукову основу для проектування вібраційних установок нового покоління, здатних забезпечити однорідність, міцність і надійність бетонних стінових панелей в умовах індустріального та швидкокомтованого будівництва.

1.3. Реологічні особливості ущільнення бетонних сумішей і роль повітряної фази у формуванні структури

Одним із критично важливих чинників, що визначає якість структури бетону, є відносний рух часток заповнювача, який відбувається в процесі вібраційного ущільнення. Саме він забезпечує виштовхування повітряної фази, підвищення контактності між зернами та формування щільної, однорідної структури матеріалу. Проте традиційні методи вібраційного впливу часто не здатні забезпечити достатню інтенсивність взаємного переміщення часток, особливо у випадку жорстких бетонних сумішей або при ущільненні виробів великого об'єму [48, 73].

Розгляд процесу ущільнення доцільно здійснювати також з позицій видалення затисненого повітря – головного джерела пористості. Зниження вмісту повітря в бетоні навіть на 1% здатне підвищити міцність виробу на 5–8%, що підтверджено низкою експериментальних досліджень [**Ошибка! Источник ссылки не найден.**, 55]. Саме тому вивчення умов міграції повітряних включень у процесі переходу суміші до стану плинності дозволяє встановлювати оптимальні режими вібраційного ущільнення, особливо в зонах з ускладненим повітрообміном, наприклад у вертикальних стінках стінових панелей.

Особливо перспективним є застосування режимів коливань з імпульсним або турбулентним характером дії, які, на відміну від гармонійного вібраційного навантаження, сприяють глибшому перемішуванню частинок, утворенню локальних потоків, розриву в'язких зв'язків та ефективному видаленню повітря. Ці режими демонструють особливо високу ефективність при ущільненні бетонів з додаванням пластифікаторів, а також при бетонуванні великогабаритних елементів, що вимагають тривалого впливу і високої стабільності структури [70, 89]. Як наслідок, досягається не лише підвищена однорідність, але й покращується якість поверхонь виробів без додаткової обробки.

У науковій практиці реологічні характеристики бетонних сумішей дедалі частіше використовуються не лише для опису процесів ущільнення, а й для прогнозування кінетики тверднення, повзучості, корозійного руйнування та інших процесів, які виникають під дією тривалих навантажень або агресивних середовищ **[Ошибка! Источник ссылки не найден., 122]**. Основою таких досліджень є механічні моделі, що дозволяють узагальнювати поведінку складних багатофазних середовищ шляхом спрощення й абстрагування від другорядних властивостей.

У межах реологічного підходу бетонну суміш часто моделюють як в'язку рідину – найпростіший приклад якої є ньютонівська модель [135]. У цій моделі напруження пропорційне швидкості деформації, а коефіцієнт в'язкості визначається як тангенс кута нахилу прямої на графіку «напруження – швидкість деформації». Ця модель добре описує поведінку рухомих бетонів на етапі початкового ущільнення, особливо коли суміш перебуває у стані плинності.

Однак така лінійна модель не враховує низку важливих особливостей реального процесу ущільнення. Зокрема, вона не відображає:

- залишкову кількість повітря, що впливає на пружні властивості суміші;
- локальні флуктуації густини внаслідок згасання енергії хвиль;
- зростання ефективної в'язкості із віддаленням від джерела коливань;
- турбулентну поведінку зерен заповнювача, яка має суттєвий вплив на внутрішню структуру.

Для об'єктивного опису цих явищ необхідно застосовувати ускладнені реологічні моделі (наприклад, модель Бінгама, модель Максвелла), які дозволяють враховувати структурну в'язкість, порогове напруження зсуву, розшарування та інші нелінійні ефекти, притаманні бетонним сумішам у процесі ущільнення [90].

Таким чином, розуміння реологічної поведінки бетонної суміші в умовах динамічного навантаження є ключем до вдосконалення вібраційного формувального обладнання. Це дозволяє не лише прогнозувати зміну параметрів ущільнення в часі, а й формувати науково обґрунтовані режими вібраційної дії, що враховують реальні властивості матеріалу, геометрію форми, тип приводу та спосіб передавання енергії.

1.4. Альтернативні підходи до моделювання бетонної суміші у процесі віброущільнення

У науковій практиці немає єдиної уніфікованої моделі, яка б повною мірою описувала поведінку бетонної суміші під дією вібраційного навантаження. Це пояснюється складністю фізико-механічної природи бетонних систем, які поєднують риси сипких, твердих і в'язкопластичних середовищ. У різних дослідницьких підходах домінують окремі аспекти цієї складної взаємодії [73, 81, 90, 133].

Одна з груп дослідників розглядає бетонну суміш як твердопластичне середовище, що має властивості, близькі до сипких матеріалів [140, 144]. У таких моделях вібраційний вплив інтерпретується через механізми сухого тертя, а ущільнення відбувається шляхом необоротного переміщення часток заповнювача відносно одна одної. Цей процес супроводжується явищем псевдорозрідження, в результаті якого середовище тимчасово втрачає здатність до опору зсуву, що сприяє його ущільненню. При цьому значна частина енергії вібраційного збудження дисипується у вигляді тепла, що підкреслює важливість енергетичної ефективності вібраційного обладнання [117, 128].

Інші підходи базуються на припущенні, що бетонна суміш у ряді випадків може бути змодельована як тверде тіло з деякими в'язкопружними властивостями. Такий підхід часто застосовується у практиці інженерного моделювання вібраційних систем, оскільки спрощує

математичний опис процесу ущільнення та дозволяє ефективно аналізувати коливальні режими та їх вплив на систему [141].

У випадку глибшого аналізу реології цементних і бетонних сумішей у динаміці доцільно застосовуються узагальнені реологічні моделі, серед яких найбільш поширеними є послідовно сполучена модель Максвелла–Шведова–Кельвіна та модель Бінгама.

Остання є однією з найбільш практично орієнтованих і широко використовується у випадку формування бетонних виробів із сумішей, що мають межу текучості. У моделі Бінгама середовище до моменту досягнення граничного напруження зсуву поводить як пружне тіло, а при подальшому зростанні навантаження – як в'язка рідина. Таким чином, деформаційна відповідь матеріалу має двофазну природу: початкову еластичну і наступну пластичну. Реологічні характеристики у такому підході описуються двома параметрами: граничним напруженням зсуву та пластичною в'язкістю. Це дозволяє кількісно оцінювати час до початку текучості, швидкість деформації та ефективність ущільнення під дією зовнішніх коливань.

З практичної точки зору, використання моделі Бінгама забезпечує достатню точність при описі поведінки бетонної суміші у процесі вібраційного або імпульсного ущільнення, особливо на етапі переходу від стану структурної стійкості до мобільної дисперсної системи, здатної заповнювати форму й створювати однорідну щільну масу.

У поєднанні з динамічними підходами до оцінки вібраційних процесів така модель відкриває нові можливості для оптимізації параметрів вібраційного обладнання, розрахунку потужності збуджувачів, регулювання амплітудно-частотних характеристик та адаптації машин до типу бетонної суміші. Все це сприяє досягненню високої якості формованих бетонних панелей за умов мінімального енергоспоживання та технологічної надійності.

1.5. Реологічне моделювання бетонних сумішей для визначення оптимальних режимів ущільнення

Оцінка динамічної поведінки бетонної суміші під час вібраційного ущільнення потребує застосування адекватних реологічних моделей, що відображають складну природу багатофазного середовища. Однією з найпоширеніших моделей, яка застосовується у практиці інженерного аналізу, є модель Бінгама, яка успішно апробована для опису течії цементних сумішей і бетонних сумішей [139]. Згідно з цією моделлю, напруження τ визначається за умовами:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}, \text{ якщо } \tau \geq \tau_0, \quad (1.1)$$

$$\dot{\gamma} = 0, \text{ якщо } \tau < \tau_0, \quad (1.2)$$

де τ_0 – граничне напруження зсуву (межа текучості),

η – пластична в'язкість,

$\dot{\gamma}$ – швидкість зсувної деформації.

Як показали дослідження українських науковців І.І. Назаренка, В.Й. Сівка [76, 102, 140] модель бінгамівського середовища у багатьох випадках задовільно описує поведінку бетонної суміші під час віброущільнення, особливо на етапі її переходу зі стану спокою до рідкоподібного структурно-рухливого стану.

Більш повне уявлення про характер деформування бетонної суміші забезпечує модель Кельвіна–Фойгта, що представляє середовище як систему, де напруження визначається сумою пружного та в'язкого компонентів:

Для моделювання більш складної поведінки бетонних сумішей, особливо на межі фазових переходів (від плинного до твердого стану), [136] запропоновано складену модель, яка поєднує елементи Бінгама і Кельвіна, та відповідає моделі Шофілда–Скотта–Блера. Ця модель дозволяє описати пружно-пластично-в'язку поведінку матеріалу у

широкому часовому діапазоні, що особливо важливо для етапів переходу бетонної суміші із рідкоподібного стану у затверділий.

Так, залежно від співвідношення вхідних параметрів (граничне напруження, в'язкість, модуль пружності), модель може трансформуватися в:

модель Пойтінга–Томсона – для опису в'язкопружної релаксаційної поведінки;

модель Бінгама – для опису плинності з граничною межею текучості;

модель Максвелла – для опису середовищ із домінуванням в'язких властивостей.

Таким чином, вибір моделі реології повинен ґрунтуватися на типі бетонної суміші, меті ущільнення (інтенсивне чи м'яке), параметрах вібраційного навантаження (амплітуда, частота, форма імпульсу) та вимогах до геометричної точності й однорідності готового виробу. Застосування узагальнених моделей дозволяє забезпечити науково обґрунтовану розробку режимів ущільнення та оптимізацію конструкції вібраційного обладнання.

Практичне визначення реологічних властивостей бетонних сумішей є складним завданням, що зумовлено їхньою багатофазністю, структурною нестабільністю та чутливістю до зовнішніх механічних впливів. Традиційні методи дослідження реології, які базуються на законах Стокса (рух частинки в'язкої рідини) або на вивченні поведінки рідин у вузькому зазорі при лінійній зміні градієнта швидкості, забезпечують задовільні результати переважно для однорідних систем зі стабільною структурою [135-136].

Однак бетонна суміш, особливо у процесі ущільнення, не є стаціонарною системою – її реологічні характеристики змінюються в часі, внаслідок структуроутворення, зміни водоцементного співвідношення та вивільнення повітря. У зв'язку з цим для цілей контролю, регулювання і оптимізації технологічних процесів ущільнення необхідно застосовувати

спеціалізовані методи оцінки, адаптовані до умов динамічного впливу [140].

Критерієм ефективності вібраційного або імпульсного ущільнення бетонних сумішей виступає ступінь зміни реологічних характеристик, зокрема:

- коефіцієнта в'язкості;
- граничного напруження зсуву;
- часу релаксації;
- амплітудно-частотної чутливості до коливань.

Одержання точних значень цих показників у реальному виробництві є проблематичним через змінність структури суміші протягом ущільнення. З цієї причини доцільно використовувати непрямі методи динамічного оцінювання, зокрема метод поширення хвиль та метод вільних затухаючих коливань [82, 92, 103].

Методика заснована на принципі, що при дії на лінійне в'язкопружне середовище синусоїдально змінного зовнішнього напруження, реакція середовища також буде синусоїдальною, але зі зсувом по фазі. Цей зсув характеризує внутрішні втрати енергії, що безпосередньо пов'язані з в'язкістю та ступенем структурної перебудови матеріалу. Величина зсуву фази між напруженням $\sigma(t)$ та деформацією $\epsilon(t)$, а також їх амплітудне співвідношення дозволяє оцінити короткочасну поведінку бетонної суміші, зокрема її опір деформації в умовах високочастотного навантаження.

Ці динамічні методи є особливо ефективними при дослідженні процесів ущільнення в умовах хвильової передачі енергії в бетонному тілі, що характерно для імпульсних та ударно-вібраційних режимів ущільнення, застосовуваних у новітніх вібраційних установках. Зокрема, визначення резонансної частоти середовища, зони згасання коливань, а також розподілу енергії в об'ємі форми дозволяє оптимізувати параметри ущільнення для досягнення максимальної однорідності та міцності бетонного виробу.

Аналіз вібраційного ущільнення бетонної суміші вимагає глибокого розуміння її реологічної поведінки в умовах змінного навантаження [91]. Реологічна функція, яка описує динамічну реакцію матеріалу, має вигляд:

$$J(\omega) = J_1 + iJ_2, \quad (1.3)$$

де J_1 – відношення деформації у фазі з напруженням до напруження (реальна частина),

J_2 – відношення складової деформації, що зсунута по фазі, до напруження (уявна частина).

Для в'язкопружного середовища, що моделюється згідно з рівняннями Кельвіна–Фойгта, напруження T визначається як:

$$T = G\varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1.4)$$

де T – напруження зсуву,

G – модуль зсуву,

η – динамічна в'язкість,

ε – деформація.

Якщо прикладене навантаження змінюється синусоїдально:

$$T(t) = T_0 \sin(\omega t), \quad (1.5)$$

то відповідь системи (деформація) також буде гармонічною, але зсунутою по фазі:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.6)$$

де $\varepsilon(t)$ – деформація в момент часу t ,

ε_0 – амплітуда деформації,

ω – кутова частота гармонічного навантаження (рад/с),

φ – фазовий зсув між напруженням і деформацією.

Фазовий зсув φ визначає ступінь втрат енергії внаслідок в'язкості середовища. Цей зсув задається як:

$$\tan(\varphi) = \frac{G}{\eta\omega}. \quad (1.7)$$

З виразу (1.7) видно, що величина зсуву фаз залежить від частоти коливань ω та співвідношення $\frac{\eta}{G}$ – тобто від реологічних параметрів бетонної суміші. Отже, результуюче напруження, прикладене до середовища, прямо залежить як від амплітуди, так і від частоти збудження. Для реологічної функції $J(\omega)$, яка описує комплексну відповідь середовища, можна записати:

$$J_1 = \frac{G}{G^2 + (\eta\omega)^2}, \quad (1.8)$$

J_1 – реальна частина комплексної податливості

$$J_2 = \frac{\eta\omega}{G^2 + (\eta\omega)^2}, \quad (1.9)$$

J_2 – уявна частина динамічної податливості

Таким чином, повна функція відповіді має вигляд:

$$J(\omega) = \frac{G + i\eta\omega}{G^2 + (\eta\omega)^2}. \quad (1.10)$$

Відповідно, модуль реакції системи на збурення $|J(\omega)|$, описує амплітуду відгуку системи на гармонічне навантаження (тобто, наскільки сильно деформується система при силовому збуренні частоти ω)

$$|J(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{G^2 + (\eta\omega)^2}}, \quad (1.11)$$

а функцію поведінки бетонної суміші у частотному діапазоні можна записати як:

$$\varepsilon(\omega) = J(\omega) \cdot T_0, \quad (1.12)$$

або в розгорнутому вигляді:

$$\varepsilon(\omega) = \frac{T_0}{\sqrt{G^2 + (\eta\omega)^2}} \cdot \sin(\omega t + \varphi) . \quad (1.13)$$

З наведених рівнянь випливає, що зі збільшенням частоти коливань ω суттєво зростає вплив в'язкої складової (вираженої через $\eta\omega$), що відповідає за енергетичні втрати та опір деформації. Натомість у низькочастотному режимі ($\omega \rightarrow 0$) переважає пружна складова, і модель (1.13) наближається до залежності Гука:

$$T = G \varepsilon , \quad (1.14)$$

що описує ідеально пружну реакцію, не залежну від частоти.

1.6 Огляд конструкцій і оцінка параметрів формувальних площадок для виготовлення будівельних виробів вібраційними методами

У сучасному виробництві бетонних і залізобетонних виробів, особливо у контексті індустріального та швидкокомонтованого будівництва, формувальні площадки вібраційного типу залишаються найпоширенішим і найбільш універсальним видом обладнання [28, 47 58, 88, 93, 106, 111, 112]. Їх популярність обумовлена простотою конструкції, можливістю адаптації до широкої номенклатури форм і виробів, а також гнучкістю налаштування вібраційних параметрів залежно від типу бетонної суміші.

Площадки можуть функціонувати в трьох основних режимах:

вібраційний (гармонічний) – з безперервним синусоїдальним збудженням;

віброударний – з нерегулярним, імпульсно-модуляційним збудженням;

ударний – з чітко вираженими короткочасними імпульсами.

Використання кожного з цих методів визначається типом виробу, жорсткістю бетонної суміші, геометрією форми та вимогами до ущільнення. Найбільше поширення на території України отримали

площадки з горизонтальним або вертикальним напрямком вібрацій, які забезпечують ефективне ущільнення при мінімальній металомісткості конструкції.

Історично прагнення підвищити ефективність ущільнення бетонних сумішей зумовило активний розвиток і модернізацію простих вібраційних площадок [88, 106]. У результаті було створено велику кількість різновидів цього обладнання, які класифікуються за кількома ознаками. Зокрема, за типом приводу вони поділяються на електромеханічні, пневматичні та гідравлічні; за орієнтацією вібраційного збудження – на одновісні, двовісні та з круговим збудженням; за способом передачі зусиль на форму – на варіанти з жорстким або пружно-демпфованим з'єднанням; а за конструкцією формувальної частини – на установки зі стаціонарними, знімними або змінними касетними модулями. Така різноманітність конструкцій дозволяє адаптувати вібраційне обладнання до специфічних умов виробництва й особливостей бетонних сумішей, що використовуються.

Універсальність вібраційних площадок пояснюється можливістю використання змінних опалубкових форм, що дозволяє швидко переналаштовувати виробництво на різні типорозміри виробів, зокрема – стінові панелі, перемички, плити перекриття, дрібноштучні елементи тощо.

Значний внесок у розвиток та вдосконалення конструкцій вібраційних формувальних площадок зробили українські вчені та інженери. Вагомі наукові й прикладні результати належать таким фахівцям, як І.І. Назаренко – за роботи в галузі моделювання коливальних систем і динаміки ущільнення бетонів [80, 81]; О.Г. Маслов – за розробки з енергетично оптимізованих віброустановок для легких бетонів [12, 69]; Л.І. Сердюк, В.І. Сівко – за дослідження процесів передачі енергії від приводу до середовища [135, 136, 138, 139, 142]; М.Г. Ємельяненко [132] – за інженерні рішення щодо створення комбінованих ударно-вібраційних систем; О.В. Орісенко – за аналіз взаємодії бетонної суміші з формою у

динамічному режимі ущільнення [122, 125]; М.П. Нестеренко – за наукові дослідження в області динаміки технологічного обладнання та впровадження вібраційних процесів у будівництві [106, 110, 115]; С.М. Жигілій – за розробку конструкцій і методик розрахунку вібраційного обладнання з урахуванням нелінійних властивостей середовища [82]; Ю.С. Саленко – за вдосконалення систем активного керування режимами віброущільнення з метою підвищення ефективності формування бетонних виробів [13, 69]. А також інші [16, 43, 51, 53, 54, 73, 134, 137, 143] праці яких мали значний вплив на розвиток наукових підходів в конструюванні та дослідженні вібраційного обладнання та продовжують активно використовуватись в Україні.

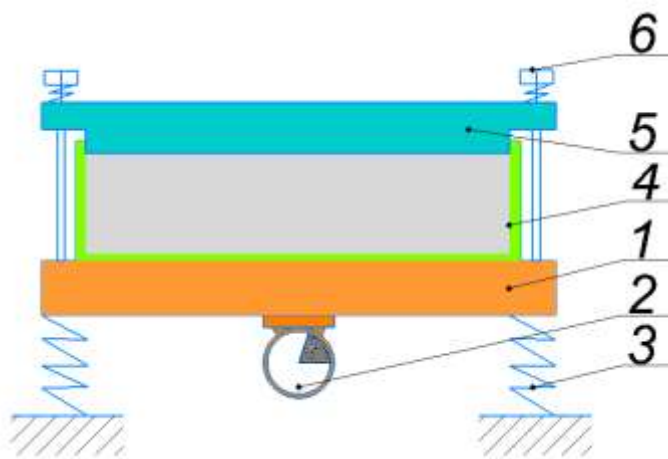
Практика показує, що віброударні площадки забезпечують значно кращу ефективність ущільнення у порівнянні зі звичайними вібраційними, особливо при використанні жорстких, малорухомих або легких бетонів [127]. Імпульсна дія дозволяє інтенсивно переміщати зерна заповнювача, зменшувати пористість і водоцементне співвідношення у поверхневих зонах без втрати геометричної точності.

На основі оцінки технічних рішень та аналізу впливу параметрів (частоти, амплітуди, орієнтації коливань, режиму імпульсів), можливо розробити оптимальні конфігурації формувальних площадок, що забезпечать стабільну якість залізобетонних виробів і зниження енергоспоживання.

Схеми формувальних площадок для виготовлення будівельних виробів вібраційним, віброударним та ударним методом відображають принципи передачі механічної енергії до бетонної суміші з метою її ущільнення та формування. Основні типи таких схем можна класифікувати за характером збудження та взаємодії елементів обладнання.

Найпростішими та найбільш розповсюдженими різновидами формувального вібраційного обладнання є одномасові вібраційні площадки (рисунк 1.1), які характеризуються стійким режимом роботи у

широкому діапазоні технологічних параметрів, простотою обслуговування та низьким рівнем передачі вібрацій на фундамент. Такі конструкції мають високу надійність, мінімальну енергоємність та забезпечують задовільну якість ущільнення бетонної суміші, особливо у виробах із простою геометрією.



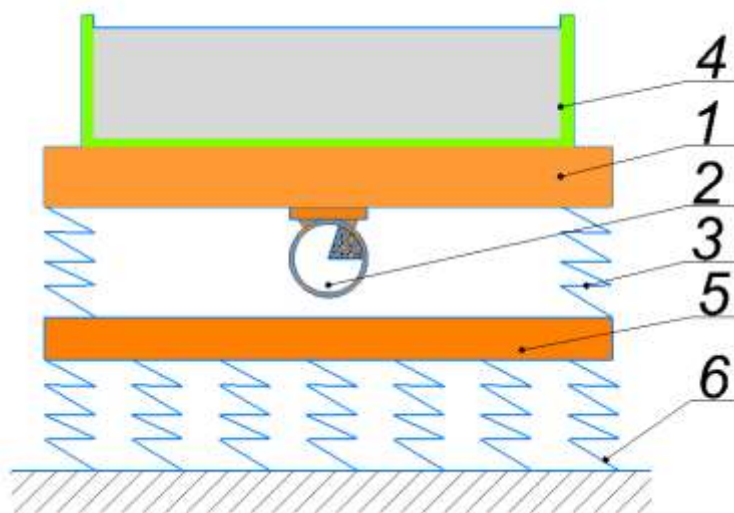
1 – рама, 2 – вібратор, 3 – опори, 4 – форма з сумішшю, 5 – привантажувач, 6 – зажими

Рисунок 1.1 – Схема одномасової вібраційної площадки

Одномасова вібраційна площадка складається зі сталевій рами, до якої жорстко приєднані вібратори (переважно дебалансного типу), встановленої на еластичних опорах, що ізолюють коливання від фундаменту. На раму встановлюється металева форма з бетонною сумішшю, яка жорстко фіксується до неї за допомогою притискного пристрою або привантажувача. Така конструкція забезпечує передачу коливальної енергії без втрат на взаємні переміщення між формою і рамою. Відсутність жорсткого кріплення призводить до виникнення неконтрольованих співударянь форми з рамою, втрати енергії, шуму та зниження ефективності ущільнення.

Серед технічних рішень, що забезпечують підвищення ефективності ущільнення бетонних сумішей, важливе місце займають двомасові вібраційні площадки, які базуються на використанні резонансного ефекту.

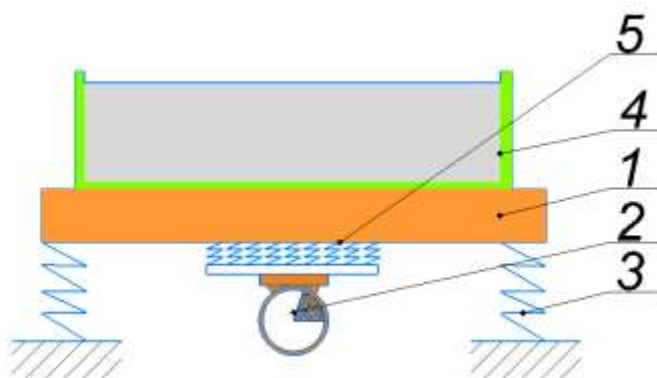
Конструктивно така система (рисунок 1.2) складається з двох мас – форми з рамою (перша маса) та фундаменту (друга маса), між якими встановлюються спеціально підібрані опорні пружини. Резонанс досягається шляхом налаштування жорсткості пружин так, щоб власна частота системи була близькою до частоти вимушених коливань, що створюються вібратором.



1 – рама, 2 – вібратор, 3 – опори, 4 – форма з сумішшю, 5 – рама нижня, 6 – еластичні опори

Рисунок 1.2 – Схема двомасової вібраційної площадки

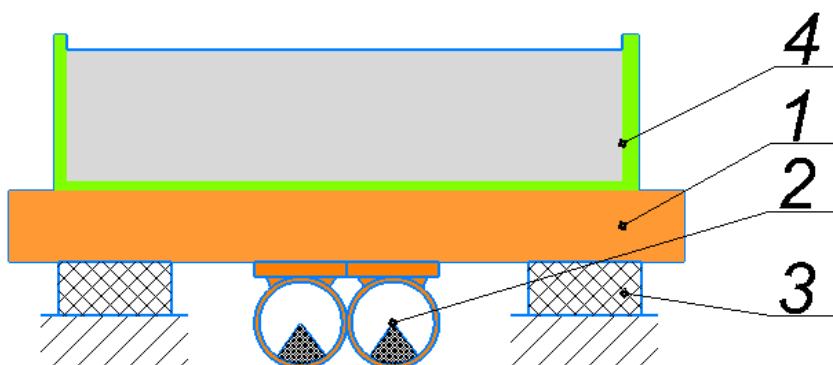
На рисунку 1.1, в подано типову схему двомасової системи, в якій вібратор приєднаний до площадки не жорстко, а через резонансну пружну підвіску. У такій системі значно зменшується необхідний момент на дебалансах та знижується потужність приводу, що забезпечує енергоефективність процесу ущільнення. Проте, у зв'язку з активною участю фундаменту у процесі коливань, на нього передаються великі динамічні навантаження, що зумовлює необхідність його додаткового підресорення – застосування нижніх пружин або демпферів, які обмежують амплітуду коливань і знижують передачу вібрації на навколишні конструкції.



1 – рама, 2 – вібратор, 3 – опори, 4 – форма з сумішшю, 5 – рама нижня, 6 – підвісаторні пружини

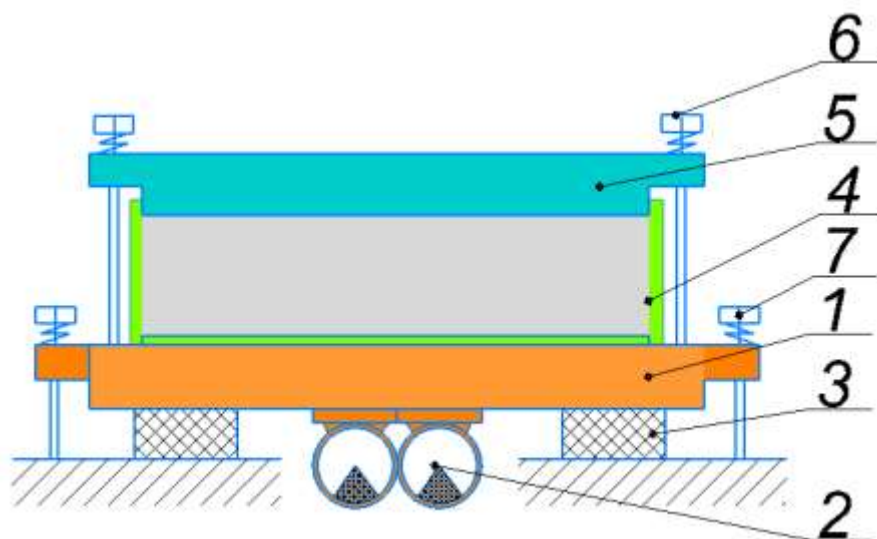
Рисунок 1.3 – Схема двомасової вібраційної площадки з кріпленням вібратора через резонансну пружну підвіску

Іншою перспективною технологією є віброударні одномасові площадки, зображені на рис. 1.4 та 1.5 . На відміну від традиційних вібраційних систем, у яких передача енергії відбувається через гармонічні коливання, віброударні режими реалізують періодичні удари рами площадки об еластичні обмежувачі, вбудовані в основу. Ключовим елементом такої конструкції є пружні прокладки, які встановлюються замість класичних сталевих або пружинних опор. В момент контакту з прокладкою виникає короткочасний ударний імпульс, що створює локальне зростання тиску у бетонній суміші, підвищуючи інтенсивність ущільнення та сприяючи руйнуванню повітряних бульбашок.



1 – рама, 2 – вібратор, 3 – пружні прокладки, 4 – форма з сумішшю

Рисунок 1.4 – Схема віброударної одномасової площадки

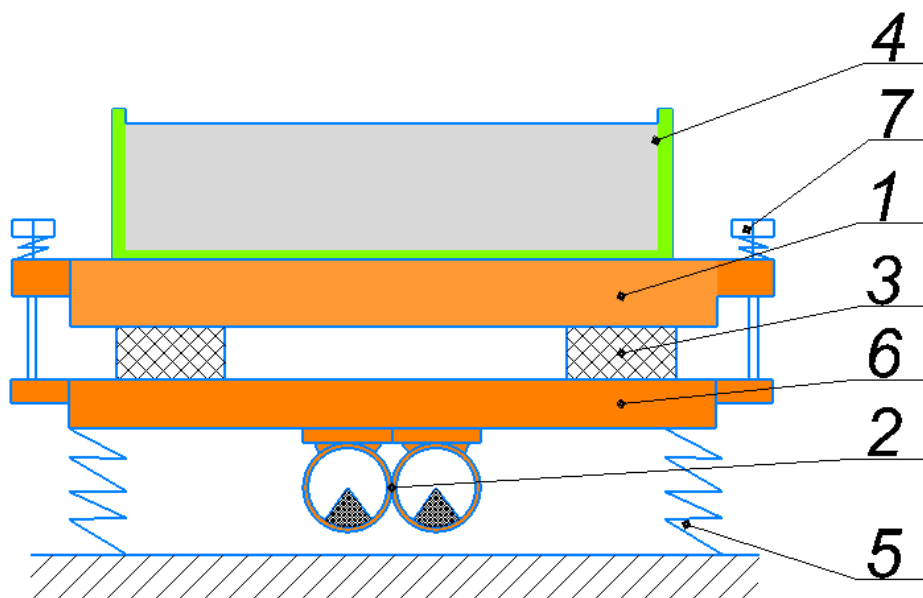


1 – рама, 2 – вібратор, 3 – пружні прокладки, 4 – форма з сумішшю, 5 – привантажувач, 6, 7 – зажими

Рисунок 1.5 – Схема віброударної одномасової площадки з прижимом

Застосування віброударного режиму змінює характер взаємодії між платформою і бетонною сумішшю – коливання перетворюються на імпульси високої інтенсивності, які проникають глибше в тіло суміші та активізують міжзернову переорієнтацію заповнювача. Це дозволяє формувати жорсткі, щільні вироби з мінімальним водоцементним співвідношенням та зменшити кількість необхідної енергії в порівнянні з тривалими гармонічними режимами.

Одним із напрямів підвищення ефективності ущільнення жорстких бетонних сумішей є використання двомасових віброударних систем, які поєднують елементи класичних вібраційних та імпульсних установок. Прикладом є віброударна площадка з формою, встановленою на пружних прокладках (рис. 1.6), конструкція якої не потребує масивного фундаменту, що є важливою перевагою при розгортанні мобільного або тимчасового виробництва. У такій системі форма 6 не має жорсткого кріплення до рами 1, що дозволяє їй вільно переміщуватись у вертикальному напрямку.

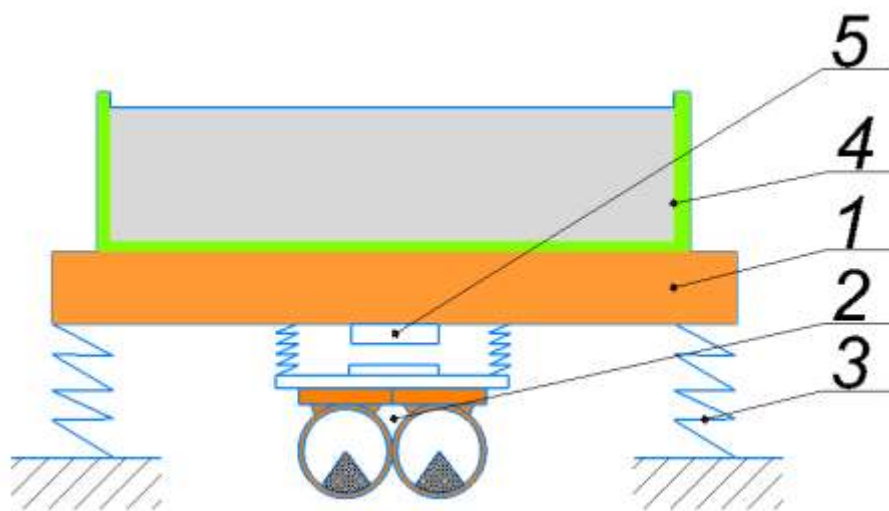


1 – рама, 2 – вібратор, 3 – пружні прокладки, 4 – форма з сумішшю, 5 – привантажувач, 6 – рама нижня, 7 – зажим

Рисунок 1.6 – Схема двомасової віброударної площадки з формою, встановленою на пружних прокладках

Принцип дії установки полягає у виникненні періодичних ударів форми об раму площадки. Для цього пружні прокладки 3 та притискні пружини 5 підбираються таким чином, щоб при роботі вібратора 2 виникав відрив форми від прокладок, а під час зворотного ходу – удар об поверхню рами. Завдяки такій схемі забезпечується імпульсне ущільнення суміші, при якому передається велика питома енергія на одиницю маси, що особливо ефективно при формуванні жорстких бетонів з низьким водоцементним відношенням.

Другий варіант реалізації – двомасова віброударна площадка з віброударним приводом (рис. 1.7). В даному випадку вібратор 2 кріпиться до рами площадки через пружні підвіски, які підібрані з урахуванням виникнення резонансних співударів між вібратором та формою. У результаті роботи електроприводу виникає періодичний контакт між збудником і формою, що дозволяє передавати потужні імпульси ущільнення з меншою витратою енергії порівняно з гармонічними системами.



1 – рама, 2 – вібратор, 3 – пружні прокладки, 4 – форма з сумішшю, 5 – ударник

Рисунок 1.7 – Схема віброударної двомасова площадки з віброударним приводом

Окремо слід виділити ударні або ударно-вібраційні площадки (рис. 1.8), дія яких базується на вільному падінні форми з бетонною сумішшю з висоти 10–15 мм на масивну опору. Такі системи створюють до 200–300 ударів на хвилину, забезпечуючи глибоке ущільнення жорстких бетонних сумішей завдяки дії інерційних сил і великому піковому тиску під час контакту. На відміну від класичних вібраційних методів, ударна дія дозволяє перебудовувати зернову структуру суміші та руйнувати залишкові повітряні включення, навіть у густоармованих зонах виробу.

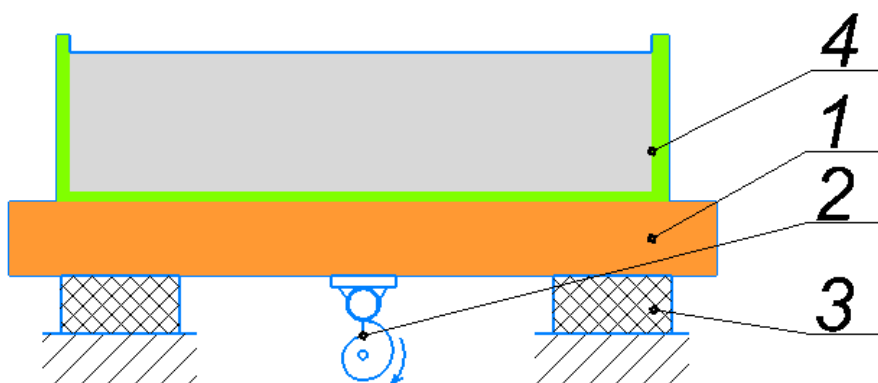


Рисунок 1.8 – Схема ударно-вібраційної площадки з кулачковим приводом

Залежно від характеру збудження та конструктивного виконання, одномасові площадки класифікуються на кілька різновидів. Найбільш ранньою формою реалізації стали вібраційні площадки з круговими коливаннями, які застосовуються в промисловості з середини XX століття та досі використовуються у виробництві. Джерелом збудження в таких конструкціях є одновальний вібратор кругової дії, що являє собою дебалансний вал, обертовий від електродвигуна. У результаті обертання створюється круговий коливальний рух у горизонтальній площині, що передається формі з бетонною сумішшю.

Залежно від характеру дії збуджуючої сили, формувальні вібраційні площадки поділяють на одночастотні та багаточастотні. Одночастотні площадки працюють на фіксованій частоті (зазвичай 45–50 Гц) і переважно використовуються для виготовлення малогабаритних виробів з невеликою висотою, таких як тротуарна плитка, бордюри, малі елементи огорож та інші дрібноштучні вироби. Натомість багаточастотні вібраційні площадки дозволяють реалізовувати змінні або комбіновані режими коливань і застосовуються для формування великогабаритних виробів, зокрема стінових панелей, плит перекриття та об'ємних залізобетонних блоків. Вони забезпечують більш повне ущільнення суміші на різних глибинах форми та знижують ефект резонансного недоущільнення.

За конструктивним виконанням формувальні площадки поділяються на два основних типи:

- із жорсткою монолітною рамою, яка забезпечує максимальну жорсткість системи «форма – вібратор – опора» та рекомендована для важких умов експлуатації;

- секційні, що мають розбірну або модульну структуру і дозволяють адаптувати площадку до змінної номенклатури форм і виробів.

На практиці обидва типи конструкцій активно застосовуються в сучасному виробництві, зокрема на заводах залізобетонних виробів. Прикладом класичних промислових реалізацій є:

площадка типу СМЖ, (рис. 1.9) відома як один із найбільш поширених варіантів у заводському формуванні [80];

площадка типу ВПГ, розроблена в Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка (рис. 1.10), яка є вдалим прикладом науково-технічного підходу до розробки ефективного вібраційного обладнання [114].

Площадки типу ВПГ створені з урахуванням вимог енергоефективності, адаптації до різних режимів ущільнення, зниження вібраційного навантаження на фундамент і забезпечення рівномірного ущільнення бетонної суміші по всьому об'єму форми [110]. Їх використання є перспективним напрямом для модернізації виробничих ліній на вітчизняних підприємствах залізобетонної промисловості.

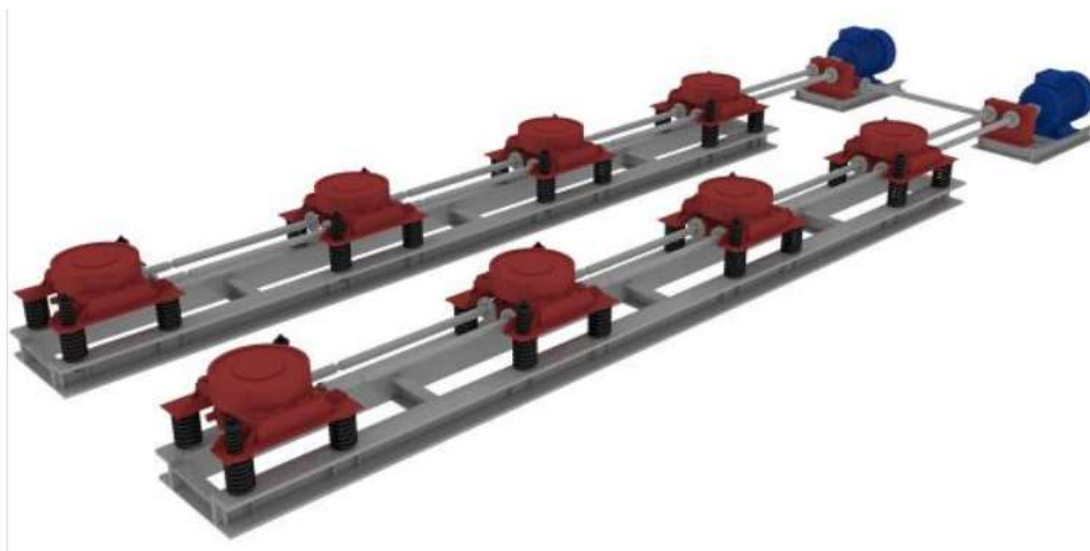


Рисунок 1.9 – Вібраційна площадка типу СМЖ 187Б



Рисунок 1.10 – Вібраційна площадка ВПГ-25м

У контексті розвитку вітчизняного формувального обладнання слід також відзначити дослідницькі та конструкторські розробки, виконані у Київському національному університеті будівництва і архітектури (КНУБА). Зокрема, в лабораторіях кафедри механізації будівельних процесів та машиновикористання було створено низку експериментальних вібраційних та віброударних установок, орієнтованих на ефективне ущільнення легких і надлегких бетонів, таких як пінобетон, керамзитобетон, полістиролбетон. Результатом цих досліджень стали площадки з адаптивним регулюванням амплітудно-частотних характеристик, а також конструкції з вбудованими активними привантажувачами, які забезпечують стабільну контактну взаємодію між формою і бетонною сумішшю навіть при великій глибині ущільнення. На рисунку 1.11 зображено фото лабораторної установки яка забезпечує змінний режим частоти та просторові коливання [84].

Ці установки орієнтовані на малосерійне та лабораторне виробництво, однак напрацьовані технічні рішення (зокрема, перехресне

збудження, спрямовані імпульси, активні демпфери) вже впроваджуються в конструкції промислових машин нового покоління.



Рисунок 1.11 – Лабораторна установка із змінними режимами частот [84]

У Кременчуцькому національному університеті імені Михайла Остроградського (КрНУ) під керівництвом професора Олександра Маслова та професора Юлії Саленко активно розробляються високоефективні вібраційні системи ущільнення бетонних сумішей. Зокрема, дослідники запропонували конструкцію горизонтальної вібраційної площадки з електроприводом, що складається з асинхронного електродвигуна з дебалансами на кінцях ротора [13].

Ця система дозволяє ефективно ущільнювати полімербетонні суміші, моделюючи їх як середовище з розподіленими параметрами та враховуючи пружні й дисипативні сили опору. Результати досліджень дозволили визначити закономірності поширення пружно-в'язких деформаційних хвиль у полімербетоні та зміну напружень у ущільненому шарі матеріалу.

Ці розробки мають практичне значення для формування бетонних стінових панелей, оскільки дозволяють оптимізувати параметри вібраційного ущільнення, зменшити енерговитрати та підвищити якість готових виробів. Зокрема, дослідження взаємодії вібраційної машини з ущільнюваною бетонною сумішшю дозволили визначити зміну опору суміші в процесі віброущільнення залежно від її консистенції.

Що стосується міжнародних аналогів, то в сегменті промислових вібраційних площадок, які умовно відповідають типам обладнання СМЖ і ВПГ, варто згадати такі моделі:

MASA Variant Vibration Table (Німеччина) – високоточна площадка, яка входить до складу модульних ліній з виробництва бетонних блоків і плит [2]. Оснащена електронною системою керування, частотним приводом та функцією автоматичного підбору режиму ущільнення в залежності від типу суміші. Забезпечує ущільнення на частотах до 60 Гц із змінною амплітудою до 1,5 мм. Аналог вітчизняних багаточастотних ВПГ.

OMAG Vibration Station (Німеччина) – універсальне формувальне обладнання, яке застосовується в автоматизованих лініях для виробництва плит та панелей [3]. Вібраційна система включає чотири синхронізовані вібратори з незалежним регулюванням, що дозволяє створювати як гармонійні, так і імпульсні режими ущільнення. Працює в поєднанні з системами автоматичного контролю щільності.

Hess RH 2000 Vibration Table (США / Німеччина) – багатофункціональна площадка, інтегрована в повністю автоматизовані комплекси для бетонних виробів. Має динамічне балансування, датчики ущільнення та функції адаптивного управління процесом. Застосовується для виробництва як масивних панелей, так і дрібних виробів.

Columbia Vibration System (США) – приклад важкої одноплощинної системи ущільнення із змінною фазою [2]. Орієнтована на формування глибоких виробів із жорстких сумішей. Вважається аналогом СМЖ у

сучасній реалізації, однак має перевагу за енергоефективністю та цифровим керуванням.

Також прикладом реалізації вібраційної площадки для формування залізобетонних виробів є установка (рисунок 1.12) [108], розроблена в рамках досліджень у Полтавському національному технічному університеті імені Юрія Кондратюка. Ця вібраційна установка призначена для виготовлення малогабаритних залізобетонних виробів і характеризується високою ефективністю ущільнення бетонних сумішей завдяки оптимізованим параметрам вібрації та конструктивним особливостям. Зокрема, вона забезпечує рівномірне ущільнення суміші по всьому об'єму форми, що сприяє підвищенню якості готових виробів. Установка оснащена системою регулювання частоти та амплітуди коливань, що дозволяє адаптувати процес ущільнення до різних типів бетонних сумішей і виробів. Крім того, конструкція передбачає ефективне поглинання вібрацій, що зменшує навантаження на фундамент і підвищує довговічність обладнання.



Рисунок 1.12 – Віброустановка для формування малогабаритних бетонних та залізобетонних виробів у касетній формі [108]

Перевагами таких установок є простота та дешевизна конструкції, надійність, мала енергоємність, тривалий термін служби, а також низький рівень шуму порівняно з ударними системами. Проте вібраційні площадки з круговими коливаннями мають і низку суттєвих недоліків, зокрема: нерівномірність ущільнення бетонної суміші по ширині форми, а також транспортний ефект – небажане переміщення суміші в бік напрямку дії коливань. Це може призводити до виникнення зон неоднорідності у готовому виробі, особливо при формуванні виробів з низькою жорсткістю суміші або складною геометрією.

Серед промислово ефективних типів формувального обладнання особливу увагу заслуговують вібраційні площадки з вертикально спрямованими коливаннями, які демонструють високу стійкість до вибраного режиму роботи та забезпечують рівномірне поширення амплітуди коливань по площі формувальної поверхні. Завдяки спрямованому вертикальному впливу коливальна енергія ефективніше передається безпосередньо бетонній суміші, зменшуючи ймовірність утворення зон недоущільнення, особливо у виробах значної висоти або з густим армуванням.

Коливання в таких системах збуджуються за допомогою одновального або двовального маятникового вібратора, конструкція якого формує вертикальну складову сили інерції, що діє в напрямку ущільнення. Завдяки цьому досягається висока ефективність ущільнення навіть у жорстких та малорухомих сумішах, а також забезпечується краща якість обробки поверхні виробу [124, 146].

Разом з тим, класичні моделі таких віброплощадок мають і недоліки, зокрема:

підвищений рівень шуму на робочому місці, що вимагає відповідних заходів з шумоізоляції та охорони праці;

втрати енергії на синхронізацію приводів, особливо у випадках, коли використовується два окремих вібраційних двигуни, які повинні працювати в точно узгодженому режимі.

Для усунення зазначених недоліків у сучасних конструкціях вібраційних площадок все ширше застосовуються самосинхронізуючі вібратори, які не потребують складної системи керування і автоматично налаштовуються на спільний режим роботи за рахунок взаємодії інерційних моментів [80]. Ще більш точного узгодження та регулювання дозволяє досягти електросинхронізація електродвигунів, що здійснюється за допомогою частотних перетворювачів та електронної системи керування. Це забезпечує стабільність амплітудно-фазових характеристик, зменшує споживання енергії та покращує динамічну рівновагу системи.

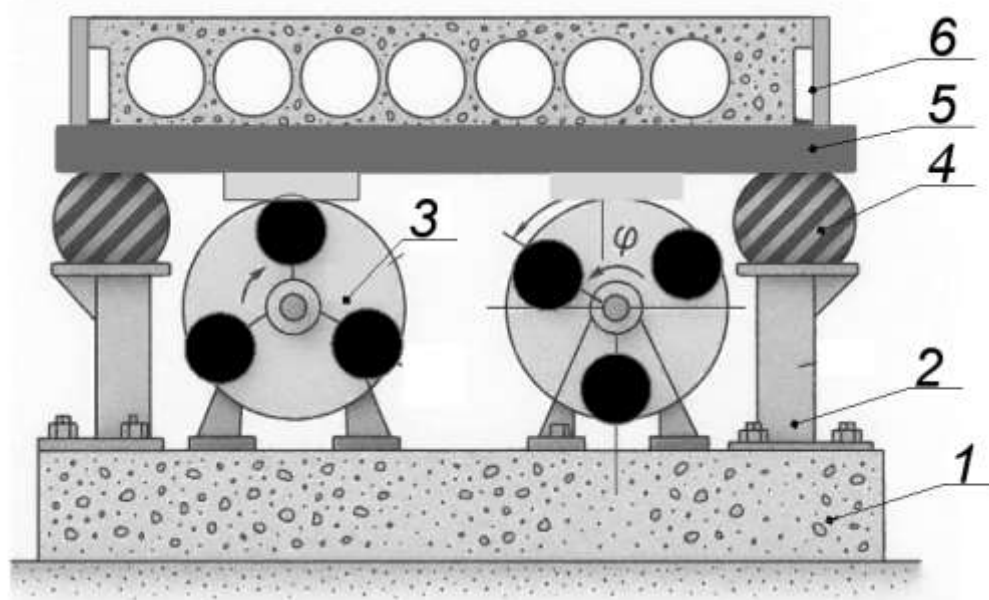
Технологія ущільнення бетонних сумішей в імпульсному режимі вирізняється принципово іншою динамікою взаємодії між робочими органами обладнання та матеріалом у порівнянні з традиційними методами гармонійної вібрації. Основний ефект досягається завдяки передаванню енергії у вигляді короткотривалих, але високочастотних імпульсів, які спричиняють формування деформаційних хвиль у тілі бетонної маси. У процесі поширення цих хвиль спостерігається локальне ущільнення з розвантаженням у зонах зниженого тиску, що сприяє активному переміщенню заповнювача, витісненню повітря та структурній перебудові суміші [102].

Однією з важливих переваг імпульсного ущільнення є його ефективність у роботі з жорсткими бетонними сумішами, які демонструють осідання конуса в межах 0–4 см. При таких параметрах класичні вібраційні режими не завжди забезпечують достатній рівень ущільнення, тоді як імпульсна дія дає змогу забезпечити повноцінне формування щільної структури без значного розшарування матеріалу.

Оптимальні робочі параметри імпульсних установок залежать від фізико-механічних властивостей бетонної суміші. Зокрема, ефективне

ущільнення досягається при частоті імпульсів 15–20 Гц та амплітуді 5–8 мм. Час дії в такому режимі зазвичай становить до 2,5 хвилин. Для сумішей із вищою жорсткістю рекомендовано підвищення частоти до 25–30 Гц із відповідним коригуванням амплітуди [82].

Інженерно реалізованими прикладами цієї технології є імпульсно-роликові установки, в яких формування імпульсу відбувається за допомогою обертових елементів із роликів, що створюють ритмічне динамічне навантаження (рисунок 1.13). Подібні машини забезпечують ущільнення виробів висотою до 2 метрів з високим ступенем однорідності за мінімального часу обробки.



1 – фундамент, 2 – рама нерухома, 3 – роликовий привод, 4 – опори,
5 – рама рухома, 6 – форма з виробом

Рисунок 1.13 – Імпульсно-роликова установка

Крім зменшення тривалості ущільнення, імпульсні режими демонструють переваги у забезпеченні високої якості зовнішніх поверхонь виробів, зниженні варіабельності міцності та мінімізації залишкової пористості. Коефіцієнт варіації механічних властивостей виробів, отриманих за такої технології, не перевищує 10 %, що свідчить про

стабільність процесу та рівномірність ущільнення по всьому об'єму форми [99].

Експериментальні дослідження, проведені на легкобетонних сумішах із шлакової пемзи та керамзиту з показником жорсткості до 90 с, підтвердили високу ефективність імпульсної технології ущільнення. Зокрема, при застосуванні низькочастотної пульсації (до 20 Гц) та двосторонніх імпульсів (8–12 Гц) досягалося значне покращення структури бетону. Аналіз спектрограм прискорень виявив наявність широкого діапазону частот з максимальними прискореннями до 30 g, що сприяло формуванню однорідної структури бетонів та підвищенню фізико-механічних характеристик на 10–22% [81].

Прикладом також є комплект обладнання для ущільнення арболітових блоків зображений на рисунку 1.14. який включає в себе скіповий підйомник, змішувач та вібраційний стіл для ущільнення.



Рисунок 1.14 – Комплект обладнання для ущільнення арболітових блоків

Дослідження [82] показали, що імпульсне ущільнення забезпечує рівномірний розподіл енергії коливань по всій висоті бетонного виробу.

При виготовленні виробів висотою до 0,7 м встановлено, що одностороння пульсація забезпечує однорідне ущільнення на висоту до 40 см, а двостороння – до 70 см. Коефіцієнти варіації міцності при цьому становили 1,3–2,3%, що свідчить про високу однорідність матеріалу.

В роботах [26, 71] акцентується увага на важливості врахування динамічних характеристик вібраційних систем при розробці обладнання для імпульсного ущільнення. Зокрема, він підкреслює необхідність оптимізації параметрів коливань для досягнення максимальної ефективності ущільнення бетонних сумішей.

Узагальнені дані випробувань зразків свідчать про істотний приріст міцності (до 20%) при використанні імпульсного режиму ущільнення.

1.7 Висновки з розділу, мета та задачі дослідження.

1. На основі аналізу літературних джерел та існуючих конструкцій обладнання для формування виробів із легких бетонів встановлено, що найбільш поширеними є: одномасові та двомасові вібраційні платформи, у тому числі резонансного типу, а також віброударні установки. Для забезпечення належного ущільнення легкобетонних сумішей доцільним є використання комбінованого імпульсно-вібраційного обладнання, яке забезпечує покращення структури бетону, підвищення його реологічних характеристик і фізико-механічних властивостей готових панелей.

2. Конструкція обладнання для виготовлення панелей із легких бетонів повинна відповідати критеріям економічної доцільності, зокрема мати низьку металоємність, високу технологічність та універсальність. Це дозволяє забезпечити ефективне застосування як на великих, так і на малих підприємствах будівельної галузі.

3. Встановлено, що оцінка динамічної поведінки бетонної суміші під час вібраційного ущільнення потребує застосування адекватних реологічних моделей, що відображають складну природу багатофазного

середовища.

Тому сформульовано мету даної роботи – створення та дослідження високоефективного комбінованого імпульсно-вібраційного обладнання для формування стінових панелей із заданими експлуатаційними характеристиками, що забезпечує рівномірне ущільнення бетонної суміші завдяки керованому поєднанню гармонічних та імпульсних коливань. Для досягнення означеної мети в роботі потрібно вирішити наступні задачі:

- Провести аналіз існуючих конструкцій вібраційних машин та обладнання для ущільнення бетонних сумішей.
- Обґрунтувати доцільність використання комбінованого (гармонічного - імпульсного) режиму вібраційного впливу для формування виробів із легких і жорстких бетонів.
- Розробити математичну модель динамічної взаємодії елементів установки з бетонною сумішшю з урахуванням хвильових ефектів та реологічних властивостей середовища.
- Встановити залежності між основними параметрами коливального збудження та показниками ущільнення бетонної суміші.
- Розробити інженерну методику визначення оптимальних режимів ущільнення для заданих типів бетонів.
- Спроектувати та виготовити дослідний зразок імпульсно-вібраційної установки.
- Провести експериментальні дослідження процесу ущільнення бетонної суміші в новій установці та порівняти результати з традиційними методами.
- Надати рекомендації щодо впровадження результатів дослідження у практику виробництва стінових панелей.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ІМПУЛЬСНО-ВІБРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ УЩІЛЬНЕННЯ СТІНОВИХ ПАНЕЛЕЙ ІЗ ВРАХУВАННЯМ НЕЛІНІЙНИХ КОЛИВАЛЬНИХ ЕФЕКТІВ

2.1. Передумови, припущення і постановка задачі

Основою для побудови математичної моделі вібраційно-імпульсного ущільнення бетонних сумішей слугують положення загальної теорії коливань з урахуванням пружнов'язких і дисипативних властивостей деформованого середовища [12, 13, 23, 54, 61]. Згідно з дослідженнями І.І. Назаренка, О.Г. Маслова, М.М. Нестеренка та О.В. Орісенка, ефективність ущільнення в умовах імпульсної дії значною мірою залежить від правильної постановки задачі як нелінійної задачі динаміки системи з розподіленими та дискретними параметрами [71, 89, 107].

У відповідності до результатів попереднього розділу, для адекватного опису взаємодії бетонної суміші з вібруючим органом, необхідно враховувати вплив масо-інерційних, пружно-дисипативних та контактних властивостей ущільнюваного середовища. На відміну від усталених гармонійних режимів, де застосовується принцип суперпозиції, імпульсні режими зумовлюють появу вищих гармонік та нелінійних складових руху, що унеможлиблює використання класичної гармонічної моделі [91].

Враховуючи це, у роботі використовується змішана дискретно-континуальна модель, в якій оброблюване середовище описується як тіло з розподіленими параметрами (маса, жорсткість, демпфування), але вводиться до рівнянь руху установки у вигляді сконцентрованих реакційних сил та інерційних впливів. Такий підхід дозволяє формалізувати динамічну взаємодію в системі «вібраційно-імпульсна

установка – бетонна суміш – форма» при реалізації ударних імпульсів з різною тривалістю та спектральною насиченістю.

На підставі зазначеного, основними завданнями теоретичного розділу є:

- побудова обґрунтованої розрахункової моделі для опису взаємодії в системі «установка – форма – бетонна суміш»;
- складання рівнянь руху для установки з урахуванням приєднаної маси суміші, демпфування і сил опору;
- визначення впливу форми імпульсу на динамічні реакції у бетонній суміші, включаючи утворення вищих гармонік і відбитих хвиль;
- отримання виразів для оцінки енергії імпульсу, що передається на ущільнюване середовище;
- дослідження впливу параметрів імпульсу на ефективність ущільнення в залежності від жорсткості суміші та геометрії виробу.

У межах цього підходу також розглядається механізм перетворення кінетичної енергії імпульсного збудження в ущільнювальний тиск в межах контакту, а також фактори, що зумовлюють появу нерівномірностей ущільнення, таких як відрив суміші від піддону чи резонансні хвилі в шарі.

2.2. Вибір оптимальної компоновки вібраційної установки для ущільнення стінових панелей із легких сумішей

Процес формування стінових панелей із легких бетонів який пропонується впровадити можна розглянути на прикладі полістиролбетону, що передбачає засипання матеріалу у форму на основу з гіпсокартону висотою 200 - 250 мм, після чого поверх нього вкладається другий лист гіпсокартону, на який встановлюється привантажувач [Ошибка! Источник ссылки не найден., 105]. Основна проблема полягає у визначенні оптимальних параметрів привантажувача (маса, розміри, форма), які забезпечать рівномірний розподіл ущільнення по всій площі

панелі, мінімізують дефекти матеріалу та забезпечать необхідні технічні характеристики готової конструкції. На рисунку 2.1 показано фрагмент стінової панелі яка виготовлена з полістиролбетону.

Бетонні суміші які піддаються вібрації, поведуться як в'язка рідина з об'ємною вагою близькою до ваги суміші, що ущільнюється [85, 86]. Занурюючись під дією власної ваги, привантажувач займає такий рівень коли його вага зрівняється з вагою бетону який витискається [97, 100]. Відповідно в'язкості бетонної суміші швидкість занурення знижується до нуля.



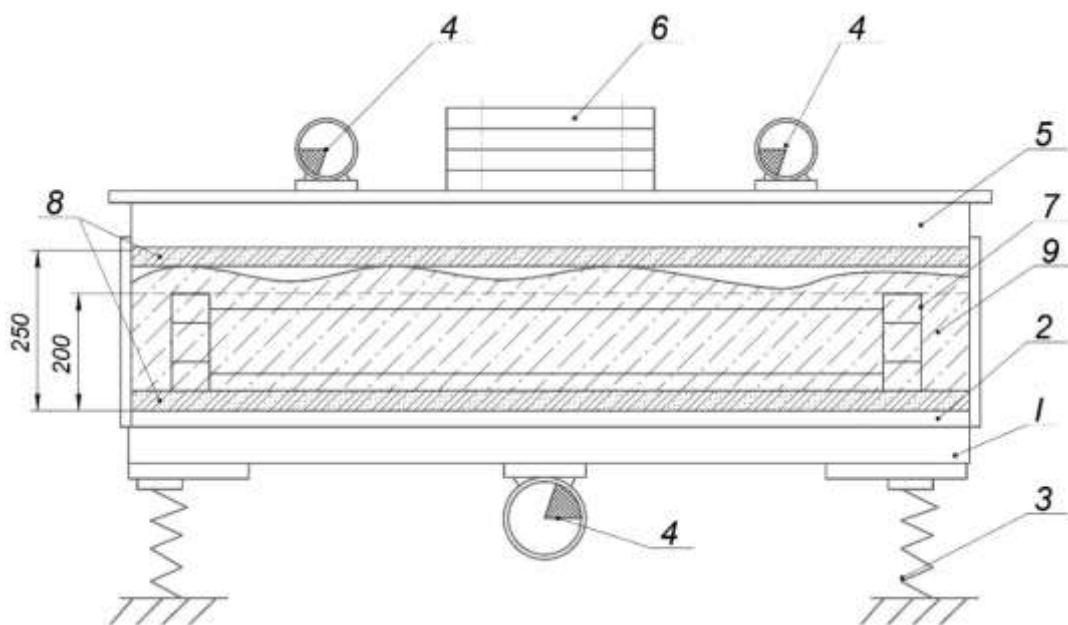
Рисунок 2.1 – Полістиролбетонна стінова панель

У вібраційних привантажувачах простого типу (рисунок 2.2) вібратор 4, додаткові вантажі 6 та рама 5 з'єднані між собою в єдину конструкцію. Такий привантажувач встановлюється безпосередньо на бетонну суміш 9, яка попередньо вложена у форму 2.

Під дією власної ваги привантажувача та коливального зусилля, що створюється вібратором, з бетонної суміші ефективно витісняється надлишкове повітря, а сама суміш ущільнюється до заданої проєктної висоти. Товщина майбутньої стінової панелі визначається положенням пластикових або сталевих обмежувальних каркасів 7.

Завдяки такій конструкції можливо забезпечити рівномірне ущільнення по всій площі панелі, навіть на базі стандартної вібраційної установки, що складається з рухомої рами 1, встановленої на пружних опорах, і віброзбуджувача 4. Однак для подолання гідростатичного опору

бетонної суміші часто необхідно додаткове зусилля, що досягається за рахунок встановлення вантажів 6, які суттєво збільшують загальну масу конструкції.



1 – рама; 2 – форма; 3 – пружна опора; 4 – віброзбудувач; 5 – привантажувач; 6 – додатковий вантаж; 7 – арматурний каркас; 8 – гіпсокартон; 9 – бетонна суміш

Рисунок 2.2 – Вібраційна установка з вібраційним привантажувачем простого типу із змінною масою

З метою оптимізації масогабаритних характеристик привантажувача розроблено інший підхід – конструкція з рухомою інерційною масою. На рисунку 3 подано схему вібраційної установки, в якій привантажувач оснащено інерційною масою, що закріплена на ньому за допомогою пружних елементів 10. Під час вібрації ця маса виконує зворотно-поступальні рухи, створюючи імпульсне навантаження на бетонну суміш без необхідності значного збільшення ваги всієї установки.

У випадку простого привантажувача вага всієї системи повинна перевищувати вагу витісненої бетонної суміші, що описується відповідним виразом (2.1).

$$Q = KV\gamma, \quad (2.1)$$

де Q – вага привантажувача,

K – коефіцієнт який враховує склад бетону,

V – об'єм суміші що витісняється привантажувачем,

γ – об'ємна вага бетонної суміші.

Вібратор, встановлений на привантажувачі, збуджує коливання в вертикальній площині, які передаються на бетонну суміш через жорсткий або пружно-демпфований контакт описується формулою (2.2)

$$P = P_0 \sin \omega t, \quad (2.2)$$

де P_0 – амплітуда пульсуючої сили,

ω – кругова частота коливань вібратора.

Як розглянуто в роботах [97, 104], ефективність роботи вібраційного привантажувача буде максимальною у тому випадку, коли пружністю бетонної суміші можна знехтувати. У такому випадку суміш поводить ся як умовно непружне середовище, що не чинить значного реактивного опору вібраціям привантажувача. Це дозволяє досягти максимального проникнення енергії коливань у середовище, що, в свою чергу, сприяє інтенсивному ущільненню, особливо у верхніх шарах.

Наявність ж суттєвої пружної складової в бетоні (наприклад, при підвищеному вмісті цементного каменю або недостатньому зволоженні) призводить до часткової компенсації прикладених зусиль за рахунок пружних деформацій, унаслідок чого зменшується глибина проникнення дії вібрацій та знижується загальна ефективність ущільнення.

Для забезпечення максимальної продуктивності вібраційного привантажувача бажано досягти таких умов технологічного середовища, за яких домінують в'язкопластичні властивості суміші з мінімальним впливом її пружності.

Оскільки привантажувач, зображений на рисунку 2.2, обладнаний двома віброзбуджувачами та змінними додатковими масами, його доцільно розглядати як складну коливальну систему з двома джерелами збудження.

У такій системі динамічна поведінка визначається не лише параметрами окремих елементів, а й їхньою взаємодією. Зокрема, амплітуда коливань залежить від співвідношення мас привантажувача, форми, бетонної суміші та додаткових вантажів, а також від фазової та частотної синхронізації віброзбуджувачів.

У випадку, коли обидва вібратори працюють синфазно, відбувається підсилення вертикальних коливань, що сприяє більш глибокому ущільненню. Натомість асинхронна робота може спричинити появу додаткових горизонтальних складових або змінне навантаження на форму, що знижує ефективність ущільнення й може викликати нерівномірність структури бетонного виробу.

Для оптимізації роботи такого типу привантажувача необхідно враховувати динамічну взаємодію всіх мас у системі, а також забезпечити точну синхронізацію роботи віброзбуджувачів, з урахуванням амплітудно-частотної характеристики та резонансних умов системи.

Система рівнянь для руху системи зображеної на рисунку 2.2 буде мати наступний вигляд:

$$\begin{aligned} m_p \ddot{x}_p + c_p (\dot{x}_p - \dot{x}_t) + k_p (x_p - x_t) = \\ = F_1 \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} m_t \ddot{x}_t + c_p (\dot{x}_t - \dot{x}_p) + k_p (x_t - x_p) + \\ + c_b \dot{x}_t + k_b x_t = (F_1 + F_2) \cos(\omega t) \end{aligned} \quad (2.4)$$

де m_p – маса вібраційної площадки,

m_t – маса привантажувача (разом із змінними додатковими масами m_d),

k_p, c_p – жорсткість та демпфування опор вібраційної площадки,

k_b, c_b – ефективна жорсткість та демпфування бетонної суміші,

$F_p \cos(\omega_p t)$ – збуджувальна сила вібратора площадки,

$F_1 \cos(\omega t)$, $F_2 \cos(\omega t)$ – сили двох вібраторів привантажувача,

x_p , x_t – зміщення відповідно площадки та привантажувача.

У режимі усталених гармонічних коливань рішення має вигляд:

$$x_p = A_p \cos(\omega t), \quad (2.5)$$

$$x_t = A_t \cos(\omega t). \quad (2.6)$$

Підставивши наведені вирази в рівняння системи, отримаємо аналітичні залежності для визначення амплітуди:

$$A_p = \frac{F_p}{\sqrt{(k_p - m_p \omega^2)^2 + (c_p \omega)^2}}, \quad (2.7)$$

$$A_t = \frac{F_1 + F_2}{\sqrt{(k_p + k_b - m_t \omega^2)^2 + (c_p + c_b) \omega^2}}. \quad (2.8)$$

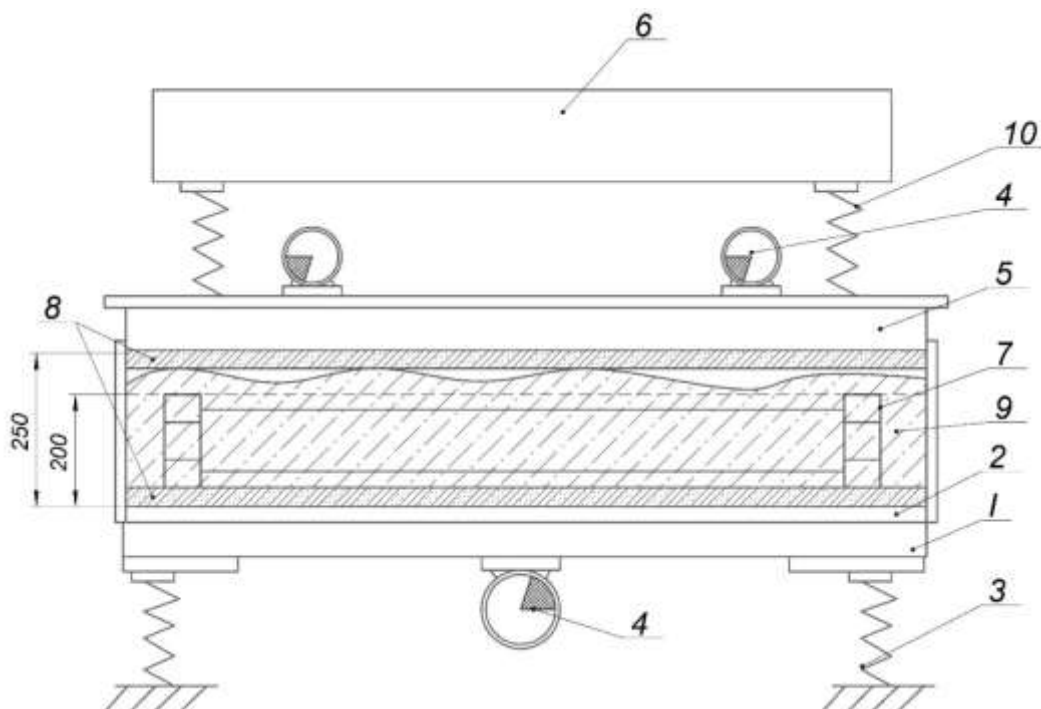
Збільшення додаткової маси m_d призводить до зменшення амплітуди коливань A , оскільки зростає інерційність системи. При незмінній збуджуючій силі більша маса потребує більшого зусилля для досягнення тієї ж амплітуди переміщення

$$A = \frac{F}{k - (m_o + m_b) \omega^2}. \quad (2.9)$$

Це свідчить про можливість регулювання амплітуди коливань шляхом зміни величини додаткових мас m_d , що дозволяє уникати надмірних вібрацій або, навпаки, забезпечити оптимальні умови ущільнення бетонної суміші.

На рисунку 2.3 представлено систему, яка складається з трьох мас: вібраційної площадки з масою m_p , що приводиться в дію віброзбуджувачем; привантажувача з масою m_t (включаючи змінні додаткові маси m_d), на якому встановлено два віброзбуджувачі; а також

підпружиненої маси m_s , здатної здійснювати відносні коливання відносно привантажувача.



1 – рама; 2 – форма; 3 – пружна опора; 4 – вібробуджувач; 5 – привантажувач; 6 – додаткова підпружинена маса; 7 – арматурний каркас; 8 – гіпсокартон; 9 – бетонна суміш; 10 – пружина

Рисунок 2.3 – Вібраційна установка з привантажувачем з підпружиненою масою

Враховуючи наявність підпружиненої маси m_s , що встановлена на привантажувачі й виконує відносні коливання, сформулюємо систему диференціальних рівнянь руху (2.10).

Позначимо k_s , c_s – жорсткість та демпфування пружної системи підпружиненої маси.

x_s – зміщення підпружиненої маси.

$$\begin{cases} m_p \ddot{x}_p + c_p (\dot{x}_p - \dot{x}_t) + k_p (x_p - x_t) = F_p \cos(\omega_p t) \\ m_t \ddot{x}_t + c_p (\dot{x}_t - \dot{x}_p) + k_p (x_t - x_p) + \\ + c_s (\dot{x}_t - \dot{x}_s) + k_s (x_t - x_s) = (F_1 + F_2) \cos(\omega t) \\ m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t) + k_s (x_s - x_t) = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

Пружність підпружиненої маси визначає частоту її власних коливань:

$$\omega_s = \sqrt{\frac{k_s}{m_s}}. \quad (2.11)$$

Якщо $\omega = \omega_s$, підпружинена маса буде мати максимальну амплітуду.

Зміна жорсткості або маси k_s або маси m_s впливає на резонансні властивості підпружиненої системи.

Демпфування c_s зменшує ефект резонансу, але може впливати на ефективність ущільнення.

Сумарна маса m_t привантажувача та його додаткових вантажів визначає ефективну передану силу.

Керування фазами F_1 та F_2 дозволяє змінювати результуючі коливання привантажувача.

Пульсуюча сила вібрації, що передається бетонній суміші, враховує дію всіх вібруючих елементів.

Сумарна сила дії системи на бетонну суміш складається з гармонічно змінних сил від кожного елемента:

$$F_{BC} = m_t \ddot{x}_t + m_s \ddot{x}_s + k_b x_t + c_b \dot{x}_t. \quad (2.12)$$

Оскільки рух елементів описується гармонічними коливаннями $x_t = A_t \cos(\omega t)$ та $x_s = A_s \cos(\omega t)$, тоді прискорення визначається за формулою (2.13) та (2.14):

$$\ddot{x}_t = A_t \omega^2 \cos(\omega t), \quad (2.13)$$

$$\ddot{x}_s = A_s \omega^2 \cos(\omega t). \quad (2.14)$$

Підставляючи вирази (12) та (13) в рівняння (11) отримаємо

$$F_{BЦ} = -(m_t A_t + m_s A_s) \omega^2 \cos(\omega t) + k_b A_t \cos(\omega t) + c_b A_t \omega \sin(\omega t). \quad (2.15)$$

Розбиваючи на складові рівняння (14) отримуємо

$$F_{BЦ} = [k_b A_t - (m_t A_t + m_s A_s) \omega^2] \cos(\omega t) + c_b A_t \omega \sin(\omega t). \quad (2.16)$$

В результаті перетворювань отримуємо амплітуду пульсуючої сили

$$F_{BЦ, \max} = \sqrt{[k_b A_t - (m_t A_t + m_s A_s) \omega^2]^2 + (c_b A_t \omega)^2}. \quad (2.17)$$

Ця сила безпосередньо впливає на процес ущільнення бетонної суміші, сприяючи ефективне витіснення повітря та забезпечуючи рівномірний розподіл суміші у формі.

На схемі, представленій на рисунку 2.4, зображено конструкцію привантажувача, на якому позицією 11 позначено додаткові ударні елементи. Вони закріплені на підпружиненій масі та при її коливаннях здійснюють періодичні удари по основі привантажувача, що генерує додаткові імпульси, спрямовані на інтенсифікацію ущільнення бетонної суміші.

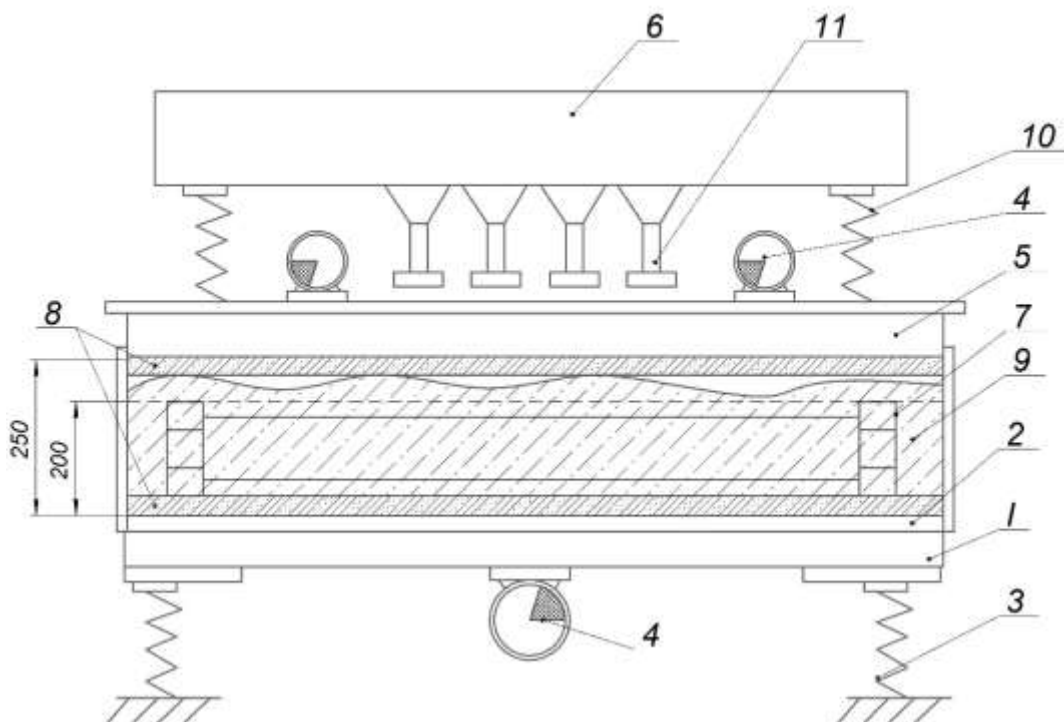


Рисунок 2.4 – Вібраційна установка з привантажувачем з підпружиненою масою та ударними елементами

Сила удару визначається імпульсним співвідношенням, яке враховує масу ударного елемента та зміну швидкості при зіткненні, відповідно до виразу:

$$F_{y\partial} = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m_u (v_{\partial o} - v_{\text{після}})}{\Delta t}, \quad (2.18)$$

де m_u – маса ударного елемента,

$v_{\partial o}$ – швидкість ударного елемента перед зіткненням,

$v_{\text{після}}$ – швидкість після удару (залежить від коефіцієнта відновлення e),

Δt – тривалість удару.

Швидкість перед ударом:

$$v_{\partial o} = A_s \omega, \quad (2.19)$$

Якщо удар частково пружний з коефіцієнтом відновлення e , то:

$$v_{\text{після}} = e v_{\partial o}, \quad (2.20)$$

Тоді сила удару буде записуватися виразом (2.21)

$$F_{y\partial} = \frac{m_u A_s \omega (1 - e)}{\Delta t}. \quad (2.21)$$

Енергія удару визначається як кінетична енергія ударного елемента перед зіткненням:

$$E_{y\partial} = \frac{1}{2} m_u v_{\partial o}^2. \quad (2.22)$$

Підставляючи швидкість

$$E_{y\partial} = \frac{1}{2} m_u (A_s \omega)^2. \quad (2.23)$$

Якщо враховувати втрати енергії через неповний пружний удар тоді вираз набуде наступного вигляду

$$E_{y\partial, \text{ef}} = E_{y\partial} (1 - e^2), \quad (2.24)$$

де e^2 – частина енергії, що зберігається після удару.

Частота ударів залежить від власних коливань системи та періоду взаємодії ударного елемента з привантажувачем. Якщо коливання системи описуються гармонічною функцією $x_s = A_s \cos(\omega t)$ то удари відбуваються при досягненні певного порогу положення $x_{y\partial}$, відповідно до фазового зміщення:

$$t_{y\partial} = \frac{\arccos(x_{y\partial} / A_s)}{\omega}. \quad (2.25)$$

Середня частота ударів:

$$f_{y\partial} = \frac{\omega}{2\pi}. \quad (2.26)$$

Враховуючи вплив ударів, рівняння руху системи доповнюється імпульсною складовою:

$$m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t) + k_s (x_s - x_t) = -F_{y\partial}(t), \quad (2.27)$$

де $F_{y\partial}(t)$ – імпульсна сила ударного елемента, яка діє в моменти ударів.

Середня ефективна сила ударів:

$$F_{y\partial, \text{сеп}} = \frac{E_{y\partial, \text{еф}}}{x_{y\partial}}. \quad (2.28)$$

При проведенні експериментальних досліджень [127] було встановлено, що вібраційний вплив недостатній та запропоновано перейти до віброударного ущільнення.

При переході до віброударного ущільнення, віброзбуджувач на вібраційній платформі замінюється кулачковим підйомним механізмом, який періодично піднімає платформу та різко її опускає на пружні обмежувачі (зображено на рисунку 2.5). Це створює віброударний режим, який взаємодіє з привантажувачем, що має два вібратори та підпружинену масу з ударними елементами.

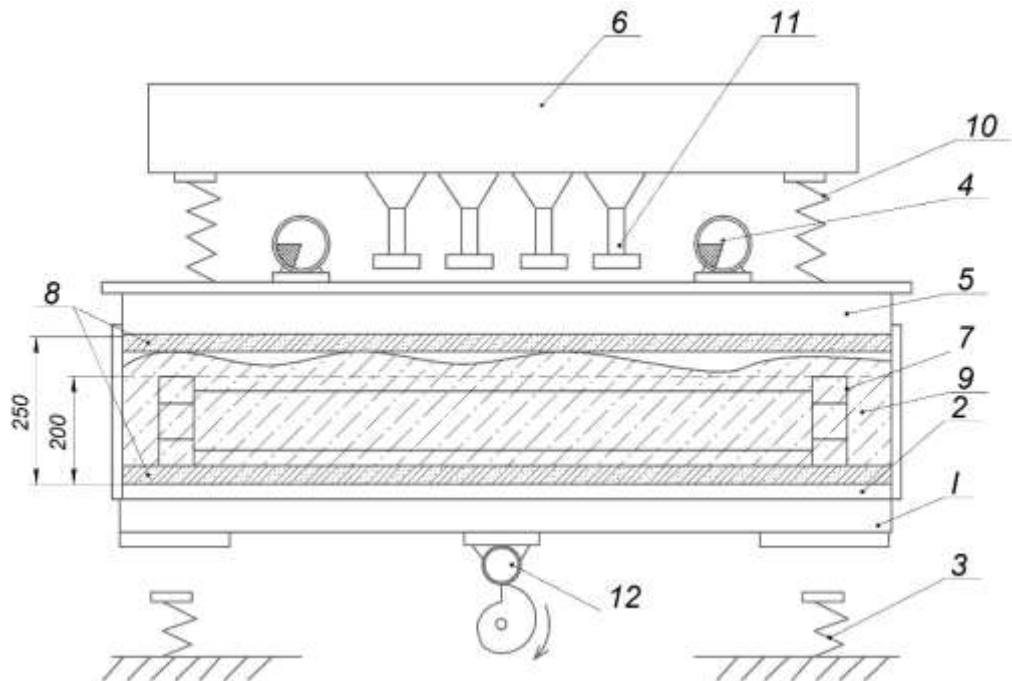


Рисунок 2.5 – Вібраційно-імпульсна установка з привантажувачем та підпружиненою масою та ударними елементами

Рух платформи в кожному циклі складається з:

Фази підйому:

$$x_p = h_0 - R \cos(\omega_c t), \quad (2.29)$$

де h_0 – початкова висота підйому,

R – ексцентриситет кулачкового механізму,

ω_c – кутова швидкість обертання кулачка.

Фази вільного падіння:

$$x_p = h_0 - \frac{1}{2} g t^2. \quad (2.30)$$

Час вільного падіння визначається з рівняння:

$$t_{nad} = \sqrt{\frac{2h_0}{n}}. \quad (2.31)$$

У момент удару платформи об пружні обмежувачі виникає імпульс сили:

$$F_{yd} = k_p (x_p - x_{обр}) + c_p (\dot{x}_p - \dot{x}_{обр}), \quad (2.31)$$

де k_p – жорсткість пружних обмежувачів,

c_p – коефіцієнт демпфування,

$x_{обр}$ – положення обмежувача.

Якщо удар неповністю пружний, враховується коефіцієнт відновлення

$$v_p^{нісля} = e_p v_p^{до} . \quad (2.32)$$

Взаємодія платформи з привантажуваче заключається в наступному привантажувач отримує імпульси від віброударної платформи, що створює складну коливальну систему.

$$m_t \ddot{x}_t + c_t (\dot{x}_t - \dot{x}_p) + k_t (x_t - x_p) = -F_{уд, сум} , \quad (2.33)$$

де

$$F_{уд, сум} = \sum F_{уд, вібр} + \sum F_{уд, уд} , \quad (2.34)$$

$\sum F_{уд, вібр}$ – сила від вібраторів привантажувача;

$\sum F_{уд, уд}$ – сума ударних імпульсів від підпружиненої маси.

Взаємодія привантажувача з підпружиненою масою та ударними елементами заключається в наступному, підпружинена маса m_s взаємодіє з привантажувачем m_t через пружини та ударні елементи:

$$m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t) + k_s (x_s - x_t) = -F_{уд, s} , \quad (2.35)$$

$F_{уд, s}$ – сила удару від ударних елементів:

$$F_{уд, s} = \frac{m_u A_s \omega_s (1 - e_s)}{\Delta t} , \quad (2.36)$$

а енергія удару:

$$E_{уд, s} = \frac{1}{2} m_u (A_s \omega_s)^2 (1 - e_s^2) . \quad (2.37)$$

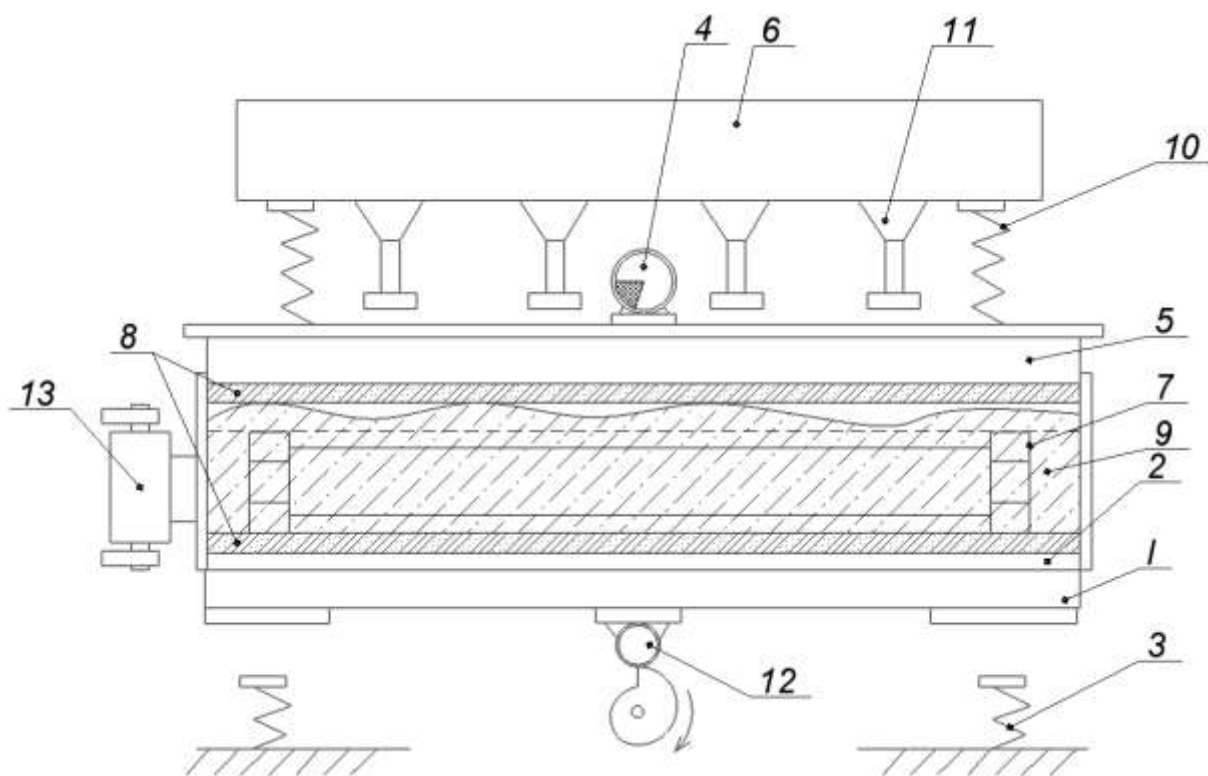
Загальна динамічна модель системи рівнянь для повної взаємодії включає три взаємопов'язані маси: платформи, привантажувача, підпружиненої маси.

$$\begin{cases} m_p \ddot{x}_p + c_p (\dot{x}_p - \dot{x}_t) + k_p (x_p - x_t) = -F_{y\partial, \Pi} \\ m_t \ddot{x}_t + c_t (\dot{x}_t - \dot{x}_p) + k_t (x_t - x_p) = -(F_{y\partial, \text{сум}} + F_{y\partial, s}) \\ m_s \ddot{x}_s + c_s (\dot{x}_s - \dot{x}_t) + k_s (x_s - x_t) = -F_{y\partial, s} \end{cases} \quad (2.38)$$

Провівши аналіз можливих конструктивних рішень і врахувавши наукові рекомендації [76, 88, 102], можна зробити висновок, що для ефективного ущільнення легкобетонних сумішей доцільним є поєднання вертикальних імпульсів з горизонтально спрямованими коливаннями. Така комбінація динамічних впливів сприяє не лише більш рівномірному ущільненню по всьому об'єму форми, але й покращує рухливість частинок у суміші, що зменшує зону утворення порожнин та покращує контакт між заповнювачем і цементним каменем. У результаті забезпечується підвищення однорідності та щільності матеріалу, що особливо важливо при формуванні легких бетонів зі зниженими показниками щільності та підвищеною пористістю. Пропонується для ущільнення легкобетонних сумішей комплект обладнання для ущільнення (рисунк 2.6) який включає установку вібраційно-імпульсну з горизонтально направленим віброзбуджувачем та вібраційним привантажувачем з ударними елементами.

Принцип роботи обладнання наступний.

На дно форми попередньо укладається лист гіпсокартону, після чого монтується арматурний каркас і форма заповнюється легкобетонною сумішшю. Для початкового розподілення маси суміші вмикається віброзбуджувач, що забезпечує її більш рівномірне укладання в об'ємі. Після завершення попереднього етапу на поверхню суміші встановлюється верхній лист гіпсокартону, а зверху – привантажувач.



1 – Рухома рама вібраційної установки, 2– форма, 3 – пружні обмежувачі руху, 4 – вібробуджувач привантажувача, 5 – привантажувач, 6 – рухома маса привантажувача, 7 – арматурний каркас, 8 – зовнішній каркас панелі, 9 – бетона суміш, 10 – пружини, 11 ударні елементи, 12 – кулачковий механізм, 13 – вібробуджувач

Рисунок 2.6 – Вібраційно-імпульсна установка з горизонтально направленими коливаннями та привантажувачем із підпружиненою масою та ударними елементами

Наступною фазою є вмикання електродвигуна кулачкового механізму, який піднімає рухому раму, одночасно вмикаються вібробуджувачі, розміщені як на формі, так і на привантажувачі. У результаті комбінації вібраційних коливань і періодичних імпульсів починає коливатися інерційна маса, встановлена на привантажувачі. Вона здійснює удари ударними елементами по нижній частині привантажувача, що генерує додаткові вертикальні імпульси [30].

Цей механізм співударяння забезпечує інтенсивне ущільнення бетонної суміші, покращуючи її структуру за рахунок ефективного

витіснення повітря, зниження пустотності та рівномірного розподілу частинок по всьому об'єму форми. Такий режим роботи установки особливо ефективний для формування легких бетонів із підвищеними вимогами до однорідності та щільності.

Під час удару виникає вібрація, яка передається на ущільнюючу бетонну суміш, сприяючи її ущільненню та витісненню повітря. Ефективність цього процесу значною мірою залежить від жорсткості самої суміші: чим в'язкіша та менш податлива суміш, тим потужнішим має бути вплив. Для адаптації установки до різних типів сумішей передбачено можливість регулювання жорсткості пружних елементів (поз. 3). Це дозволяє змінювати динамічну характеристику системи, підбираючи оптимальний режим вібраційно-ударного впливу відповідно до властивостей конкретної бетонної суміші, забезпечуючи максимальну ефективність ущільнення.

2.3 Релаксаційні явища при ущільненні арболітових та полістиролбетонних сумішей.

Полістиролбетонні та арболітові суміші належать до класу в'язкопружних пористих середовищ, що характеризуються складною механічною поведінкою під час динамічного ущільнення [82]. Обидва типи сумішей мають багатокomпонентну структуру: полістиролбетон складається з гранул пінополістиролу, цементно-піщаної матриці та системи повітряних пор, тоді як арболіт містить органічні заповнювачі, зокрема деревну стружку, яка формує пористу волокнисту структуру.

Об'єднуючим фактором для цих матеріалів є прояв релаксаційних властивостей – здатності до поступового зниження напружень після припинення навантаження, що зумовлено як внутрішнім тертям, так і пружністю заповнювачів. У випадку полістиролбетону така поведінка добре описується диференціальними рівняннями теорії в'язкопружності,

оскільки комбінація жорсткої цементної фази та м'якого пінополістиролу створює середовище з амплітудно-залежною жорсткістю [103]. Арболітові суміші, зі свого боку, проявляють виражену здатність до деформацій і затримку відновлення форми через гігроскопічність і пружність органічного заповнювача, що впливає на формування міжчастинкових контактів.

Для моделювання релаксаційних процесів в арболітових сумішах часто використовується модель Кельвіна–Фойгта. Ця модель представляє матеріал як комбінацію пружного елемента (пружина) та в'язкого елемента (демпфер), з'єднаних паралельно [76]. Рівняння моделі має вигляд:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \eta \frac{d\varepsilon(t)}{dt}, \quad (2.39)$$

де $\sigma(t)$ – напруження,

$\varepsilon(t)$ – деформація,

E – модуль пружності,

η – коефіцієнт в'язкості,

$\frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ – швидкість деформації.

Ця модель дозволяє описати повільне зменшення напружень у часі після припинення навантаження, що є характерним для арболітових сумішей.

При моделюванні процесу ущільнення полістиролбетонних сумішей доцільно також застосовувати модель Кельвіна–Фойгта, яка враховує як миттєву пружну реакцію, так і затриману в'язку відповідь. Дослідження показують, що час релаксації для таких сумішей може становити від 0,02 до 0,18 с, залежно від складу та умов ущільнення.

У випадку гармонічного навантаження від вібраційної установки, де зовнішнє навантаження має вигляд:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \sin(\omega t), \quad (2.40)$$

суміш реагує з фазовим зсувом, а деформація описується рівнянням:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega t + \phi), \quad (2.41)$$

де ϕ – фазовий зсув, залежний від співвідношення η / E ;

ω – частота зовнішнього навантаження.

Для багат шарового середовища (ущільнювана маса знаходиться у формі), система «вібруюча платформа – полістиролбетон» може бути змодельована як масово-пружна система з демпфуванням:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F_0 \cdot \sin(\omega t), \quad (2.42)$$

де m – маса ущільнюваного шару,

c – демпфуючий коефіцієнт (визначає внутрішні втрати в бетоні),

k – жорсткість системи (ефективна жорсткість суміші),

F_0 – амплітуда зовнішньої сили,

$x(t)$ – переміщення (деформація) суміші.

Частота, при якій відбувається резонансне ущільнення, визначається як:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (2.43)$$

Ефективне ущільнення досягається, коли частота збудження ω близька до власної частоти системи ω_0 , але при цьому необхідно контролювати величину демпфування, щоб не перевищити критичне затухання. Для цього визначається декремент затухання:

$$\delta = \frac{c}{2\sqrt{km}}. \quad (2.44)$$

Зі зростанням вмісту пінополістиролу коефіцієнт демпфування зростає через більшу кількість контактних втрат та пружність заповнювача, що вимагає коригування частоти вібраційного впливу.

Для дослідження релаксації після припинення вібрацій можна використовувати рівняння експоненціального спаду деформації:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot e^{-t/\tau}, \quad (2.45)$$

де $\tau = \eta / E$ – релаксаційний час, який у полістиролбетоні становить 0.02–0.2 с залежно від складу.

Таким чином, ефективне ущільнення полістиролбетонної суміші передбачає забезпечення частоти вібрацій, що не перевищує релаксаційну здатність матеріалу, а також врахування демпфувальних властивостей та зниження ймовірності структурного руйнування.

Арболітова суміш є складною композицією на основі цементного в'язучого, органічного заповнювача (деревна тріска або подрібнена солома), води та, іноді, модифікаторів. Внаслідок природної волокнистої структури заповнювача та його здатності до набухання й капілярної взаємодії з рідкою фазою, арболіт має виражену в'язкопружну природу.

Для опису напружено-деформованого стану арболітової суміші в процесі ущільнення доцільно використовувати модель Максвелла, яка добре описує матеріали з домінуванням в'язких релаксаційних властивостей у початкові моменти навантаження. У цій моделі пружна складова (пружина з модулем E) та в'язка (демпфер з в'язкістю η) з'єднані послідовно:

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{1}{E_1} \cdot \frac{d\sigma(t)}{dt} + \frac{\sigma(t)}{\eta}. \quad (2.46)$$

Після припинення зовнішнього впливу, наприклад, вібрації чи тиску, спостерігається релаксація напружень, яку описує експоненціальне затухання:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot e^{-t/\tau}. \quad (2.47)$$

Час релаксації τ залежить від вмісту води, типу заповнювача та попередньої механічної обробки суміші. Згідно з дослідженням [80], час релаксації у вологому стані може перевищувати 0.5 с, що унеможливорює використання надвисоких частот ущільнення без ризику порушення міжчастинкових зв'язків.

Також, при довготривалому ущільненні суміші з високим вмістом деревини можна спостерігати пластичне накопичення деформації. У цьому випадку використовується узагальнена модель Больцмана–Фогеля, яка враховує розподіл релаксаційних часів:

$$\sigma(t) = \int_0^t G(t - \xi) \cdot \frac{d\varepsilon(\xi)}{d\xi} d\xi, \quad (2.48)$$

де $G(t)$ – ядро релаксації, яке залежить від вологості та часу витримки.

При вібраційному ущільненні в реальних умовах процес можна описати за допомогою масово-пружної системи з демпфуванням, як у полістиролбетоні:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t), \quad (2.49)$$

але коефіцієнт c буде суттєво більшим унаслідок внутрішнього тертя та капілярних втрат у пористому деревному заповнювачі. Визначення цих параметрів можливе на основі експериментальної кривої крихкої релаксації в стандартних умовах ущільнення.

2.4 Дослідження хвильових процесів, що виникають при ущільненні легкобетонних розчинів

Конструкція запропонованої установки для ущільнення легких бетонів передбачає комбіновану дію горизонтальних коливань і періодичних вертикальних імпульсів, що реалізується за допомогою горизонтального віброзбуджувача (поз. 13 на рис. 2.6) та привантажувача з ударними елементами (поз. 5, 6, 11). Така система дозволяє створити складний динамічний режим ущільнення, в якому бетонна суміш зазнає як горизонтального зрізу, що активізує переміщення частинок, так і вертикального ударного навантаження, що забезпечує осідання та ущільнення матеріалу. Рух середовища, що ущільнюється в напрямку вертикальної координати Z , під дією привантажувача з періодичними

імпульсами та горизонтально розташованого віброзбуджувача зображено на розрахунковій схемі динамічної системи «віброплощадка – ущільнюєме середовище–привантажувач» (рисунку 2.7).

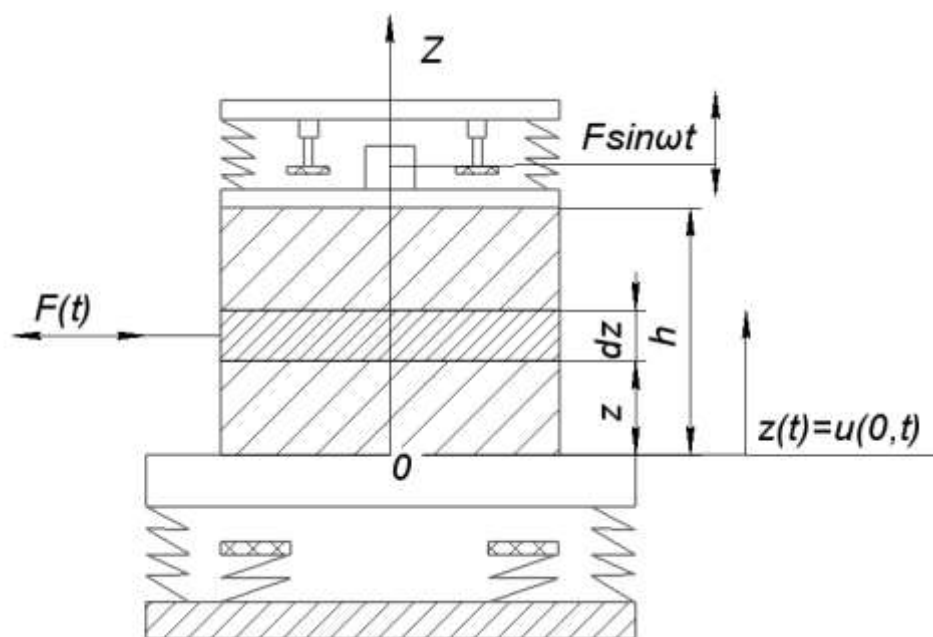


Рисунок 2.7 – Розрахункова схема динамічної системи «віброплощадка – ущільнюєме середовище–привантажувач».

Особливість дії установки полягає в чергуванні фаз горизонтального вібраційного впливу з періодичними імпульсами від ударів рухомої маси привантажувача, яка викликає короткочасне, але потужне навантаження на поверхню бетонної суміші через верхній шар гіпсокартону. Це збудження передається вглиб матеріалу, викликаючи хвильовий процес ущільнення в напрямку вертикальної координати z .

Процеси ущільнення легкобетонних сумішей, зокрема арболітових і полістиролбетонних, супроводжуються складними хвильовими явищами, обумовленими впливом імпульсних та періодичних навантажень. Для адекватного опису механізму передачі імпульсу через середовище легкого бетону необхідно розглядати деформацію середовища як хвильовий процес у в'язкопружному тілі.

Побудова математичної моделі базується на записі рівнянь руху елемента об'єму ΔV під дією імпульсу. Припускаючи, що швидкість

переміщення частинок значно менша за швидкість звуку, повне прискорення можна замінити локальним:

$$\xi = \frac{\partial \zeta}{\partial t}, \quad (2.50)$$

де $\zeta(x, t)$ переміщення частинок у момент часу t в точці x .

Рівняння балансу сил для елемента Δv із урахуванням змінного тиску і локального прискорення набуває вигляду:

$$\rho a l \Delta x \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = -a l \Delta x \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(E \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} \right) + k_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right), \quad (2.51)$$

що, після скорочення на $a l \Delta x$, перетворюється на:

$$\rho \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + k_0 \frac{\partial \zeta}{\partial t}, \quad (2.52)$$

або у канонічній формі

$$\frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} + \frac{k_0}{\rho} \frac{\partial \zeta}{\partial t} = \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}. \quad (2.53)$$

Таким чином, ущільнювана суміш поводить себе як в'язкопружне хвильове середовище, що передає імпульси із затуханням амплітуди внаслідок внутрішнього тертя.

Спрощений випадок без затухання.

У разі нехтування ефектами затухання (тобто $k_0 = 0$) хвильовий процес описується класичним хвильовим рівнянням:

$$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2}, \quad (2.54)$$

де $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – фазова швидкість поширення збурення у бетонній

суміші.

Граничні та початкові умови.

Для практичного розгляду задачі ущільнення вводяться наступні початкові та граничні умови (див. рівняння (2.7)–(2.10) на сторінці 50):

Початково: частинки середовища перебувають у стані спокою:
 $\zeta(x, 0) = 0$, (при $t = 0$ зміщення ζ в будь-якій точці x дорівнює нулю,
 тобто початково система знаходиться без деформацій).

$$\frac{\partial \zeta(x, 0)}{\partial t} = 0, \quad (2.55)$$

система починає рух без початкового імпульсу без початкової швидкості)

На вільній поверхні ($x = H$):

$$\frac{\partial \zeta(H, t)}{\partial x} = 0. \quad (2.56)$$

На робочій поверхні ($x = 0$), де діє імпульсне навантаження:

$$\zeta(0, t) = \mu(t), \quad (2.57)$$

де $\mu(t)$ описує форму та тривалість імпульсу.

Розв'язання рівняння хвиль при заданих умовах отримується методом поширення хвиль. Загальне рішення для часу до першого відбиття хвилі записується у вигляді:

$$\zeta(x, t) = \mu\left(t - \frac{x}{c}\right). \quad (2.58)$$

При подальшому врахуванні відбиття хвиль від вільної поверхні (в точці $x = H$) рішення ускладнюється і має форму суми кількох хвильових фронтів.

Для випадку з урахуванням згасання хвильовий процес описується рівнянням:

$$\begin{aligned} \zeta(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \left[\mu\left(t - \frac{x + 2nH}{c}\right) e^{-\beta^*(x + 2nH)} - \right. \\ \left. - \mu\left(t + \frac{x - 2nH}{c}\right) e^{-\beta^*(x - 2nH)} \right] (-1)^n + \\ + \mu\left(t - \frac{x}{c}\right) e^{-\beta^* x} \end{aligned} \quad (2.59)$$

де β^* – коефіцієнт згасання в середовищі.

Ущільнення легкобетонних сумішей під дією імпульсного навантаження супроводжується виникненням серій хвиль переміщення, що інтенсивно взаємодіють у середовищі через відбиття від вільних та закріплених меж форми. Інтерференція прямих і відбитих хвиль призводить до локального ущільнення, яке розповсюджується у вигляді хвильових фронтів.

Особливості в'язкопружної поведінки легких бетонів, таких як арболіт і полістиролбетон, обумовлюють необхідність врахування затухання, щоб правильно оцінити глибину та рівномірність ущільнення матеріалу.

2.5 Особливості хвильових процесів в арболітових сумішах при ущільненні

Арболітові суміші представляють собою багатокомпонентні матеріали з органічним заповнювачем (деревна тріска, подрібнена солома), цементним в'язучим і водою. Наявність волокнистого заповнювача та висока пористість суміші істотно впливають на характер поширення деформаційних імпульсів у середовищі при ущільненні.

Основною особливістю арболітової суміші є її виражена в'язкопружна природа, яка суттєво відрізняє її від класичних важких бетонів.

Пружна складова: за рахунок наявності деревини арболіт зберігає здатність деформуватися пружно при невеликих навантаженнях, забезпечуючи відносно високу відновлюваність об'єму після зняття навантаження.

В'язка складова: високий вміст вологи і складна структура волокон сприяють значному внутрішньому тертю, що обумовлює високий рівень затухання імпульсів.

Процес поширення хвиль у арболітових сумішах описується модифікованим хвильовим рівнянням з урахуванням демпфування формулою (2.60).

Через значний вплив затухання коефіцієнт k_0 має відносно великі значення, що приводить до швидкого загасання амплітуди хвильових фронтів на відстані від джерела імпульсу.

2.5.1 Фізичні особливості поширення імпульсів

Швидкість поширення хвиль у арболітових сумішах значно нижча, ніж у щільних важких бетонах, через малу густину і низький модуль пружності [122]. Типове значення фазової швидкості:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \approx 50 - 150 \text{ м/с}. \quad (2.60)$$

Високий рівень затухання. Через волокнисту структуру енергія імпульсу швидко втрачається у процесі в'язкого поглинання, що потребує застосування імпульсів більшої амплітуди або комбінованого вертикально-горизонтального ущільнення.

Поведінка відбитих хвиль. У арболітовій суміші відбиття імпульсу від вільної поверхні супроводжується частковою втратою енергії й фазовим зсувом, що ускладнює формування рівномірної ущільненої структури.

Резонансні ефекти. Враховуючи швидке затухання та невеликі розміри виробів, збудження стоячих хвиль малоймовірне. Ущільнення відбувається здебільшого за рахунок локального поширення окремих імпульсів.

Неоднорідність ущільнення. Через варіації у локальній щільності деревного заповнювача відбувається нерівномірне затухання імпульсів, що

призводить до необхідності спеціальної оптимізації розташування джерел пульсацій.

Практичні рекомендації для ущільнення арболітових сумішей.

Оптимальний режим ущільнення повинен передбачати імпульси з тривалістю не менше, ніж характерний час релаксації матеріалу ($\tau \approx 0,2 - 0,5$ с).

Частота імпульсів для ефективного ущільнення повинна бути невисокою: 2 – 4 Гц.

Амплітуда імпульсного прискорення повинна перевищувати $2 - 3g$, але не бути надлишковою, щоб уникнути руйнування структури волокон.

2.5.2 Розповсюдження коливань в арболітовій суміші від імпульсних джерел коливань та горизонтальної вібрації

Процеси ущільнення арболітових сумішей із застосуванням одночасного вертикального імпульсного навантаження та горизонтальної вібрації характеризуються складною хвильовою динамікою у в'язкопружному середовищі [123].

Арболітова суміш як багатокомпонентне середовище з волокнистим заповнювачем і цементною матрицею має високу в'язкість та низький модуль пружності. Це обумовлює швидке затухання прямих імпульсних хвиль, але водночас дозволяє ефективно збуджувати пружні зсувні коливання при горизонтальній вібрації.

Загальна модель розповсюдження коливань. Систему впливів можна описати як дію двох збуджуючих полів:

вертикальні імпульсні хвилі, що передаються знизу вгору через товщу суміші;

горизонтальні коливання від віброзбуджувача, що генерують поздовжні та поперечні хвилі.

Математично задача описується системою хвильових рівнянь для вертикального $(\zeta_v(x,t))$ та горизонтального $(\zeta_h(x,t))$ переміщень:

Для вертикального

$$\rho \frac{\partial^2 \zeta_v}{\partial t^2} = E \frac{\partial^2 \zeta_v}{\partial x^2} + k_0 \frac{\partial \zeta_v}{\partial t}, \quad (2.61)$$

де E – модуль Юнга (пружності),

k_0 – коефіцієнт демпфування для вертикальної деформації,

$\frac{\partial^2 \zeta_v}{\partial t^2}$ – прискорення (друга похідна за часом),

$\frac{\partial^2 \zeta_v}{\partial x^2}$ – кривизна (друга похідна за простором) означає другу часткову

похідну функції $\zeta_v(x,t)$ за просторовою координатою x та показує, наскільки сильно змінюється нахил (градієнт) зміщення у просторі,

$\frac{\partial \zeta_v}{\partial t}$ – швидкість зміщення (перша похідна за часом).

Для горизонтального

$$\rho \frac{\partial^2 \zeta_h}{\partial t^2} = G \frac{\partial^2 \zeta_h}{\partial x^2} + k_1 \frac{\partial \zeta_h}{\partial t}, \quad (2.62)$$

де G – модуль зсуву (модуль зсувної пружності),

k_1 – коефіцієнт демпфування для горизонтальних коливань,

$\frac{\partial^2 \zeta_h}{\partial t^2}$ – прискорення,

$\frac{\partial^2 \zeta_h}{\partial x^2}$ – кривизна просторового розподілу,

$\frac{\partial \zeta_h}{\partial t}$ – швидкість горизонтального зміщення.

Характеристика вертикального імпульсного поля. Імпульсні джерела задають переміщення нижньої межі форми за законом $\zeta_v(0,t) = \mu(t)$, де

$\mu(t)$ – форма імпульсу (наприклад, імпульс одиничної тривалості або обмежена синусоїда).

Крайова умова для задачі коливань, яка розглядається, означає, що у точці $x = 0$ вертикальне зміщення ζ_v точно визначається заданою функцією часу $\mu(t)$. Тобто, на краю $x = 0$ прикладено відоме кероване навантаження або збурення. Такий тип крайової умови зазвичай моделює дію вібраційного приводу або прикладення періодичного чи довільного імпульсного навантаження.

Поширення хвиль від імпульсних джерел відбувається відповідно до рівнянь плоскої хвилі із затуханням:

$$\zeta_v(x, t) = \mu\left(t - \frac{x}{c_v}\right) e^{-\beta_v x}, \quad (2.63)$$

де $c_v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – фазова швидкість,

β_v – коефіцієнт затухання хвилі через в'язкі властивості суміші.

Імпульсне навантаження створює хвильовий фронт, що поширюється вгору, викликаючи локальне ущільнення частинок і капілярний дренаж вологи.

2.5.3 Характеристика горизонтального вібраційного поля

Горизонтальні коливання задаються постійною частотою ω і амплітудою A_h , переміщення записується як:

$$\zeta_h(x, t) = A_h \sin(\omega t - k_h x) e^{-\beta_h x}, \quad (2.64)$$

де $k_h = \omega / c_h$ – хвильовий вектор для горизонтальної вібрації,

$c_h = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ – швидкість зсувних хвиль,

β_h – коефіцієнт затухання для горизонтальних хвиль.

При накладанні вертикальних імпульсів і горизонтальної вібрації виникають явища інтерференції, що сприяють інтенсифікації ущільнення. У випадку збігу фаз вертикальної і горизонтальної хвиль можлива поява локальних зон підвищеного ущільнення, які формуються за умов:

$$\omega t - k_h x = \omega \left(t - \frac{x}{c_h} \right) \approx 0 \Rightarrow x \approx c_h t, \quad (2.65)$$

тобто на певних відстанях від джерела горизонтального збудження утворюються області резонансного підсилення ущільнення.

За даними досліджень [82], такі зони сприяють зменшенню пористості на 10–15% у порівнянні з випадком лише вертикального імпульсного ущільнення.

2.5.4 Явище інтерференції і його вплив на формування хвильового поля в арболітовій суміші

У процесі ущільнення арболітових сумішей за допомогою імпульсних джерел вертикальної дії та горизонтальних віброзбуджувачів ключову роль відіграє інтерференція хвиль, зумовлена відбиттям імпульсів на межах середовища, таких як дно форми або вільна поверхня.

Інтерференція виникає внаслідок накладання вхідних та відбитих імпульсних хвиль при різних фазових співвідношеннях. Залежно від відносної фази та напрямку хвиль, у середовищі утворюються:

- зони посилення деформації, що сприяють локальному ущільненню,
- зони погашення (мінімумів амплітуд), що можуть призводити до недоуплотнення.

Як показано в роботах [80], інтерференційні явища найбільш виражені в високих елементах (висотою понад 300 мм), де довжина хвиль порівнюється з розмірами виробу. У таких випадках нерівномірне ущільнення часто спостерігається на висоті $\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{3}$ від поверхні, де хвилі частково погашають одна одну.

2.5.4.1 Математичне представлення з урахуванням інтерференції

Розглядаючи вертикальну дію імпульсів від дна, а також відбиття від вільної поверхні, переміщення в точці x описується виразом (за модифікованим рівнянням (2.17)):

$$\zeta(x, t) = \mu\left(t - \frac{x}{c}\right)e^{-\beta^* x} + \mu\left(t + \frac{x - 2H}{c}\right)e^{-\beta^*(2H - x)}, \quad (2.66)$$

де $\mu(t)$ – форма збуджуючого імпульсу,

β^* – ефективний коефіцієнт затухання з урахуванням в'язкопластичних властивостей арболіту,

H – висота шару суміші,

$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ – швидкість хвилі в суміші.

При цьому:

на малій висоті шару (до 50 мм) коливальна енергія досягає верхньої межі з незначними втратами;

при висоті 100–150 мм спостерігається значне зниження амплітуди відбитої хвилі;

на висотах понад 200 мм хвильова енергія практично повністю дисипується у нижній половині шару, що ускладнює однорідне ущільнення верхніх зон.

У разі використання кількох імпульсних джерел із фазовим зміщенням і відстанню між ними кожен імпульс враховується окремо, а

ефект інтерференції відбивається в сумі затухаючих хвильових компонентів.

2.5.4.2 Практичне значення інтерференції для ущільнення

Оптимізація частоти імпульсів дозволяє мінімізувати накладання відбитих і вхідних хвиль у протифазі.

Регулювання часу подачі імпульсів (періоду T) згідно співвідношення: $\frac{H}{T} \approx \frac{1}{c}$ дає змогу уникнути зворотного гальмування ущільнення через фазове зсування.

Розміщення кількох пульсаторів із просторовим зсувом у горизонтальній площині дозволяє реалізувати суперпозицію скоординованих хвиль, що призводить до рівномірного ущільнення суміші по всій товщі.

Зона дії інтерференції обмежена з обох боків параболою:

$$y = \frac{1}{\lambda}(x_2 - a)^2, \quad y = \frac{1}{\lambda}(a - x_1)^2. \quad (2.67)$$

Крива має форму «подвійної чаші» (використовується, зокрема, в механіці для опису нестійкої рівноваги або в квантовій фізиці як потенціал Хіггса) що дозволяє просторово моделювати області ефективного ущільнення.

Інтерференційні хвилі є потужним інструментом для керування ущільненням арболітових сумішей, проте без урахування їхнього впливу можливе недоуплотнення у критичних зонах. Раціональна комбінація частоти, фази та кількості імпульсів дозволяє досягти оптимальної однорідності структури навіть при складних перерізах та значній висоті елементів.

2.6 Аналіз спектрів коливань імпульсних режимів ущільнення для арболіту та полістиролбетону

Через високий коефіцієнт демпфування й низьку щільність сумішей арболіту та полістиролбетону для їх ефективного ущільнення важливо враховувати не лише амплітуду динамічного збудження, а й спектральну структуру імпульсних впливів [Ошибка! Источник ссылки не найден.].

Розглянемо функцію збудження як періодичну імпульсну функцію $f(t)$, розкладену в ряд Фур'є:

$$f(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T}t - \varphi_k\right), \quad (2.68)$$

де C_k – амплітуди гармонік,

C_0 – середнє (постійне) значення функції,

φ_k – фази,

$\frac{2\pi k}{T}$ – частоти кратні основній (період T).

Основна частота коливань задається як:

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{T}, \quad \omega_k = k\omega_1, \quad (2.69)$$

де ω_k – кутова частота k -тої гармоніки,

k – номер гармоніки (ціле число: $k = 1, 2, 3, \dots$).

Ряд можна подати в іншому вигляді синусів і косинусів:

$$f(t) = C_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left(a_k \cos\left(\frac{2\pi k}{T}t\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi k}{T}t\right) \right), \quad (2.70)$$

a_k, b_k – коефіцієнти Фур'є, що визначають амплітуду k -тої гармоніки,

$a_k = C_k \cos \varphi_k$ – для косинусної складової (парна частина функції),

$b_k = C_k \sin \varphi_k$ – для синусної складової (непарна частина),

$$C_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad (2.71)$$

$$\tan \varphi_k = \frac{b_k}{a_k}. \quad (2.72)$$

Обчислення коефіцієнтів Фур'є

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos\left(\frac{2\pi k}{T} t\right) dt, \quad (2.73)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin\left(\frac{2\pi k}{T} t\right) dt, \quad (2.74)$$

$$C_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt. \quad (2.75)$$

З урахуванням загасання (демпфування) в матеріалі вираз для амплітуди зменшується на експоненту:

$$C_k(r) = C_k^0 \cdot e^{-\beta r}, \quad (2.76)$$

де β – коефіцієнт затухання (для арболіту $\beta \approx 15 - 25 \text{ м}^{-1}$, для ПСБ $\beta \approx 10 - 20 \text{ м}^{-1}$),

r – відстань поширення хвилі.

Модель спектру на границі збудження (трикутний імпульс)

$$f_i(t) = \begin{cases} 0, & t < \delta_i \\ \frac{\Delta t}{2h}(t - \delta_i), & \delta_i \leq t < \delta_i + h \\ \frac{\Delta t}{2h}(\delta_i + \Delta t - t), & \delta_i + h \leq t < \delta_i + \Delta t \\ 0, & t \geq \delta_i + \Delta t \end{cases}. \quad (2.77)$$

Спектр такої функції:

$$C_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_i(t) e^{-j \frac{2\pi k}{T} t} dt. \quad (2.78)$$

Резонанс досягається, коли:

$$\frac{T}{\Delta t} = 2k \Rightarrow \text{максимальна амплітуда на гармоніці } k$$

Загальний спектр з урахуванням інтерференції та загасання

$$C_k = \sqrt{\sum_{i=1}^m g(r_i) \left[\left(a_k^{(i)} \cos(k\psi_1) + b_k^{(i)} \sin(k\psi_1) \right)^2 + \left(a_k^{(i)} \sin(k\psi_1) - b_k^{(i)} \cos(k\psi_1) \right)^2 \right]}, \quad (2.79)$$

де $g(r_i)$ – загасання,

$$\psi_1 = \frac{2\pi}{T} t_1 - \text{зсув імпульсу.}$$

Основне узагальнене рівняння, яке враховує ущільнення арболіту або полістиролбетону під впливом імпульсного збудження, горизонтальних вібрацій та ударної взаємодії з обмежувачем, має вигляд:

$$\frac{\partial^2 \zeta(x, t)}{\partial t^2} = \frac{Fu}{m} \cdot \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + \frac{Fv}{m} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} t\right) + \alpha \gamma \mu \left(t - \frac{x}{c}\right) e^{-\beta x}, \quad (2.80)$$

де $\zeta(x, t)$ – зміщення частинок бетонної суміші;

Fu – сила удару рами при зіткненні з обмежувачем;

$z(t)$ – переміщення рами, кероване кулачковим механізмом;

Fv – сила горизонтального віброзбудження;

T – період пульсацій;

$\mu\left(t - \frac{x}{c}\right)$ – імпульсна функція з врахуванням запізнення

поширення;

β – коефіцієнт затухання;

α – коефіцієнт привантаження;

γ – коефіцієнт ущільнюваності для легких бетонів (арболіту, полістиролбетону);

m – маса рухомої рами;

c – швидкість поширення хвиль.

Розширене рівняння коливань системи «рама – бетонна суміш» з урахуванням усіх впливів:

$$\begin{aligned} \rho(x) \frac{\partial^2 \zeta(x, t)}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial \zeta(x, t)}{\partial t} - E(x) \frac{\partial^2 \zeta(x, t)}{\partial x^2} = \\ = \gamma \left[\alpha P(t) + \mu \left(t - \frac{x}{c} \right) e^{-\beta x} + A_h \sin(\omega_h t) + F_u(x, t) \right]. \end{aligned} \quad (2.81)$$

Ліва частина – внутрішня динаміка системи:

$\rho(x)$ – густина середовища (може змінюватись за координатою),

$\frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2}$ – прискорення (інерційний член),

$\eta \frac{\partial \zeta}{\partial t}$ – лінійне демпфування (в'язкість),

Права частина – зовнішні збудження:

γ – коефіцієнт ущільнюваності для легких бетонів (залежить від пористості, 0.25-0.45),

$\alpha P(t)$ – кероване навантаження,

$\mu \left(t - \frac{x}{c} \right)$ – затухаюча імпульсна хвиля (з урахуванням запізнення поширення вздовж x),

$A_h \sin(\omega_h t)$ – гармонічне збудження (горизонтальна вібрація).

$F_u(x, t)$ – ударне збудження при контакті з обмежувачем,

моделюється як:

$$F_u(x, t) = \delta(t - t_{\text{уд}}) \cdot F_{\text{макс}} \cdot \chi(x - x_{\text{обм}}), \quad (2.82)$$

де $\delta(t)$ – дельта-функція,

χ – локалізаційна функція в зоні удару.

Особливі режими.

Вертикальна пульсація з періодом T :

$$\mu(t) = h \cdot \sin\left(\frac{\pi t}{\Delta t}\right), \quad t \in [0, \Delta t]. \quad (2.83)$$

Горизонтальне гармонічне збудження:

$$A_h \sin(2\pi f_h t), \quad f_h = 25 \text{ Гц або } 50 \text{ Гц} . \quad (2.84)$$

Привантаження:

$$P(t) = P_0 + P_{\text{имп}}(t), \quad P_{\text{имп}}(t) = P_m \cdot \delta(t - t_i). \quad (2.85)$$

P_0 – статична або постійна складова навантаження,

$P_{\text{имп}}(t)$ – імпульсна складова навантаження,

P_m – амплітуда імпульсу,

$\delta(t - t_i)$ – дельта-функція Дірака, що задає миттєвий імпульс у момент часу $t = t_i$.

Рівняння яке включає внутрішні властивості середовища та сукупність збуджуючих сил, а саме динамічну дію горизонтальних та ударних збуджень, змінну структуру бетонної суміші по висоті

$$\rho(x) \frac{\partial^2 \zeta}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial \zeta}{\partial t} - E(x) \frac{\partial^2 \zeta}{\partial x^2} = \gamma \left[\begin{aligned} &\alpha P_0 + \sum_i P_m \cdot \delta(t - t_i) + \\ &+ h \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\Delta t} \left(t - \frac{x}{c}\right)\right) e^{-\beta x} + \\ &+ A_h \sin(2\pi f_h t) + \sum_j F_{\text{уд}}^{(j)}(x, t) \end{aligned} \right]. \quad (2.86)$$

де $\sum_i P_m \cdot \delta(t - t_i)$ – сума миттєвих імпульсів у часі t_i ,

$h \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\Delta t} \left(t - \frac{x}{c}\right)\right) e^{-\beta x}$ – згладжена імпульсна хвиля зі згасанням і

поширенням,

$A_h \sin(2\pi f_h t)$ – гармонічне збудження,

$\sum_j F_{\text{уд}}^{(j)}(x, t)$ – сума локальних ударних збуджень, можливо в різних

просторово-часових точках.

2.7 Динаміка імпульсно-вібраційних машин

Альтернативна динаміка імпульсно-вібраційних машин, призначених для ущільнення легких бетонів, таких як арболіт та полістиролбетон, враховує специфіку їх фізико-механічних властивостей, а також особливості імпульсного збудження й комбінованого впливу вертикальних і горизонтальних коливань. Основою нової моделі (рис 2.8) є двомасова система: маса m_1 представляє собою рухому раму з віброзбуджувачем, яка може відриватися і стикатися з обмежувачем коливань C , а маса m_2 – форму з бетонною сумішшю.

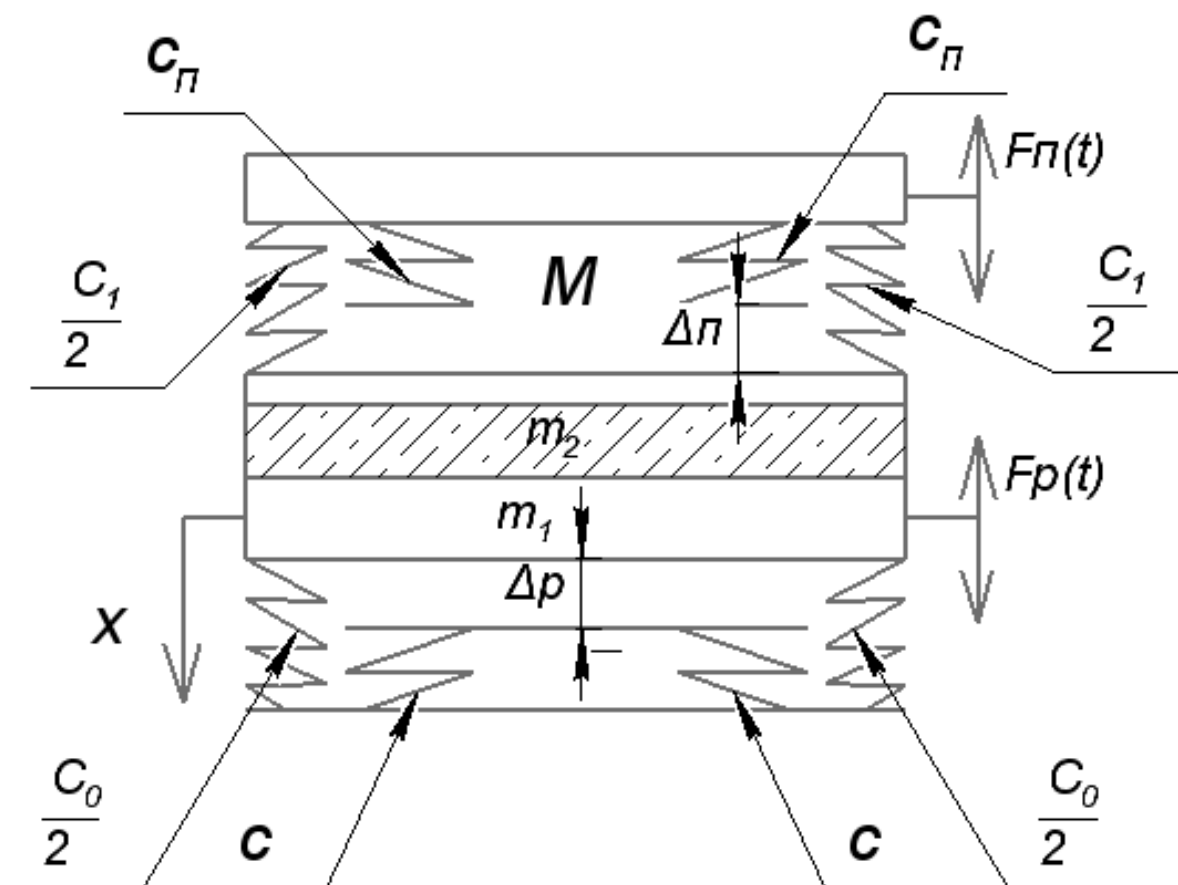


Рисунок 2.8 – Загальна розрахункова схема досліджувальної установки

Модель доповнюється привантажувачем (маса M), який створює постійний тиск на суміш, та віброзбуджувачем, що генерує гармонійні горизонтальні коливання.

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c_0(x_1 - \Delta_1) + \gamma_c(x_1 - x_2) + \\ + \zeta_\delta(x_1 - x_2)\dot{x}_1 = -F_1 - F_0 \cos(\omega t) + Mg, \\ m_2 \ddot{x}_2 + \gamma_c(x_2 - x_1) = -F_2 + \Psi f(\dot{x}_2, x_2) \end{cases} \quad (2.87)$$

де x_1, x_2 – переміщення рухомої та бетонної частини;

c_0 – жорсткість пружних опор;

γ – коефіцієнт структурного опору полегшеного бетону;

$\zeta_\delta(x_1 - x_2)\dot{x}_1$ – умовний імпульсний опір при зіткненні (модель удару);

$\Psi f(\dot{x}_2, x_2)$ – нелінійна сила, що описує енергетичні втрати в бетоні.

Під час відриву, коли контакт між масою m_1 і обмежувачем відсутній, рух описується рівняннями:

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_0(x_1 - \Delta_1) = -m_1 g - F_0 \cos(\omega t) + P, \quad (2.88)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -m_2 g, \quad (2.89)$$

де Δ_1 – попереднє стиснення

$F_0 \cos(\omega t)$ – горизонтальне гармонійне збудження,

$P = Mg$ – сила привантаження.

Щоб врахувати здатність легких бетонів до ущільнення під дією короткочасних імпульсів, вводиться коефіцієнт ущільнюваності:

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 - \frac{\rho_{\text{bulk}}}{\rho_{\text{max}}} \right), \quad (2.90)$$

ρ_{bulk} – щільність у насипному стані (до ущільнення),

ρ_{max} – поточна або цільова щільність матеріалу.

Функція енергетичних втрат у бетоні (емпірична):

$$f(\dot{x}_2, x_2) = \dot{x}_2^2 + \alpha x_2^2. \quad (2.91)$$

Залежність сили удару (імпульс):

$$I = m_1 \cdot (\dot{x}_1^- - \dot{x}_1^+) \Rightarrow \zeta \sim \frac{\Delta t}{I}. \quad (2.92)$$

Ці рівняння описують як вільний рух рами (з відривом), так і ударно-вібраційний режим із передачею імпульсу через обмежувач. Вони підходять для чисельного розв'язання (наприклад, методом Рунге-Кутта) для визначення оптимальних параметрів ущільнення арболіту чи полістиролбетону.

Система рівнянь з урахуванням відриву/контакту (удар).

Під час відриву, коли контакт між масою m_1 і обмежувачем відсутній, рух описується рівняннями:

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_0(x_1 - \Delta_1) = -m_1 g - F_0 \cos(\omega t) + P, \quad (2.93)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -m_2 g, \quad (2.94)$$

де c_0 – жорсткість опор,

Δ_1 – попереднє стиснення,

$F_0 \cos(\omega t)$ – горизонтальне гармонійне збудження,

$P = Mg$ – сила привантаження,

$$\Delta_1 = \frac{F_1 + F_2}{c_0}, \quad (2.95)$$

$F_1 = m_1 g$, $F_2 = m_2 g$ – сили тяжіння для кожної маси.

У режимі ударного контакту (тобто при $x_1 \geq x_2$) система набуває нелінійного характеру через появу додаткових сил пружності й дисипації:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + c_0(x_1 - \Delta_1) + \zeta(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + c(x_1 - x_2) = \\ = -m_1 g - F_0 \cos(\omega t) + P \end{aligned} \quad (2.96)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + \gamma c(x_2 - x_1) = -m_2 g, \quad (2.97)$$

де c – жорсткість обмежувача,

ζ – коефіцієнт дисипації удару,

γ – знижуючий коефіцієнт ефективності передачі енергії в умовах ущільнення легких бетонів.

2.7.1 Безрозмірна форма рівнянь руху ударно-вібраційної системи

Виходячи з наведених рівнянь (2.76)–(2.77), після приведення до узагальненої форми та з урахуванням зв'язку координат $x = x_2 - x_1$, виконується спрощення за умов:

$$c_0 x_1 \ll F_1 + F_2, \quad (2.98)$$

$$|x_1|_{\max} \ll \Delta_1 \text{ та з урахуванням } |c_0 \Delta_1 = F_1 + F_2.$$

Отримаємо рівняння в залежності від режиму.

Для режиму відриву $x \geq 0$:

$$\ddot{x} = -\frac{F_2}{m_2} + \frac{F_2}{m_1} + \frac{F_0}{m_1} \sin(\omega t). \quad (2.99)$$

Для режиму контакту $x < 0$

$$\ddot{x} + \left(\frac{c}{m_1} + \frac{c}{m_2} \right) x = \frac{m_1 - m_2}{m_1 m_2} F_2 + \frac{F_0}{m_1} \sin(\omega t). \quad (2.100)$$

Введемо безрозмірні змінні:

$$\tau = \omega t, \quad \eta_1 = \frac{m_1 \omega^2 x_1}{F_0}, \quad \eta_2 = \frac{m_1 \omega^2 x_2}{F_0}, \quad \eta = \eta_2 - \eta_1.$$

Враховуючи похідні за τ :

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{dx_i}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} = \omega \frac{dx_i}{d\tau}, \quad \frac{d^2 x_i}{dt^2} = \omega^2 \frac{d^2 x_i}{d\tau^2}. \quad (2.101)$$

Після підстановки отримаємо.

Режим відриву.

З урахуванням обох режимів, отримаємо основне рівняння для руху системи:

$$\ddot{x} + \left(\frac{c_0}{m_1} + \frac{c \cdot \chi(t)}{m_1} \right) \dot{x} + \frac{\zeta \cdot \chi(t)}{m_1} x = \frac{P}{m_1} - g - \frac{F_0}{m_1} \cos(\omega t), \quad (2.102)$$

де $\chi(t)$ – індикатор контакту (1 при контакті, 0 при відриві).

Динаміка ударно-вібраційного ущільнення легких бетонів у даній моделі визначається асиметрією руху рами, змінною фазою контакту, вертикальним привантаженням і горизонтальним збудженням. Це дозволяє врахувати як резонансно-імпульсні ефекти, так і локальні зони ущільнення під дією зосереджених імпульсів знизу (при ударі) й коливань збоку (від віброзбуджувача), що особливо важливо для неструктурованих сумішей, типу арболіту або полістиролбетону.

Для матеріалів із низькою щільністю (арболіт, полістиролбетон) вводимо коефіцієнт зниження пружності контакту:

$$\xi_{\text{лег}} = \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1 \cdot m_2} \cdot \frac{c_{\text{еф}}}{\omega^2}}. \quad (2.103)$$

Фізична інтерпретація: Параметр q описує відношення ваги системи до амплітуди збуджуючої сили. Параметр ξ відображає співвідношення власної частоти системи до частоти збудження:

$$\xi = \frac{\omega}{\omega_0}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m_{np}}}, \quad m_{np} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}.$$

2.7.2 Енергетичні та кінематичні характеристики ударно-вібраційної системи

У зоні стійкого періодичного коливання з відривом визначаємо амплітуду x_2 , швидкість v_2 та прискорення a_2 коливань форми з бетонною сумішшю (маса m_2) за формулами:

$$x_2 = \frac{F_0}{m\omega^2} \cdot k_x, \quad (2.104)$$

$$v_2 = \frac{F_0}{m\omega} \cdot k_v, \quad (2.105)$$

$$a_2 = \frac{F_0}{m} \cdot k_a, \quad (2.106)$$

k_x, k_v, k_a – коефіцієнти підсилення відповідних параметрів.

Потенціальна енергія, накопичена у пружному обмежувачі при максимальному стиску δ_0 :

$$E_{\text{пот}} = \frac{1}{2} c \delta_0^2, \quad (2.107)$$

де δ_0 – максимальна деформація обмежувача,

$$\delta_0 = 2x_0 \left(1 - \text{ctg}^2 \left(\frac{\xi \tau_1}{2} \right) \right), \quad (2.108)$$

x_0 – початкова амплітуда коливань,

τ_1 – тривалість контакту.

Розсіяна енергія

$$\Delta E = \Psi \cdot E_{\text{пот}}, \quad (2.109)$$

де Ψ – коефіцієнт втрат (розсіювання) енергії.

Потужність, що витрачається на деформацію обмежувача визначається як:

$$P_{\text{обм}} = \frac{\Psi c \delta_0^2}{2 \cdot 2\pi / \omega} = c \delta_0^2 \omega \frac{\Psi}{4\pi}. \quad (2.110)$$

2.7.3 Енергія пружної деформації обмежувача та її втрати

Під час удару рухомої рами по обмежувачу в системі виникає пружне накопичення енергії, що пропорційне квадрату деформації. Це відображається наступним співвідношенням для накопиченої енергії в обмежувачі:

$$E_{\text{деф}} = \frac{1}{2} c \delta_{\text{max}}^2, \quad (2.111)$$

де c – жорсткість (коефіцієнт пружності) обмежувача,

δ_{max} – найбільша величина його стиснення під дією удару.

Максимальне стиснення може бути представлене через початкову амплітуду зміщення x_0 та безрозмірний параметр ξ , що враховує контактну частоту:

$$\delta_{\text{max}} = 2x_0 \left(1 - \cot^2 \left(\frac{\xi \cdot \tau_1}{2} \right) \right). \quad (2.112)$$

Таким чином, повна розсіяна енергія в результаті удару:

$$E_{\text{втрат}} = \Psi \cdot E_{\text{деф}} = \Psi \cdot \frac{c \delta_{\text{max}}^2}{2}, \quad (2.113)$$

де Ψ – коефіцієнт втрат енергії через пружні деформації, тріщини, мікросковзання тощо.

2.7.4 Енергетичне навантаження на привід системи

Для визначення середньої потужності, яка витрачається на деформацію обмежувача впродовж циклу, враховується період збудження

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (2.114)$$

$$P_{\text{удар}} = \frac{E_{\text{втрат}}}{T} = \frac{\Psi c \delta_{\text{max}}^2 \omega}{4\pi}. \quad (2.115)$$

Або у спрощеному виді

$$P_{\text{удар}} = \frac{\Psi}{4\pi} \cdot c \delta_{\text{max}}^2 \cdot \omega. \quad (2.116)$$

До цієї потужності додається потужність на подолання тертя в опорах, що визначається окремим співвідношенням $P_{\text{тр}}$. Тоді загальна механічна потужність, яку має забезпечити привід машини, становить:

$$P_{\Sigma} = \frac{P_{\text{удар}} + P_{\text{тр}}}{\eta_{\text{мех}}}, \quad (2.117)$$

де $\eta_{\text{мех}}$ – ККД привідного механізму.

2.8 Визначення законів руху та напружень в шарі бетонної суміші при кінематичному збудженні коливань

Механічна поведінка ущільнюваної бетонної суміші моделюється як в'язкопружне середовище, що реагує на коливальний вплив з певним запізненням фази. Вплив на суміш у вертикальному напрямку описується класичним хвильовим рівнянням в часткових похідних [81]:

$$\frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial t^2} = \rho E^* \cdot \frac{\partial^2 u(z, t)}{\partial z^2}, \quad (2.118)$$

де $u(z, t)$ – вертикальне переміщення частинки бетонної суміші;

ρ – щільність бетонної суміші;

$E^* = E(1 + i\gamma)$ – комплексний модуль деформації, що враховує дисипативні втрати енергії;

γ – коефіцієнт дисипації.

Граничні умови враховують дію привантажувача зверху (на $z = 0$) у вигляді коливального або імпульсного сигналу:

$$u(0, t) = \sum_n A_n e^{i\omega_n t}. \quad (2.119)$$

а також вільну умову на нижній поверхні ущільнюваного шару:

$$E^* \cdot \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0. \quad (2.120)$$

Розв'язання рівняння (2.118) з урахуванням цих умов має вигляд:

$$u(z, t) = \Re \left\{ \sum_n \left(U_{n1} e^{k_n z} + U_{n2} e^{-k_n z} \right) e^{i\omega_n t} \right\}. \quad (2.121)$$

де k_n – комплексне хвильове число

$$k_n = \sqrt{\frac{\rho \omega_n^2}{E(1+i\gamma)}} = \beta_n + i\alpha_n. \quad (2.122)$$

де β_n та α_n – відповідно хвильове число та коефіцієнт затухання, що визначають глибину проникнення коливань та рівень затухання в товщі бетонної суміші.

Урахуванням горизонтального віброзбуджувача є зміна характеру контактної взаємодії суміші з боковими стінками форми. Хоча модель (2.118–2.121) описує вертикальну динаміку, горизонтальне коливання активізує зсувні деформації, зменшує локальну в'язкість суміші і тим самим впливає на величини коефіцієнтів E та γ , зменшуючи втрати енергії та прискорюючи ущільнення.

Сумарна дія обох джерел збудження (віброзбуджувача і привантажувача) забезпечує ефективне поширення ущільнювальної хвилі всередину суміші, з поступовим згасанням амплітуди на глибину h . Для легких бетонів (зокрема полістиролбетону або арболіту) з високою пористістю та значною здатністю до демпфування, необхідне динамічне збудження з урахуванням параметрів, які дозволяють обмежити глибину затухання (формула для загасаючої частини хвильового числа α_n як функції частоти ω_n , модуля пружності E , втрат γ та густини ρ):

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{E}{2\rho\omega_n^2}} \cdot \sqrt{\sqrt{1+\gamma^2} - 1}. \quad (2.123)$$

Таким чином, модель (2.118–2.121) дозволяє не лише описати вертикальну динаміку ущільнення, а й, у поєднанні з експериментальними спостереженнями, оцінити глибину впливу привантаження та ефективність дії горизонтального віброзбуджувача. В подальших розділах уточнюється розподіл напружень у шарі та визначаються еквівалентні параметри

реактивного й активного опору середовища, які дозволяють розраховувати оптимальні режими ущільнення для різних типів легких бетонів.

З урахуванням представлення комплексного хвильового числа у вигляді:

$$k_n = \beta_n + i\alpha_n, \quad (2.124)$$

рішення рівняння коливань перетворюється до виду:

$$u(z, t) = e^{i\omega_n t} \left(U_{n1} e^{(\beta_n + i\alpha_n)z} + U_{n2} e^{-(\beta_n + i\alpha_n)z} \right). \quad (2.125)$$

Для визначення співвідношення між постійними інтегрування U_{n1} і U_{n2} , підставимо (2.125) у граничну умову (2.120):

$$E^* \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=h} = 0. \quad (2.126)$$

У результаті отримаємо:

$$U_{n2} = \frac{e^{2(\beta_n + i\alpha_n)h}}{1} U_{n1}. \quad (2.127)$$

Підставивши (2.127) у (2.125), отримаємо:

$$u(z, t) = e^{i\omega_n t} U_{n1} (e^{(\beta_n + i\alpha_n)z} + e^{2(\beta_n + i\alpha_n)h} e^{-(\beta_n + i\alpha_n)z}). \quad (2.128)$$

Для визначення величини U_{n1} підставимо (2.128) у граничну умову (2.119), яка враховує зовнішню дію через привантажувач:

$$u(0, t) = A_n e^{i\omega_n t}, \quad (2.129)$$

тобто

$$U_{n1} (1 + e^{2(\beta_n + i\alpha_n)h}) = A_n. \quad (2.130)$$

Отже,

$$U_{n1} = \frac{A_n}{1 + e^{2(\beta_n + i\alpha_n)h}}. \quad (2.131)$$

Повертаючись до (2.128), підставляємо знайдену константу:

$$u(z, t) = A_n e^{i\omega_n t} \cdot \frac{e^{(\beta_n + i\alpha_n)z} + e^{2(\beta_n + i\alpha_n)h} e^{-(\beta_n + i\alpha_n)z}}{1 + e^{2(\beta_n + i\alpha_n)h}}, \quad (2.132)$$

де $e^{(\beta_n + i\alpha_n)z}$ – хвилі, що йдуть вгору,

$e^{2(\beta_n + i\alpha_n)h} e^{-(\beta_n + i\alpha_n)z}$ – хвилі, відбиті вниз від вільного краю.

Після представлення чисельника та знаменника через тригонометричні функції отримаємо:

$$u(z, t) = A_n [\cosh(\beta_n z) \cos(\alpha_n z) + i \sinh(\beta_n z) \sin(\alpha_n z)] e^{i\omega_n t}. \quad (2.133)$$

Виділивши дійсну частину:

$$u(z, t) = A_n [\cosh(\beta_n z) \cos(\alpha_n z) \cos(\omega_n t) - \sinh(\beta_n z) \sin(\alpha_n z) \sin(\omega_n t)] \quad (2.134)$$

У нашій вібраційно-імпульсній установці основне навантаження генерується періодичними імпульсами, створюваними кулачковим механізмом, що збуджує привантажувач. Це забезпечує реалізацію вимушених коливань із частотою ω_n , які формують хвилі ущільнення в бетонній суміші. Одночасно горизонтальний вібробуджувач активізує зсувні деформації, змінюючи геометрію поля напружень у зоні ущільнення.

Параметри β_n і α_n залежать від властивостей суміші (зокрема, щільності ρ , модуля E , та коефіцієнта дисипації γ), і визначають, наскільки глибоко в матеріал проникає збурення. Для легких бетонів з високою пористістю важливо, щоб основна енергія передавалася на всю товщину шару, а не згасала у верхній частині, що досягається правильним підбором параметрів збудження.

Таким чином, отримане аналітичне рішення (2.134) описує зміщення частинок середовища в залежності від глибини і часу, враховуючи як резонансну, так і демпфовану природу середовища.

2.9 Визначення напружень у бетонній суміші, що ущільнюється

Напруження в ущільнюваному бетонному середовищі є наслідком взаємодії зовнішнього коливального впливу (у нашому випадку – з боку привантажувача та горизонтального віброзбуджувача) і внутрішніх властивостей матеріалу (в'язкості, щільності, пружності). Вертикальна складова напруженого стану визначається як:

$$\sigma(z, t) = E \cdot \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} . \quad (2.135)$$

Підставляючи вираз $u(z, t)$ з (2.134), отримаємо:

$$\begin{aligned} \sigma(z, t) = A_n E \left[\beta_n \sinh(\beta_n z) \cos(\alpha_n z) + \right. & \\ \left. + \alpha_n \cosh(\beta_n z) \sin(\alpha_n z) \right] \cos(\omega_n t) - & \\ - A_n E \left[\beta_n \cosh(\beta_n z) \sin(\alpha_n z) - \right. & \\ \left. - \alpha_n \sinh(\beta_n z) \cos(\alpha_n z) \right] \sin(\omega_n t) & \end{aligned} \quad (2.136)$$

Цей вираз враховує як фазові зсуви, так і затухання хвильового збудження у товщі бетонної суміші.

Зміщення фаз між збуренням і реакцією суміші задаються кутами:

$$\zeta_{n1} = \arctan \left(\frac{\alpha_n}{\beta_n} \tanh(\beta_n h) \right), \quad (2.137)$$

$$\zeta_{n2} = \arctan \left(\frac{\alpha_n}{\beta_n} \coth(\beta_n h) \right), \quad (2.138)$$

де ζ_{n1} – фазовий зсув або кут, який характеризує зміну фази при збудженні або відбитті в обмеженому середовищі;

ζ_{n2} – альтернативний варіант фазового зсуву, наприклад, для іншої граничної умови або іншого типу хвилі (відбитої/прохідної),

β_n – фазова складова хвильового числа (визначає довжину хвилі);

α_n – загасаюча складова хвильового числа (демпфування);

$\tanh(\beta_n h)$ – гіперболічний тангенс, що враховує товщину шару h і затухання по глибині;

$\coth(\beta_n h)$ – гіперболічний котангенс,

$$\zeta_1 = \arctan\left(\frac{\alpha_1}{\beta_1} \tanh(\beta_1 h)\right), \quad (2.139)$$

$$\zeta_2 = \arctan\left(\frac{\alpha_1}{\beta_1} \cot(\beta_1 h)\right). \quad (2.140)$$

Напруження на межі з основою форми.

Особливе значення має напруження на межі $z = h$, оскільки воно передається на днище форми:

$$\sigma(h, t) = E \cdot \frac{\partial u(z, t)}{\partial z} \Big|_{z=h}. \quad (2.141)$$

Підставляючи похідну до (2.141), отримаємо значення граничного контактного напруження, яке враховує фазовий зсув та вплив обмежуючих умов:

$$\begin{aligned} \sigma(h, t) = \sum_n A_n E \left[\beta_n \sinh(\beta_n h) \cos(\alpha_n h) + \right. & \\ \left. + \alpha_n \cosh(\beta_n h) \sin(\alpha_n h) \right] \cos(\omega_n t) - & \\ - A_n E \left[\beta_n \cosh(\beta_n h) \sin(\alpha_n h) - \alpha_n \sinh(\beta_n h) \cos(\alpha_n h) \right] \sin(\omega_n t) & \end{aligned} \quad (2.142)$$

Зазначені напруження визначають ефективність передачі енергії від привантажувача до ущільнюваного шару. У конструкції, зображеній на рисунку 2.6, вертикальні імпульси формуються за допомогою кулачкового механізму, що приводить у дію рухому масу привантажувача. Саме імпульсне навантаження спричиняє локальні пікові напруження, що мають високий ущільнюючий ефект, особливо при поєднанні з горизонтальним віброзбудженням.

2.10 Аналіз та оцінка отриманих результатів аналітичних досліджень

Для оцінки ефективності роботи вібраційно-імпульсної системи ущільнення легких бетонів, розглянемо аналітичну залежність основних параметрів ударної взаємодії. Система включає форму з бетонною сумішшю висотою $h=0,2$ м, густиною $\rho=800$ кг/м³, розмірами лабораторної форми $0,8 \times 0,6$ м, а також прототипом $1,2 \times 3,0$ м. Привантажувач складається з верхньої рухомої маси на пружинах (яка здійснює удари) та нижньої частини з віброзбуджувачем. Горизонтальне збудження реалізується віброзбуджувачем на формі.

Зв'язок параметрів удару.

Час удару t_y , коефіцієнт відновлення e та період коливань T пов'язані між собою співвідношенням:

$$T = t_y + t_g, \quad (2.143)$$

де t_g – час вільного руху маси до удару.

Цей зв'язок дозволяє визначити динаміку системи з урахуванням впливу коефіцієнта відновлення e . За результатами аналітичних оцінок (табл. 2.1), спостерігається зменшення часу удару з підвищенням жорсткості системи та зниженням дисипативних втрат.

Таблиця 2.1

Залежність часу удару від коефіцієнта відновлення

e	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
t_{y0}, c	0,0015	0,0045	0,0071	0,0090	0,0105	0,0110

На основі табличних даних встановлено: при коефіцієнті відновлення $e=0,5$, час удару становить $t_y = 0,0015$ с, при $e=1$ $t_y = 0,011$.

Оцінка прискорення при ударі:

Максимальне прискорення під час удару визначається з виразу:

$$a_{\text{уд}} = \frac{v_{\text{д}} - v_{\text{п}}}{t_y}, \quad (2.144)$$

де $v_{\text{д}}$ – швидкість до удару, $v_{\text{п}}$ – після удару.

Для характерного прискорення $6,1g$ (тобто $a_{\text{уд}} \approx 50 \text{ м/с}^2$) при $e=0,7$ отримаємо $t_y = 0,0025 \text{ с}$.

Таблиця 2.2

Залежність часу удару від коефіцієнта відновлення

Коефіцієнт відновлення e	Прискорення $a_{\text{уд}} / g$,	Оновлений час удару $t_{y\partial}, \text{с}$
0,5	9,2	0,0014
0,6	7,4	0,0019
0,7	6,1	0,0025
0,8	5,2	0,0028
0,9	4,6	0,0032
1,0	4,2	0,0036

Оновлений час удару – це скориговане значення тривалості контакту між ударною масою (верхньою частиною привантажувача) та елементом, по якому вона вдаряє (нижня частина привантажувача або форма), з урахуванням конструктивних параметрів саме вашої системи.

Параметр $a_{\text{уд}} / g$ у позначає ударне прискорення, нормоване до прискорення вільного падіння.

Вплив опору на ударні характеристики:

Удар супроводжується передачею імпульсу сили:

$$\int F dt = m \Delta v = F_{\text{cp}} \cdot t_y, \quad (2.145)$$

де F_{cp} – усереднена сила удару. Ця сила викликає пружну деформацію обмежувача

$$F_{cp} = k \cdot \delta_{екв}, \quad (2.146)$$

а розсіювання енергії при ударі враховується через коефіцієнт:

$$\eta = \frac{E_{розсіяння}}{E_{кін}} \Rightarrow \eta = 1 - e^2. \quad (2.147)$$

Формула $\eta = 1 - e^2$ показує, яка частка енергії втрачається при ударі (розсіюється на тепло, мікродеформації тощо).

Час удару також суттєво залежить від приведенного коефіцієнта опору ψ . Розрахунки наведено в таблиці 2.3:

У таблиці 2.3 наведено залежність між основними характеристиками ударної взаємодії – прискоренням удару, приведеним коефіцієнтом дисипативного опору ψ , коефіцієнтом відновлення e та часом удару $t_{уд}$ – адаптованими до конструкції установки з кулачковим підйомом та комбінованим привантаженням.

Таблиця 2.3

Числові значення часу удару в залежності від опору прискорення

Прискорення $a_{уд} / g$	Параметри ударного процесу		
	Приведений коефіцієнт дисипативного опору, ψ .	Коефіцієнт відновлення при ударі, e	Час удару $t_{уд}$, с
3,5	0,35	0,3,5	0,0042
4,5	0,33	0,45	0,0036
5,5	0,30	0,50	0,0027
6,5	0,28	0,55	0,0022
7,5	0,26	0,60	0,0017
9,5	0,25	0,65	0,0013

Результати наведені в таблиці 2.3 показують, що прискорення удару в системі з комбінованим привантажувачем зросло в межах від 3,5 до 9,5, що відповідає більшій масі рухомого елемента привантажувача та зменшенню часу контакту при ударі. Водночас спостерігається поступове зниження приведенного коефіцієнта опору ψ зі зростанням прискорення, що відповідає фізичній логіці: у разі жорсткіших ударів частка енергії, яка розсіюється в системі, зменшується. Коефіцієнт відновлення ϵ демонструє зростання, що вказує на зменшення втрат енергії при ударі, тобто на більш пружну взаємодію між елементами системи. Оновлений час удару t_{y0} є меншим порівняно з класичними системами, що пояснюється коротшим ходом рухомої маси, більшою жорсткістю пружинного елемента та наявністю горизонтального віброзбудження, який попередньо знижує опір середовища, активізуючи частинки бетонної суміші.

З фізичної точки зору, збільшення жорсткості пружних елементів між привантажувачем і формою, а також зростання маси верхньої ударної частини привантажувача, призводить до того, що ударна взаємодія стає коротшою за тривалістю, зростає миттєве прискорення в точці контакту, ефективніше передається енергія в ущільнюваний бетонний шар, і зростає загальна інтенсивність ущільнення, зокрема в його верхніх шарах. Таким чином, числові дані, наведені в таблиці 2.3, не лише підтверджують динамічну ефективність обраної конструкції, а й дозволяють обґрунтовано визначити оптимальні параметри системи – жорсткість, масу, частоту дії кулачкового механізму – для забезпечення цільового режиму ущільнення бетонної суміші з урахуванням її фізико-механічних властивостей.

2.11 Висновки з розділу 2

1. Отримані аналітичні залежності для опису руху бетонної суміші в полі вертикальних та горизонтальних коливань, з урахуванням конструктивних особливостей установки, де присутній двокомпонентний привантажувач та горизонтально розміщений віброзбуджувач. Виведені

формули дозволяють визначити просторово-часовий розподіл деформацій та напружень у середовищі, що ущільнюється.

2. Сформульовано залежності для реактивного та активного опору середовища, що ущільнюється, із урахуванням в'язкопружної моделі середовища. Встановлено, що активний опір зростає при зменшенні часу удару та збільшенні амплітуди горизонтальних коливань.

3. Запропоновано аналітичну модель для визначення часу удару, де враховані: маса ударної частини привантажувача, зазор між ударниками, швидкість попереднього руху, та інерційна взаємодія з формою. Показано, що час удару суттєво зменшується при збільшенні жорсткості пружних елементів та ваги привантажувача.

4. Удосконалено методику розрахунку напружень у бетонній суміші з використанням хвильового підходу для імпульсно-вібраційного обладнання. Це дозволяє оцінити локалізацію зон ущільнення, глибину впливу, та зони можливого перенасичення енергією.

5. Запропоновані рівняння балансу енергії при ударній взаємодії дозволяють визначити частку енергії, що переходить у формоутворення, деформацію обмежувача та дисипацію, забезпечуючи розрахункову основу для конструктивної оптимізації системи.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ ІМПУЛЬСНО-ВІБРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ

3.1. Основні вихідні положення та задачі досліджень.

Метою проведених експериментальних досліджень є визначення ефективних параметрів запропонованої комбінованої імпульсно-вібраційної установки для ущільнення легких бетонних сумішей, перевірка аналітичних моделей та встановлення оптимальних режимів ущільнення для умов заданої лабораторної конструкції.

Для досягнення цієї мети було розроблено та зібрано експериментальну установку, яка моделює ключові елементи промислової системи з кулачковим механізмом, комбінованим привантажувачем та горизонтальним віброзбудженням.

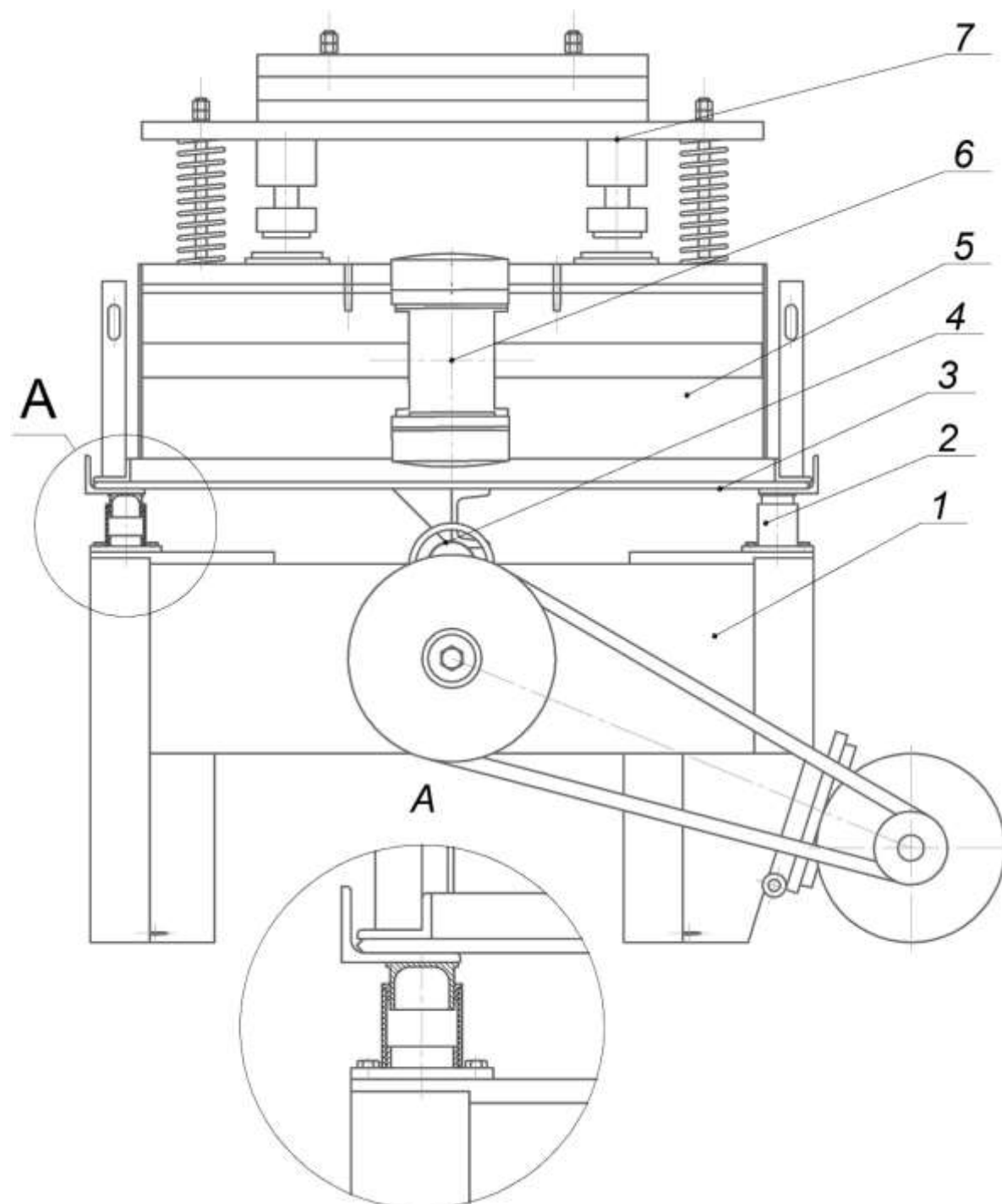
У ході експериментальних досліджень було реалізовано наступні етапи:

- розробка схеми експерименту та уточнення завдань вимірювань;
- вибір засобів фіксації параметрів (прискорень, переміщень, часу удару тощо);
- встановлення умов проведення дослідів та режими збудження;
- виконання експериментів та обробка отриманих даних;
- порівняльний аналіз з теоретичними результатами.

3.2 Опис конструкції лабораторної установки для проведення експериментальних досліджень та особливості розрахунку

Розроблена лабораторна установка (рисунок 3.1) дозволяє моделювати процес імпульсно-вібраційного ущільнення легких бетонів (арболіт, полістиролбетон) в умовах, максимально наближених до

промислових. Габарити формувального блоку – 800×600 мм, висота шару бетонної суміші – 200 мм, об’ємна маса – 800 кг/м^3 . Загальна маса рухомої частини з формою та сумішшю становить близько 1000 Н [49].



1 – рама, 2 – опори, 3 – рама рухома, 4 – кулачковий механізм, 5 – Форма, 6 – вібратор, 7 – привантажувач.

Рисунок 3.1 – Схема установки

Установка складається з:

рухомої рами 3, яка здійснює вертикальні переміщення за допомогою кулачкового механізму;

кулачкового підйомного механізму 4, який забезпечує періодичне підняття та скидання рами з формою (рисунок 3.2);

горизонтального віброзбуджувача, змонтованого безпосередньо на формі, який активує суміш у горизонтальному напрямку та зменшує її внутрішній опір;

опор - обмежувачів коливань 2, що встановлені під рухомою рамою з регульованим зазором від 1 до 15 мм;

привантажувача 7.

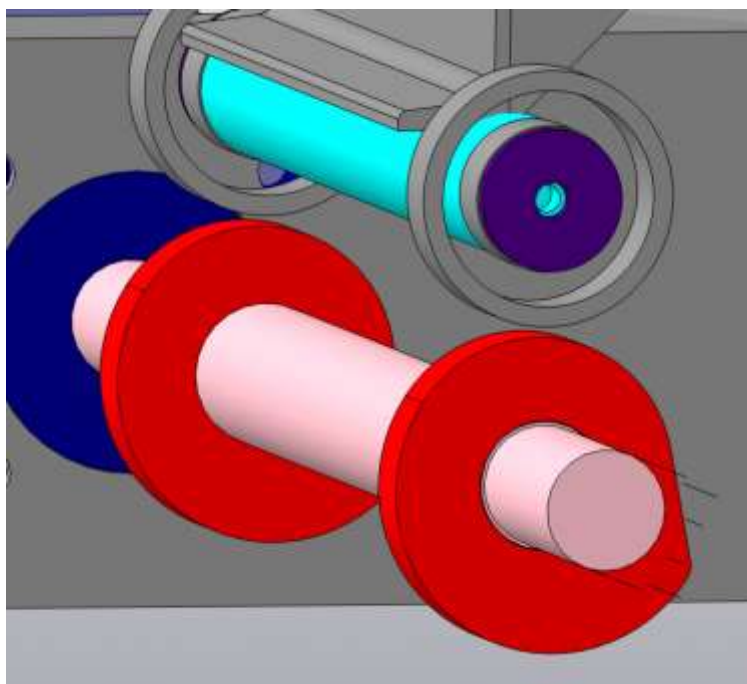
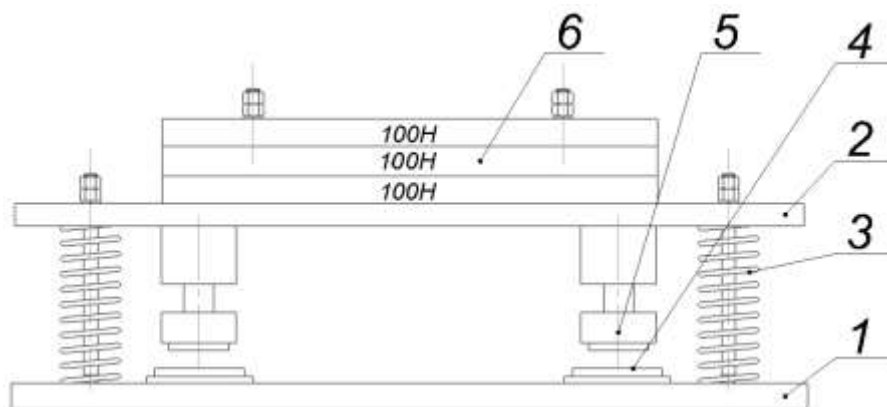


Рисунок 3.2 – Кулачковий механізм підйому

Привантажувач зображений на рисунку 3.3 складається з верхньої рухомої пластини 2 підпружиненої 3 відносно нижньої плити 1, з ударними елементами 5, що спрямовують ударний імпульс на п'яту 4 (зазор від 10 до 30 мм) та додатковою масою 6 яка регулюється в межах 100–300 Н.

Загальна конструкція обладнання дозволяє змінювати модуль пружності пружних елементів, масу ударних елементів та параметри віброзбудження.



1 – нижня плита, 2 – рухома пластина, 3 – пружина, 4 – п'ята, 5 – ударний елемент, 6 – вантаж 100Н.

Рисунок 3.3 – Схема комбінованого привантажувача

3.2.1 Визначення основних параметрів приводного кулачкового механізму

Розрахунок зводиться до визначення максимально допустимої частоти обертання кулачка, за якої форма з бетонною сумішшю встигає вільно впасти на фундамент, не підхоплюючись повторно кулачком. Згідно зі схемою, зображеною на рисунку 3.2, виконуються основні розрахунки кулачкового приводу.

Час падіння форми T_1, c , визначиться як

$$T_1 = \sqrt{\frac{2 \cdot H}{g}}, \quad (3.1)$$

де H – висота падіння, м; проектуємо установку в якій форма буде підійматися за допомогою кулачкового механізму на висоту 8мм, тобто $H = 0,008м$;

g – прискорення вільного падіння; $g = 9,81 \frac{м}{с^2}$.

Час, за який кулачок буде робити один оберт T_2, c , дорівнює

$$T_2 = \frac{2 \cdot \pi}{\omega}, \quad (3.2)$$

де ω – кутова швидкість кулачка, c^{-1} .

Для того, щоб забезпечувалась нормальна робота установки необхідним є виконання наступної умови

$$T_2 \geq T_1. \quad (3.3)$$

Для забезпечення правильної роботи механізму необхідно, щоб час вільного падіння форми був меншим або дорівнював часу одного оберту кулачка.

$$\frac{2 \cdot \pi}{\omega} \geq \sqrt{\frac{2 \cdot H}{g}}, \quad (3.4)$$

звідки ω, c^{-1} , дорівнює

$$\omega \leq \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{\frac{2 \cdot H}{g}}} \leq \frac{2 \cdot 3,14}{\sqrt{\frac{2 \cdot 0,008}{9,81}}} \leq 156. \quad (3.5)$$

Максимально допустима частота обертання вала на якому сидить кулачок $n_{don}, x\text{в}^{-1}$, дорівнює

$$n_{don} = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} = \frac{30 \cdot 156}{3,14} = 1490. \quad (3.6)$$

За один оберт вала форма з бетонною сумішшю здійснює один підйом. Виходячи з того, що номінальна кількість підйомів форми, спроектованої установки, складає $240x\text{в}^{-1}$, тобто реальна частота обертання кулачкового вала дорівнює $n = 240x\text{в}^{-1}$, що менше ніж допустима $n_{don} = 1490x\text{в}^{-1}$, можемо зробити висновок, що форма з бетонною сумішшю встигатиме падати на фундамент (з висоти 8мм) не підхоплюючись кулачком.

Розрахункова схема прикладених до підшипникових вузлів сил зображена на рисунку 3.4.

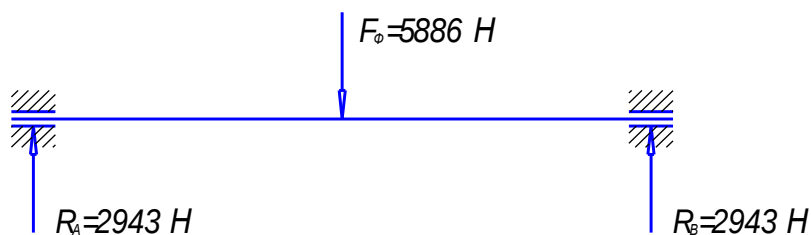


Рисунок 3.4 – Розрахункова схема прикладених до підшипникових вузлів сил

Вихідні дані для розрахунку:

- радіальне навантаження на кожний підшипниковий вузол R , Н, дорівнює

$$R = \frac{F_{\phi}}{2}, \quad (3.7)$$

де F_{ϕ} – сила від ваги форми з сумішшю, Н; визначається наступним чином

$$F_{\phi} = (m_{\phi} + 18 \cdot m_{\text{бл}}) \cdot g = (398 + 18 \cdot 11,2) \cdot 9,81 = 5886, \quad (3.8)$$

$$R = R_A = R_B = \frac{5886}{2} = 2943; \quad (3.9)$$

- необхідна довговічність підшипників L_h , год; приймаємо $L_h \approx 25000 \text{ год}$;

- частота обертання вала n , хв^{-1} , – 240.

У зв'язку з технологічними труднощами точного розточування посадочних місць для підшипників за одну установку, у конструкції можливе виникнення незначного перекосу вала. З метою компенсації цього перекосу при проектуванні вузла опори доцільно передбачити використання роликових дворядних самовстановних радіальних підшипників. Такі підшипники здатні сприймати як радіальні, так і осьові

навантаження будь-якого напрямку, а також допускають значні кутові перекоси внутрішнього кільця (вала) відносно зовнішнього кільця (корпусу), що забезпечує стійкість та надійність роботи вузла при невеликих порушеннях співвісності.

Порівняно з кульковими сферичними дворядними підшипниками, роликові аналоги мають суттєво більшу вантажопідйомність, що обумовлює їх перевагу у випадках значного силового навантаження. Разом із тим, вони характеризуються дещо меншою швидкохідністю, що, однак, не є критичним чинником для даного типу механізму.

Для обґрунтованого вибору типорозміру підшипника необхідно визначити його еквівалентне навантаження, під яким розуміється умовне постійне радіальне навантаження. Це навантаження, діючи на підшипник із обертовим внутрішнім кільцем, повинно забезпечити той самий ресурс роботи (довговічність), що і реальні експлуатаційні умови з урахуванням змінних радіальних та осьових сил. Отримане значення використовується в подальших розрахунках ресурсу та вибору типорозміру підшипникової опори відповідно до стандартних методик.

Еквівалентне навантаження на підшипник P , Н, визначиться як

$$P = R \cdot V \cdot K_B \cdot K_T, \quad (3.10)$$

де V – коефіцієнт обертання кільця; при обертанні внутрішнього кільця $V = 1$;

K_B – коефіцієнт безпеки; $K_B = 1,8 - 2,5$;

K_T – температурний коефіцієнт; при робочій температурі $t_{роб} \leq 100^\circ C$, $K_T = 1$.

Отже, еквівалентне навантаження на підшипник P , Н, дорівнює

$$P = 2943 \cdot 1 \cdot 2,5 \cdot 1 = 7358. \quad (3.11)$$

Підшипники будемо підбирати за базовою динамічною вантажопідйомністю.

Розрахунковий ресурсу підшипника L_h , год, з врахуванням рівня надійності і умов застосування, визначиться наступним чином

$$L_h = a_1 \cdot a_{23} \cdot \left(\frac{C}{P} \right)^K \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n}, \quad (3.12)$$

де a_1 – коефіцієнт, що корегує ресурс в залежності від необхідного рівня надійності; згідно, $a_1 = 0,62$, при 95% надійності;

a_{23} – коефіцієнт, який характеризує сумісний вплив на ресурс підшипника особливих властивостей підшипника і умов його експлуатації; згідно, $a_{23} = 0,3 - 0,4$;

C – базова динамічна вантажопідйомність підшипника, Н;

K – показник ступеня; для роликових підшипників $K = \frac{10}{3}$.

Виразимо із формули (3.12) базову динамічну вантажопідйомність підшипника C , Н, наступним чином

$$C = P \cdot \sqrt[K]{\frac{60 \cdot L_h \cdot n}{a_1 \cdot a_{23} \cdot 10^6}} = 7358 \cdot \sqrt[10]{\frac{60 \cdot 25000 \cdot 240}{0,62 \cdot 0,35 \cdot 10^6}} = 68032. \quad (3.13)$$

Виходячи з конструктивних міркувань, вибираємо підшипник базова динамічна вантажопідйомність якого повинна бути не меншою ніж розрахована.

Таким чином вибираємо підшипник № 3608, який має наступні характеристики:

- зовнішній діаметр D , мм, – 90;
- внутрішній діаметр d , мм, – 40;
- ширина підшипника B , мм, – 33;
- динамічна вантажопідйомність C , Н, – 95000;
- статична вантажопідйомність C_0 , Н, – 64900.

Взявши до уваги той факт, що навантаження на всі чотири підшипники (2 – в опорах вала і 2 – насаджені на вісь) практично однакове,

а також для уніфікації, підшипники, що взаємодіють з поверхнею кулачка приймаємо такими ж самими як і в опорах кулачкового вала.

Дійсний ресурс підшипника L_h , год, складатиме

$$L_h = 0,62 \cdot 0,35 \cdot \left(\frac{95000}{7358} \right)^{\frac{10}{3}} \cdot \frac{10^6}{60 \cdot 240} = 76087. \quad (3.14)$$

Підбір електродвигуна будемо проводити за необхідною потужністю та частотою обертання.

Розрахункова потужність електродвигуна $N_{розр}$, кВт, визначиться за наступною формулою

$$N_{розр} = \frac{N_{\epsilon}}{\eta}, \quad (3.15)$$

де N_{ϵ} – потужність на вихідному (кулачковому) валу, кВт;

η – ККД приводу.

Потужність на вихідному валу N_{ϵ} , кВт, визначиться наступним чином

$$N_{\epsilon} = \frac{T_{\epsilon} \cdot \omega}{1000}, \quad (3.16)$$

де T_{ϵ} – обертовий момент, що виникає на кулачковому валу, $H \cdot m$;

ω – кутова швидкість вихідного вала, c^{-1} .

Обертовий момент, що виникає на вихідному валу T_{ϵ} , $H \cdot m$, дорівнює

$$T_{\epsilon} = F_{\phi.n} \cdot l_{\phi.n} + F_{тер} \cdot l_{тер}, \quad (3.17)$$

де $F_{\phi.n}$ – нормальна складова сили, що виникає від ваги форми з сумішшю, Н;

$l_{\phi.n}$ – плече прикладання сили $F_{\phi.n}$, м;

$F_{тер}$ – сила тертя кочення, що виникає в точці контакту кулачка з підшипником, Н;

$l_{тер}$ – плече прикладання сили $F_{тер}$, м.

Для визначення сил $F_{ф.н}$, $F_{тер}$, а також плечей їх прикладання $l_{ф.н}$, $l_{тер}$, використовується розрахункова схема кулачка з підшипником, що зображена на рисунку 3.5. Схему побудована в такому положенні, в якому обертовий момент, необхідний для підймання форми, буде найбільшим.

Згідно рисунка 3.5 можемо визначити сили $F_{ф.н}$ і $F_{тер}$, Н, наступним чином

$$F_{ф.н} = F_{\phi} \cdot \cos \alpha = 5886 \cdot \cos 3^{\circ} = 5878, \quad (3.18)$$

$$F_{тер} = \frac{F_{ф.н} \cdot k}{R}, \quad (3.19)$$

де k – коефіцієнт тертя кочення, мм; для змащених сталевих деталей $k = 0,05 - 0,08 \text{ мм}$;

R – радіус зовнішнього кільця підшипника, мм; для підшипника № 3608, $R = 45 \text{ мм}$.

Отже, $F_{тер}$, Н, дорівнює

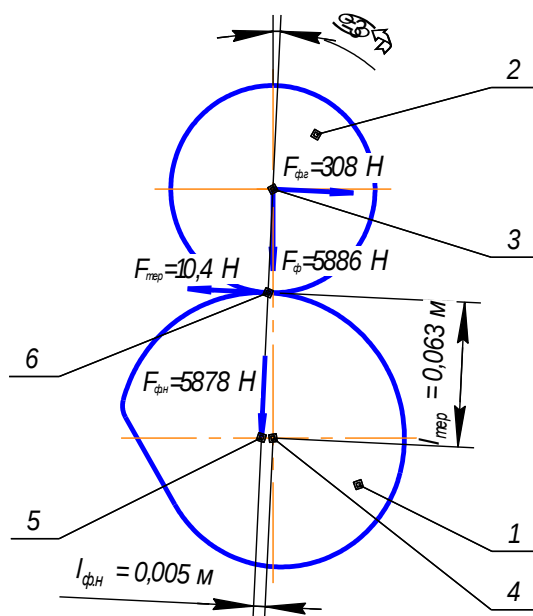
$$F_{тер} = \frac{5878 \cdot 0,08}{45} = 10,4. \quad (3.20)$$

Тоді T_{ϵ} , $\text{Н} \cdot \text{м}$, дорівнює

$$T_{\epsilon} = 5878 \cdot 0,005 + 10,4 \cdot 0,063 = 30. \quad (3.21)$$

Знаючи частоту обертання кулачкового вала, нескладно визначити його кутову швидкість ω , с^{-1} , за наступною формулою

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 240}{30} = 25,12. \quad (3.22)$$



1 – кулачок; 2 – підшипник; 3 – точка прикладання сили, що виникає від ваги форми з сумішшю; 4 – точка відносно якої здійснюється обертання кулачкового вала; 5 – точка, яка являється центром дуги, що утворює профіль кулачка; 6 – точка контакту підшипника і кулачка

Рисунок 3.5 – Розрахункова схема кулачка з підшипником

Отже, потужність на вихідному валу N_e , кВт, дорівнюватиме

$$N_e = \frac{30 \cdot 25,12}{1000} = 0,75. \quad (3.23)$$

ККД приводу η проектованої установки визначатиметься як

$$\eta = \eta_{к.п} \cdot \eta_{в.п}, \quad (3.24)$$

де $\eta_{к.п}$ – коефіцієнт корисної дії клинопасової передачі; згідно, ККД клинопасової передачі дорівнює $\eta_{к.п} = 0,94 - 0,96$;

$\eta_{в.п}$ – коефіцієнт корисної дії, що враховує втрати в підшипниках; згідно, для однієї пари підшипників, $\eta_{в.п} = 0,975 - 0,985$.

Тоді η дорівнює

$$\eta = (0,94 - 0,96) \cdot (0,975 - 0,985) = 0,9165 - 0,9456. \quad (3.25)$$

Розрахункова потужність електродвигуна $N_{розр}$, кВт, визначиться як

$$N_{розр} = \frac{0,75}{0,9165} = 0,78. \quad (3.26)$$

Необхідна частота обертання вала електродвигуна $n_{\partial.розр}$, $хв^{-1}$, визначиться наступним чином

$$n_{\partial.розр} = n \cdot u_{к.п}, \quad (3.27)$$

де n – частота обертання кулачкового вала, $хв^{-1}$;

$u_{к.п}$ – рекомендоване значення передаточного числа для клинопасової передачі; згідно, $u_{к.п} = 2 - 6$.

Отже, $n_{\partial.розр}$, $хв^{-1}$, дорівнює

$$n_{\partial.розр} = 240 \cdot (2...6) = 480...1440. \quad (3.28)$$

В проектованій установці використовується найпоширеніший трифазний асинхронний двигун загальнопромислового призначення. Оскільки отримана розрахункова частота обертання вала двигуна лежить в межах $480 - 1440 хв^{-1}$, так як найкраще підходить двигун тихохідний з синхронною частотою обертання вала $1500 хв^{-1}$.

3.2.2 Прототип установки та дослідження пружних опор

Для створення прототипу установки, відповідно до розроблених креслень (див. Додаток А), на підприємстві КТ «Підприємство «Теплотехбуд» було виготовлено дослідний зразок обладнання. Конструкція установки забезпечує формування стінових плит розмірами 800×600 мм із висотою виробу 100 мм або 200 мм залежно від умов експлуатації.

У виробничих умовах було проведено серію випробувань з метою оцінки працездатності та надійності функціонування дослідного зразка (Додаток А). Під час випробувань особливу увагу приділяли відповідності

технологічних параметрів процесу формування заданим технічним вимогам.

Додатково в лабораторії кафедри галузевого машинобудування проведено дослідження роботи опорних елементів конструкції, описано в роботі [35] (рис. 3.6–3.8), які встановлюються між нерухомою та рухомою рамами установки. За результатами досліджень було визначено оптимальні параметри опор, що забезпечують необхідну жорсткість та довговічність роботи системи під навантаженням.



Рисунок 3.6 – Опора



Рисунок 3.7 – Дослідження опори

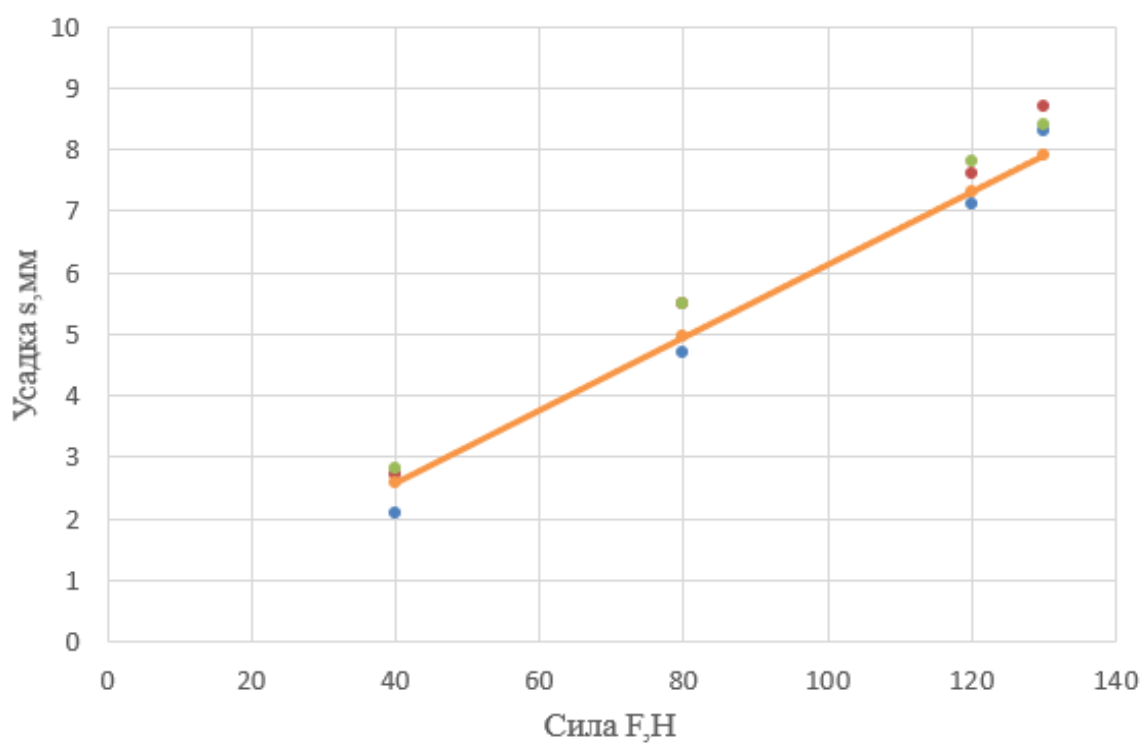


Рисунок 3.8 – Графік залежності усадки пружної опори під тиском за відсутності обмежувача.

Прототип установки зображений на рисунку 3.9.



Рисунок 3.9 – Прототип лабораторної установки

Технічна характеристика лабораторної комбінованої імпульсно-вібраційної установки наведена в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Технічна характеристика лабораторної комбінованої імпульсно-вібраційної установки

№	Параметри	Одиниці виміру	Значення
1.	Вантажопідйомність	кг	160
2.	Частота струшувань	Гц	3-4,5
3.	Висота підйому столу	мм	1–15
4.	Електродвигун:		
	– тип		<i>AIP 80 B4</i>
	– потужність	кВт	1,5
	– частота обертання	об/хв	1500
5.	Габаритні розміри рухомої рами у плані	мм	800x600
6.	Габаритні розміри установки:		
	– довжина	мм	800
	– ширина	мм	700
	– висота	мм	650
7.	Маса установки	кг	67
8.	Вібровбуджувач для створення горизонтальних коливань	HONKER ZW-2.5	
	– вимушуюча сила	кН	2
	– потужність	кВт	0.250
	– частота обертання	об/хв	2840

3.3. Аналіз режимів ущільнення легкобетонних сумішей на комбінованій імпульсно-вібраційній установці з використанням методу планування експерименту

3.3.1. Методика планування експериментальних досліджень

Для подальшого виконання досліджень використано методику планування експерименту, зокрема повнофакторний експеримент типу 3^3 . Цей тип експерименту є класичним прикладом повнофакторного планування експерименту, в якому досліджуються три незалежні змінні (фактори), кожна з яких варіюється на трьох рівнях. Такий підхід дає змогу повністю охопити експериментальний простір, визначити як основні

(лінійні), так і квадратичні ефекти факторів, а також усі можливі взаємодії між ними.

Однією з ключових переваг повнофакторного плану 3^3 є його здатність виявити нелінійні залежності та ефекти взаємодій другого порядку, які часто залишаються непоміченими у двофакторних чи однорівневих експериментах. Схема розташування точок спостереження плану експерименту наведено на рисунку 3.10.

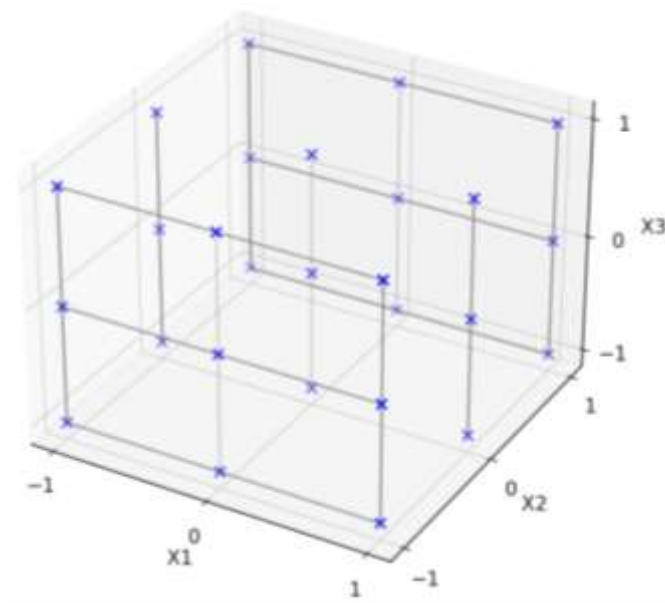


Рисунок 3.10 – Схема розташування точок спостереження плану експерименту 3^3

План є ортогональним – це означає, що оцінки ефектів факторів незалежні одна від одної. Така структура дозволяє отримати точні та стабільні статистичні результати, з меншою кореляцією між коефіцієнтами моделі.

Після проведення експерименту можна побудувати повну квадратичну модель відгуку, яка добре описує систему в межах досліджуваного простору. Це полегшує подальшу оптимізацію. Для невеликої кількості факторів та за умови стабільного середовища дослідження, саме повний факторний план 3^3 є одним з найпотужніших інструментів для науково обґрунтованого аналізу багатофакторних впливів.

Основною метою при реалізації плану експерименту 3^3 є побудова адекватної моделі відгуку, найчастіше квадратичної, яка має вигляд:

$$Y = b_0 + \sum b_i X_i + \sum b_{ii} X_i^2 + \sum \sum b_{ij} X_i X_j, \quad (3.29)$$

де Y – відгук (результат);

b_0 – вільний член (середнє значення відгуку);

b_i – лінійні коефіцієнти;

b_{ii} – квадратичні (нелінійні) ефекти;

b_{ij} – взаємодії між парами факторів.

Визначення коефіцієнтів в рівнянні 3.29 можна виконати методом найменших квадратів (МНК). Середній відгук (вільний член)

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Y_k, \quad (3.30)$$

де N – загальна кількість експериментів,

Y_k – результат у k -му експерименті.

Лінійні коефіцієнти:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Y_k \cdot X_{ik}, \quad (3.31)$$

де X_{ik} – значення i -го фактора в k -му досліді.

Квадратичні коефіцієнти

$$b_{ii} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Y_k \cdot X_{ik}^2. \quad (3.32)$$

Коефіцієнти взаємодії

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N Y_k \cdot X_{ik} \cdot X_{jk}. \quad (3.33)$$

Формат експерименту 3^3 означає, що кожен з трьох факторів приймає три рівні: умовно їх можна закодувати як -1 (нижній рівень), 0 (середній рівень) та $+1$ (верхній рівень). Повне комбінування цих рівнів

між усіма факторами призводить до проведення 27 окремих експериментів ($3 \times 3 \times 3$), кожен з яких відповідає унікальній комбінації факторних значень. Цей тип планування є симетричним та збалансованим, що забезпечує рівномірне покриття всієї області дослідження, дозволяючи виявити не лише прямі ефекти змінних, а й складні взаємозв'язки між ними.

Кодування значень факторів здійснюємо з використанням малих літер, позначених як x . Взаємозв'язок між кодованими та натуральними значеннями факторів визначається за допомогою відповідної залежності:

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (3.34)$$

де X_i – кодове значення відповідного фактора;

x_i – дійсне значення i -го фактора;

x_{i0} – дійсне значення i -го фактора на нульовому рівні;

Δx_i – інтервал варіації i -го фактора.

Одним із основних параметрів, який необхідно забезпечити при виготовленні виробів із легких бетонів, є межа міцності на стиск (МПа). На цей показник істотно впливають такі фактори: склад бетонної суміші, висота падіння рухомої рами, час контакту між рухомою рамою та пружними обмежувачами, модуль пружності пружних елементів і загальна тривалість ущільнення.

З огляду на специфіку комбінованої імпульсно-вібраційної установки, яка використовується у даних дослідженнях, та з метою забезпечення точного контролю параметрів ущільнення, було проаналізовано фізичну сутність і технологічну чутливість вищезазначених змінних. У результаті для реалізації багатфакторного експерименту обрано три ключових фактори.

Зазор між рухомою та нерухомою рамою (X_1) – безпосередньо впливає на тривалість та інтенсивність ударної взаємодії.

Маса рухомої частини привантажувача (X_2) – в установці привантажувач складається з двох частин: верхньої рухомої з ударними

елементами (яка варіюється в межах 100 Н, 200 Н та 300 Н) та нижньої нерухомої з вбудованим вібробуджувачем. Ця маса значною мірою визначає імпульс удару.

Тривалість ущільнення (X_3) – критичний параметр, який впливає на щільність, міцність, однорідність полістеролбетонного виробу.

Під час реалізації плану експерименту до кожного з факторів висувалися однакові вимоги: керованість, незалежність один від одного, можливість варіювання в межах, достатніх для прояву їх впливу на міцність бетонної суміші. Кодування факторів представлено у вигляді таблиці 3.2 [49].

Таблиця 3.2

Результати кодування факторів

Фактор	Дійсне значення	Кодоване значення	Інтервал варіювання	Рівні варіювання					
				Дійсні			Кодовані		
				Верхній	Нижній	Нульовий	Верхній	Нижній	Нульовий
Зазор між рухомою та нерухомою рамою (мм)	a	X_1	5	15	5	10	+1	-1	0
Маса рухомої частини привантажувача (Н)	m	X_2	100	300	100	200	+1	-1	0
Тривалість ущільнення (с)	t	X_3	20	60	20	40	+1	-1	0

При цьому матриця планування експерименту буде мати такий вигляд – таблиця 3.3.

В таблиці 3.3 наведено всі можливі комбінації для проведення експериментальних досліджень. Рівні варіювання факторів закодовані -1, 0, +1 [49].

Таблиця 3.3

Матриця планування експериментальних досліджень

Номер експерименту	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	1
7	-1	1	-1
8	-1	1	0
9	-1	1	1
10	0	-1	-1
11	0	-1	0
12	0	-1	1
13	0	0	-1
14	0	0	0
15	0	0	1
16	0	1	-1
17	0	1	0
18	0	1	1
19	1	-1	-1
20	1	-1	0
21	1	-1	1
22	1	0	-1
23	1	0	0
24	1	0	1
25	1	1	-1
26	1	1	0
27	1	1	1

3.3.2 Методика проведення експериментальних досліджень

Виготовлення зразків для подальших досліджень міцності на стиск здійснювалося із застосуванням спеціалізованої лабораторної технології, адаптованої для полістиролбетонних сумішей.

Спочатку проводилося формування стінової полістиролбетонної панелі з облицюванням гіпсокартоном, яку отримували шляхом ущільнення на комбінованій імпульсно-вібраційній установці, що дозволяло забезпечити як вертикальні, так і горизонтальні компоненти коливань для підвищення щільності та однорідності структури легкого бетону.

На початковому етапі у форму розміром 800×600 мм (висота шару 100 мм) закладалася лист гіпсокартону, встановлювався каркас із склопластикової арматури діаметром 6 мм, потім засипалася полістиролбетонна суміш, яка приготовлена із використанням легкого наповнювача – гранул спіненого полістиролу, в'язучого компонента (портландцементу) та піску, із введенням пластифікуючих добавок для покращення реологічних властивостей. Склад полістиролбетонної суміші наведено на в таблиці 3.4 [49].

Таблиця 3.4

Склад полістиролбетонної суміші

Компонент	на 1 м ³	на 0,05 м ³
Портландцемент СЕМ І 42.5	330 кг	16,5 кг
Пісок (фракція 0–2 мм)	230 кг	11,5 кг
Гранули пінополістиролу (EPS)	10 кг	0,5 кг
Вода	150 л	7,5 л
Пластифікатор (0,8% від цементу) BauGut BauPLAST Beton	~2,6 кг	130 мл

Після чого встановлювався верхній лист гіпсокартону та привантажувач. Вмикався привід кулачкового механізму, який приводив в рух верхню рухому раму, що здійснювала падіння на опори, викликаючи вертикальні імпульсні коливання в суміші та привантажувачі. Паралельно з цим вмикався віброзбуджувач, який викликав горизонтальні коливання в формі з сумішшю.

Формування стінової полістиролбетонної панелі з облицюванням гіпсокартоном здійснювалося у горизонтальному положенні в спеціальній формі (рисунок 3.9), що забезпечувало жорстке кріплення бортів і точну геометрію. Після віброущільнення суміші витримали технологічну паузу (2–3 хв), щоб знизити внутрішній тиск повітряних включень і забезпечити осідання.

Після завершення процесу укладання та ущільнення полістиролбетонної суміші у форму, на її відкриту поверхню горизонтально накладався гіпсокартонний лист стандартної товщини, який виконував не лише технологічну, а й функціональну роль у формуванні виробу.

Гіпсокартон був попередньо зволожений для зменшення інтенсивності всмоктування води з цементного розчину, що дозволило уникнути поверхневих тріщин. Використання гіпсокартонного листа забезпечує формування чіткої межі контакту та підвищує рівномірність тужавіння. За рахунок маси верхнього листа та привантажувача і правильного розподілу тиску досягається щільне прилягання та запобігання утворенню поверхневих раковин або нерівностей.

В результаті такого поєднання здійснювалося одночасне формування плоскої панелі з оздобленою зовнішньою поверхнею, яка може використовуватися як готова стінова конструкція із внутрішнім облицювальним шаром. Гіпсокартон виконує функцію інтегрованої зовнішньої обшивки, що істотно скорочує обсяг оздоблювальних робіт після встановлення виробу у конструкцію стіни або перегородки.

Етапи формування виробу наведено на рисунку 3.11.



Рисунок 3.11 – Етапи формування виробу

Після первинного тужавіння виконувалася розпалубку форми з виробом, який залишають на піддоні. Після закінчення терміну витримки, передбаченого для даного етапу (зразки витримуються у вологому середовищі (відносна вологість повітря $95 \pm 5\%$) при температурі 20 ± 2 °C протягом 28 діб.), з отриманої панелі здійснювалося розкрійне випилювання кубічних зразків розміром $100 \times 100 \times 100$ мм. Цей процес виконувався із застосуванням стрічкової пилки або дискової фрези з мінімальною вібрацією, з метою недопущення мікропошкоджень у внутрішній структурі зразків. Геометричні розміри та паралельність граней контролювалася за допомогою вимірювального інструменту, що забезпечувало відповідність зразків вимогам до випробувань на міцність нормативних вимог.

Ущільнення суміші здійснювалося за двома схемами навантаження. Перша – ущільнень проводилось тільки при вертикальних імпульсних навантаженнях. Друга – одночасною з дією вертикальних імпульсних навантажень та горизонтальних вібрацій, що моделювало комбіновану дію.

Експериментальні дослідження на міцність при стиску зразків полістиролбетону кубічної форми зі сторонами $100 \times 100 \times 100$ мм проводилися на гідравлічному пресі, зокрема на установці типу ПГМ, що забезпечує створення контрольованого навантаження до моменту руйнування зразка.

Перед проведенням випробувань перевірялася правильність геометрії зразків: відхилення від прямокутності граней не перевищували допустимих значень. Поверхні, що контактують із плитами випробувальної машини, були ретельно вирівняні.

Перед випробуваннями прес перевірялося нульове положення шкали та герметичність гідросистеми. Зразок встановлювався вертикально, з дотриманням співвісності осі навантаження та осі зразка, що забезпечило адекватну передачу навантаження без виникнення перекосів чи косого

згину. Контактні поверхні щільно прилягати до плит гідравлічного преса (рисунок 3.12).



Рисунок 3.12 – Експериментальні дослідження міцності зразків на стиск

Навантаження виконувалося рівномірно та без ривків, зі швидкістю навантаження, яка підтримувалося в межах 0,2 МПа/с. Випробування тривало до моменту руйнування зразка, при якому фіксувалося максимальне значення сили, що відповідає граничній міцності. Після завершення експерименту виконали розрахунок межі міцності на стиск за формулою

$$R = \frac{F}{A}, \quad (3.35)$$

де R – межа міцності на стиск, МПа;

F – максимальна руйнівна сила, кг с;

A – площа стискуваної поверхні, м².

Для отримання достовірної та статистично обґрунтованої інформації при проведенні експериментальних досліджень ущільнення

легкобетонних сумішей необхідно визначити оптимальну кількість повторень дослідів у кожній експериментальній точці. У нашому випадку кількість повторень була прийнята рівною трьом. Це забезпечує необхідну довірчу ймовірність не менше 0,95, що дозволяє виявити істотний вплив факторів на вихідну величину – межу міцності на стиск бетонної суміші. Результати експерименту наведено в таблицях 3.5, 3.6.

Таблиця 3.5

Результати експериментальних досліджень (без горизонтальних коливань)

№ експерименту	Межа міцності на стиск, МПа, зразків із полістиролбетону		
	1	2	3
1	3,211	3,230	3,249
2	3,485	3,500	3,515
3	3,520	3,540	3,560
4	3,270	3,280	3,290
5	3,504	3,520	3,536
6	3,560	3,580	3,600
7	3,284	3,300	3,316
8	3,517	3,540	3,563
9	3,566	3,580	3,594
10	3,236	3,250	3,264
11	3,510	3,530	3,550
12	3,559	3,580	3,601
13	3,293	3,310	3,327
14	3,536	3,560	3,584
15	3,593	3,620	3,647
16	3,292	3,320	3,348
17	3,552	3,570	3,588
18	3,577	3,590	3,603
19	3,255	3,270	3,285
20	3,555	3,580	3,605
21	3,585	3,610	3,635
22	3,293	3,320	3,347
23	3,565	3,580	3,595
24	3,610	3,630	3,650
25	3,324	3,340	3,356
26	3,586	3,610	3,634
27	3,601	3,620	3,639

Таблиця 3.6

Результати експериментальних досліджень (з горизонтальними
коливаннями)

№ експерименту	Межа міцності на стиск, МПа, зразків із полістиролбетону		
	1	2	3
1	3,233	3,255	3,202
2	3,581	3,567	3,592
3	3,663	3,671	3,706
4	3,270	3,278	3,322
5	3,588	3,614	3,568
6	3,716	3,712	3,732
7	3,301	3,322	3,277
8	3,655	3,675	3,710
9	3,717	3,723	3,750
10	3,268	3,263	3,279
11	3,624	3,620	3,676
12	3,718	3,730	3,712
13	3,342	3,330	3,318
14	3,687	3,686	3,667
15	3,727	3,746	3,747
16	3,335	3,345	3,370
17	3,609	3,629	3,682
18	3,760	3,735	3,725
19	3,354	3,358	3,368
20	3,685	3,695	3,660
21	3,782	3,768	3,760
22	3,421	3,397	3,442
23	3,695	3,703	3,702
24	3,784	3,759	3,797
25	3,443	3,437	3,440
26	3,732	3,758	3,700
27	3,786	3,747	3,777

3.3.3 Статистична обробка експериментальних даних

Для експериментально отриманих значень межі міцності бетону на стиск (таблиці 3.7-3.8) було проведено оцінку рівноточності вимірювань і аналіз однорідності дисперсій.

Таблиця 3.7

Середнє значення межі міцності на стиск зразків полістеролбетону (без горизонтальних коливань)

№ експерименту	Зазор між рухомою та нерухомою рамою мм	Маса рухомої частини привантажувача, Н	Тривалість ущільнення, с	Середнє значення межі міцності на стиск, МПа
1	5	100	20	3,23
2	5	200	20	3,50
3	5	300	20	3,54
4	5	100	40	3,28
5	5	200	40	3,52
6	5	300	40	3,58
7	5	100	60	3,30
8	5	200	60	3,54
9	5	300	60	3,58
10	10	100	20	3,25
11	10	200	20	3,53
12	10	300	20	3,58
13	10	100	40	3,31
14	10	200	40	3,56
15	10	300	40	3,62
16	10	100	60	3,32
17	10	200	60	3,57
18	10	300	60	3,59
19	15	100	20	3,27
20	15	200	20	3,58
21	15	300	20	3,61
22	15	100	40	3,32
23	15	200	40	3,58
24	15	300	40	3,63
25	15	100	60	3,34
26	15	200	60	3,61
27	15	300	60	3,62

Таблиця 3.8

Середнє значення межі міцності на стиск зразків полістеролбетону
(з горизонтальними коливаннями)

№ експерименту	Зазор між рухомою та нерухомою рамою мм	Маса рухомої частини привантажувача, Н	Тривалість ущільнення, с	Середнє значення межі міцності на стиск, МПа
1	5	100	20	3,23
2	5	200	20	3,58
3	5	300	20	3,68
4	5	100	40	3,29
5	5	200	40	3,59
6	5	300	40	3,72
7	5	100	60	3,3
8	5	200	60	3,68
9	5	300	60	3,73
10	10	100	20	3,27
11	10	200	20	3,64
12	10	300	20	3,72
13	10	100	40	3,33
14	10	200	40	3,68
15	10	300	40	3,74
16	10	100	60	3,35
17	10	200	60	3,64
18	10	300	60	3,74
19	15	100	20	3,36
20	15	200	20	3,68
21	15	300	20	3,77
22	15	100	40	3,42
23	15	200	40	3,70
24	15	300	40	3,78
25	15	100	60	3,44
26	15	200	60	3,73
27	15	300	60	3,77

Основним етапом первинної обробки даних факторного експерименту є аналіз рівноточності отриманих результатів, а також розрахунок дисперсії відтворення. Зокрема, вибіркова дисперсія для u -го дослідження обчислюється за допомогою відповідної математичної формули

$$Q_{yu}^2 = \frac{1}{\gamma_u - 1} \sum_{i=1}^{\gamma_u} (y_{ui} - \bar{y}_u)^2, \quad (3.36)$$

де $f_u = (\gamma_u - 1)$ – ступінь вільності;

$\bar{y}_u = \frac{1}{\gamma_u} \sum_{i=1}^{\gamma_u} y_{ui}$ – математичне очікування функції відгуку у u -тій точці експерименту.

Оскільки кількість паралельних дослідів є однаковою для всіх рядків матриці (дорівнює 3), перевірку однорідності дисперсій здійснювали за критерієм Кохрена, який представляється такими співвідношенням

$$G = \frac{Q_{y \max}^2}{\sum_{i=1}^N Q_{yu}^2}, \quad (3.37)$$

де $Q_{y \max}^2$ – найбільша дисперсія вибірки;

$\sum_{i=1}^N Q_{yu}^2$ – сума дисперсій вибірки;

N – число дослідів.

для експериментальних даних (без горизонтальних коливань)

$$G_1 = \frac{0.006746}{0.035848} = 0.1882,$$

для експериментальних даних (з горизонтальними коливаннями)

$$G_2 = \frac{0.00404}{0.037981} = 0.1064.$$

Вимірювання є рівноточними тоді, коли виконується умова

$$G < G_t, \quad (3.38)$$

де G_t –критерій Кохрена (табличне значення),

для експериментальних даних (без горизонтальних коливань)

$$0,1882 < 0,2498 ,$$

для експериментальних даних (з горизонтальними коливаннями)

$$0,1064 < 0,2498.$$

На основі застосування критерію Кохрена зроблено висновок щодо рівноточності проведених вимірювань. За обраного рівня значущості експериментальні значення критерію Кохрена, розраховані для функцій відгуку, не перевищують встановлених граничних значень. Це свідчить про рівноточність вимірювань у всіх точках експерименту (як для серії експериментів з горизонтальними коливаннями, так і без них). Крім того, гіпотеза про однорідність дисперсій для всіх значень виявилася прийнятною.

Статистичні показники, розраховані за формулами (3.36–3.38), наведені у таблиці 3.9 та 3.10.

Таблиця 3.9

Оцінка рівноточності експериментальних даних (без горизонтальних коливань)

№ досліджу	Межа міцності на стиск, МПа, зразків із полістиролбетон		№ досліджу	Межа міцності на стиск, МПа, зразків із полістиролбетон	
	Математичне очікування, $\bar{y}_u$	Вибіркова дисперсія, Q_{yu}^2		Математичне очікування, $\bar{y}_u$	Вибіркова дисперсія, Q_{yu}^2
1	3,23	0,0009200	15	3,62	0,0002340
2	3,50	0,0021330	16	3,32	0,0002290
3	3,54	0,0026060	17	3,57	0,0031010
4	3,28	0,0001260	18	3,59	0,0019220
5	3,52	0,0011500	19	3,27	0,0007660
6	3,58	0,0017410	20	3,58	0,0025660
7	3,3	0,0001000	21	3,61	0,0005170
8	3,54	0,0010100	22	3,32	0,0017690
9	3,58	0,0007180	23	3,58	0,0006020
10	3,25	0,0004910	24	3,63	0,0003860
11	3,53	0,0067460	25	3,34	0,0027770
12	3,58	0,0005660	26	3,61	0,0005140
13	3,31	0,0005200	27	3,62	0,0002340
14	3,56	0,0016380			
Сумарна вибірка дисперсія, $\sum Q_{yu}^2 = 0,035848$					

Таблиця 3.10

Оцінка рівноточності експериментальних даних (з горизонтальними коливаннями)

№ досліджу	Межа міцності на стиск, МПа, зразків із полістиролбетону		№ досліджу	Межа міцності на стиск, МПа, зразків із полістиролбетону	
	Математичне очікування, $\bar{y}_u$	Вибіркова дисперсія, Q_{yu}^2		Математичне очікування, $\bar{y}_u$	Вибіркова дисперсія, Q_{yu}^2
1	3,23	0,003293	15	3,74	0,000362
2	3,58	0,000821	16	3,35	0,000725
3	3,68	0,001289	17	3,64	0,003209
4	3,29	0,002000	18	3,74	0,000725
5	3,59	0,002792	19	3,36	0,000116
6	3,72	0,000416	20	3,68	0,001325
7	3,3	0,002466	21	3,77	0,000260
8	3,68	0,001625	22	3,42	0,002601
9	3,73	0,000765	23	3,7	0,000065
10	3,27	0,000281	24	3,78	0,002069
11	3,64	0,003152	25	3,44	0,000045
12	3,72	0,000468	26	3,73	0,004040
13	3,33	0,000288	27	3,77	0,002421
14	3,68	0,000362			
Сумарна вибіркова дисперсія, $\sum Q_{yu}^2 = 0,037981$					

Значущість коефіцієнтів регресії оцінюється за допомогою t-критерію Стюдента. Для того, щоб коефіцієнт регресії вважався статистично значущим, необхідно, щоб розраховане значення t-статистики перевищувало критичне значення, визначене на основі заданого рівня значущості та ступенів свободи. У таких випадках можна зробити висновок, що відповідний незалежний змінний чинить суттєвий вплив на залежну змінну

$$t_f = \frac{a}{Q_{(a_0, i, ii, ij)}} > t_t, \quad (3.39)$$

де $Q_{(a)}$ – дисперсія, яка характеризує помилки при визначенні коефіцієнтів регресії. Визначається по формулам

$$Q_{(a_0)}^2 = \frac{1}{n_0} Q_{(y)}^2; \quad (3.40)$$

$$Q_{(ai)}^2 = A Q_{(y)}^2; \quad (3.41)$$

$$Q_{(aai)}^2 = \left(B + \frac{1}{Q^2 n_0} \right) Q_{(y)}^2; \quad (3.42)$$

$$Q_{(aij)}^2 = D_1 Q_{(y)}^2, \quad (3.43)$$

$$Q_{(y)}^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}. \quad (3.44)$$

Оцінку значимості коефіцієнтів регресії за t-критерієм Стьюдента проведемо в табличній формі (таблиця 3.11).

Таблиця 3.11

Оцінка значимості коефіцієнтів регресії

Коефіцієнти регресії	Значення коефіцієнтів регресії		Експериментальне значення t-критерію, t_f		Табличне значення t-критерію, t_t
	Експериментальні дослідження без горизонтальних коливань	Експериментальні дослідження з горизонтальними коливаннями	Експериментальні дослідження без горизонтальних коливань	Експериментальні дослідження з горизонтальними коливаннями	
b_0	3,480000	3,576296	1689,576	1016,670	2,052
b_1	0,027222	0,047222	10,791	10,961	
b_1^2	0,000833	-0,006389	0,381	-1,712	
b_2	0,021111	0,025000	8,369	5,803	
b_2^2	0,006667	0,005278	3,052	1,415	
b_3	0,151667	0,203333	60,123	47,196	
b_3^2	0,055833	0,061111	25,557	16,379	
$b_1 b_2$	-0,003333	-0,007500	-1,079	-1,421	
$b_1 b_3$	0,003333	-0,017500	1,079	-3,317	
$b_2 b_3$	-0,012500	-0,013333	-4,046	-2,527	

Значимі коефіцієнти занесені в комірки з сірим кольором. Значимість коефіцієнтів підтверджується стандартизованою картою Парето для оцінки ефектів (рисунок 3.13), яка демонструє вплив окремих факторів.

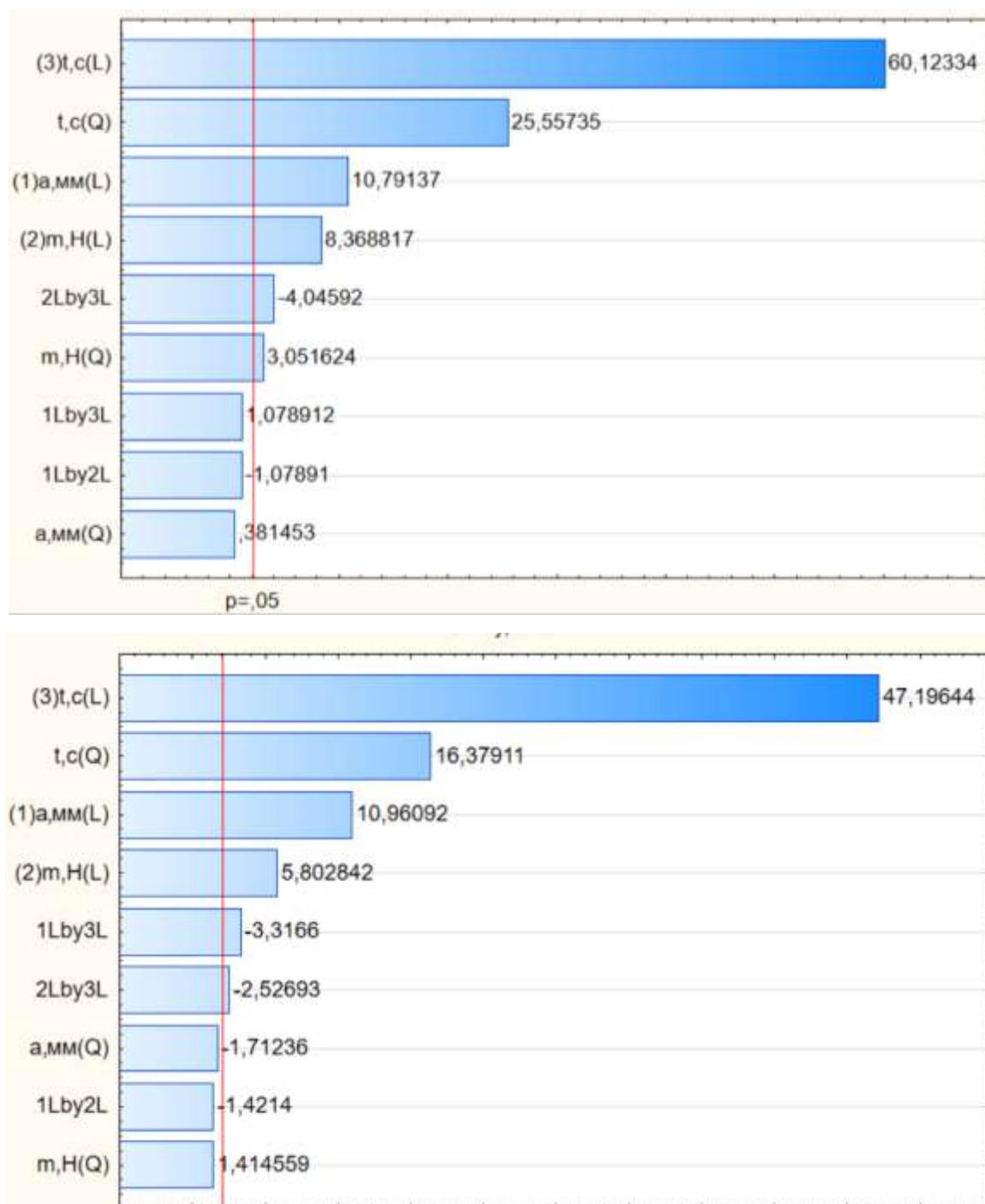


Рисунок 3.13 – Значимість коефіцієнтів за стандартизованою картою Парето (експериментальні дослідження без горизонтальних коливань та з горизонтальними коливаннями відповідно)

Аналіз статистичних даних дає змогу створити модель, представлену рівняннями регресії за експериментальними даними (дослідження без горизонтальних коливань та з горизонтальними коливаннями відповідно)

$$y = 3,48 + 0,02722X_1 + 0,02111X_2 + 0,00667X_2^2 + 0,15167X_3 + 0,05583 \cdot X_3^2 - 0,0125X_2X_3, \quad (3.45)$$

$$y = 3,58 + 0,04722X_1 + 0,025X_2 + 0,2033X_3 + 0,0611 \cdot X_3^2 - 0,0175X_1X_3 - 0,0133X_2X_3, \quad (3.46)$$

де X_1 – кодоване значення зазору a ,

X_2 – кодоване значення маси привантажувача m ,

X_3 – кодоване значення тривалості ущільнення t ,

Відповідність отриманої моделі результатам експерименту оцінюється на основі виконання визначених умов

$$F \leq F_t, \quad (3.47)$$

де F_t – табличне значення F -розподілу;

$$F = \frac{QQ_L \cdot f_E}{QQ_R \cdot f_L} - \text{відношення дисперсій};$$

$QQ_L = QQ_R - QQ_E$ – сума квадратів, яка пов'язана з дисперсією, виступає ключовим показником, що характеризує рівень невідповідності між експериментальними даними та їх аналітичним описом, таким чином вказуючи на ступінь неадекватності моделі у відображенні результатів дослідження

$$QQ_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{0u} - \bar{y}_0)^2 - \text{сума квадратів, яка пов'язана з дисперсією,}$$

характеризує похибку, властиву експерименту.;

$$QQ_R = \left[\sum_{u=1}^N y_u^2 - \frac{\left(\sum_{u=1}^N y_u \right)^2}{N} \right] - QQ - \text{сума квадратів};$$

$$\begin{aligned}
QQ = & A \sum_{i=1}^k \left(\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u \right)^2 + D_1 \sum_{i=1}^{n_1} \left(\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u \right)^2 + \\
& + b_0 \sum_{u=1}^N y_u - \sum_{i=1}^k b_{ii} \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - \frac{\left(\sum_{u=1}^N y_u \right)^2}{N}
\end{aligned}$$

– сума квадратів, яка

відповідає отриманим коефіцієнтам регресії.

В таблиці 3.12 наведені результати підсумкового регресійного аналізу та на рисунку 3.14 діаграма розсіювання спостережених значень порівняно з прогнозованими значеннями.

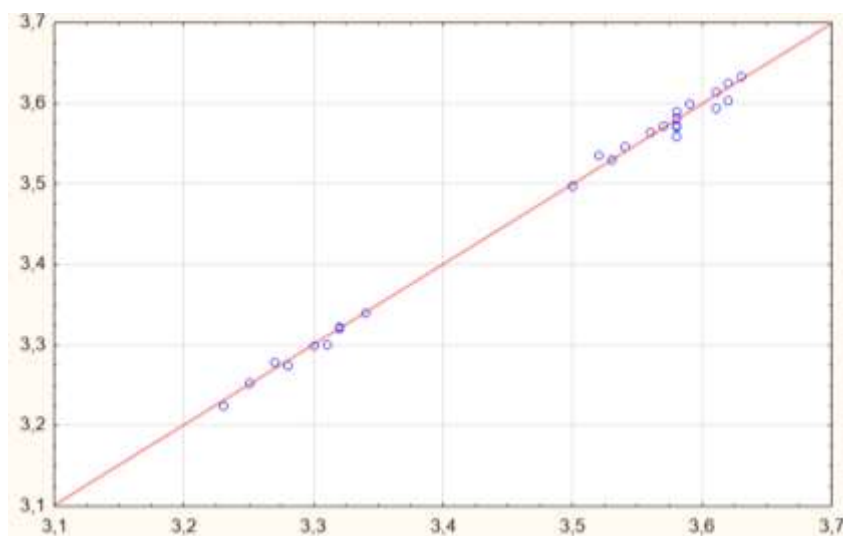
Таблиця 3.12

Підсумковий регресійний аналіз

	Міцність на стиск зразків , МПа (при ущільненні без горизонтальних коливань)	Міцність на стиск зразків , МПа (при ущільненні з горизонтальними коливаннями)
Табличне значення критерію Фішера	2,559	2,559
Дисперсійне відношення Фішера	0,638	0,549
Дисперсія адекватності	0,00045	0,00033
Коефіцієнт детермінації	0,99368	0,99034

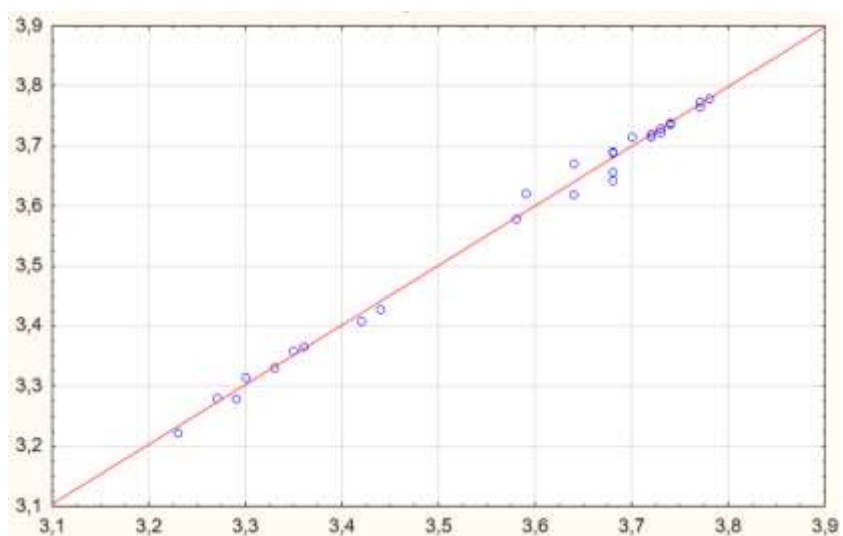
Більшість точок на рисунку 3.14 знаходяться близько до червоної прямої, що свідчить про добру узгодженість моделі з експериментальними даними. Відхилення точок мінімальні, тобто модель не має систематичних помилок. Оцінку якості моделі показує коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,99368$ (0,99034), що підтверджує високу точність моделі. Наявність лише малих випадкових відхилень без явної структури свідчить про адекватність моделі. Адекватність моделі також підтверджується і за критерієм Фішера формула (3.47).

Міцність полістеролбетону на стиск,
МПа (прогнозовані значення)



Міцність полістеролбетону на стиск, МПа (спостережені значення)

Міцність полістеролбетону на стиск,
МПа (прогнозовані значення)



Міцність полістеролбетону на стиск, МПа (спостережені значення)

Рисунок 3.14 – Діаграма розсіювання спостережених та прогнозованих значень міцності на стиск при ущільненні без горизонтальних коливань та з горизонтальними коливаннями відповідно

Для більшого розуміння отриманих результатів були створені поверхні відгуку, які наочно демонструють підсумки проведених досліджень. У контексті моделі експерименту один із факторів був зафіксований на середньому рівні, а два інші розглядалися як змінні. Побудовані поверхні відгуку у координатах факторів, а також двовимірні перетини цих поверхонь, представлені на рисунках 3.15–3.20 [49].

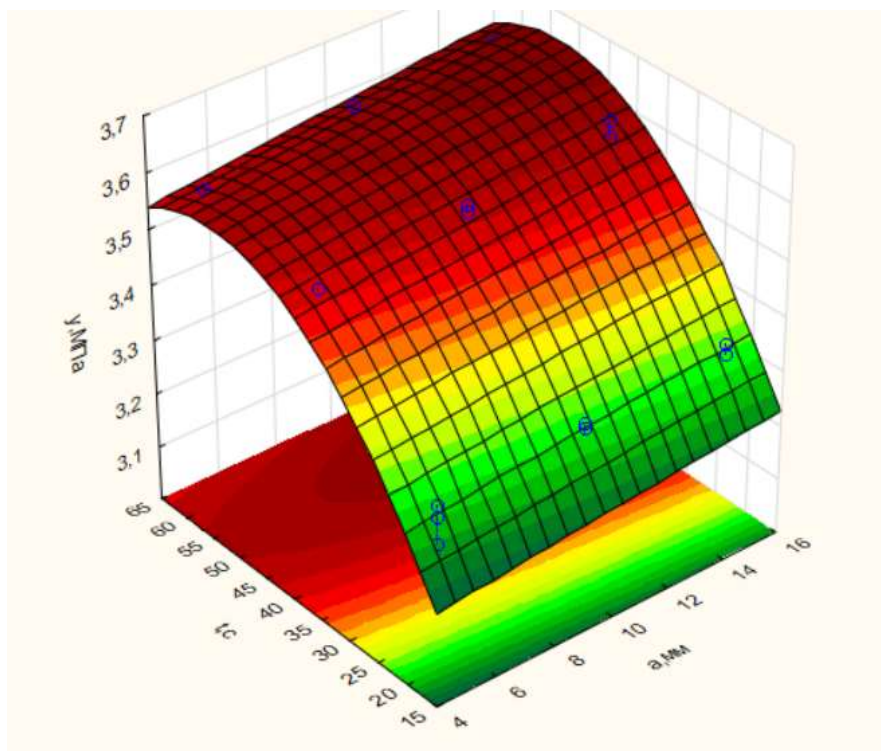


Рисунок 3.15 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів t та a при $m=200\text{Н}$ (при ущільненні без горизонтальних коливань)

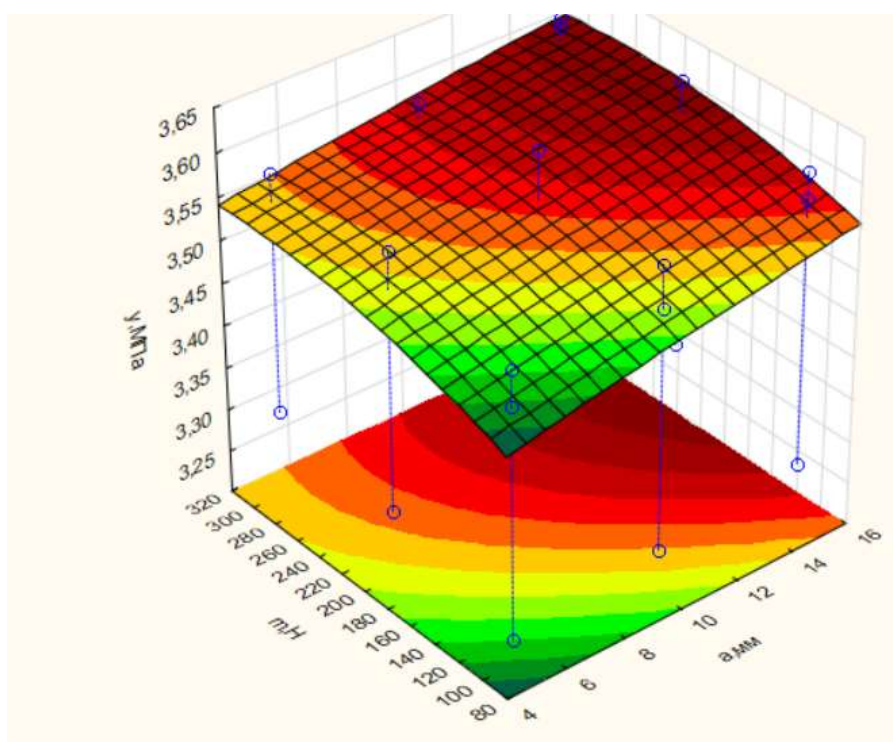


Рисунок 3.16 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів m та a при $t=40\text{ с}$ (при ущільненні без горизонтальних коливань)

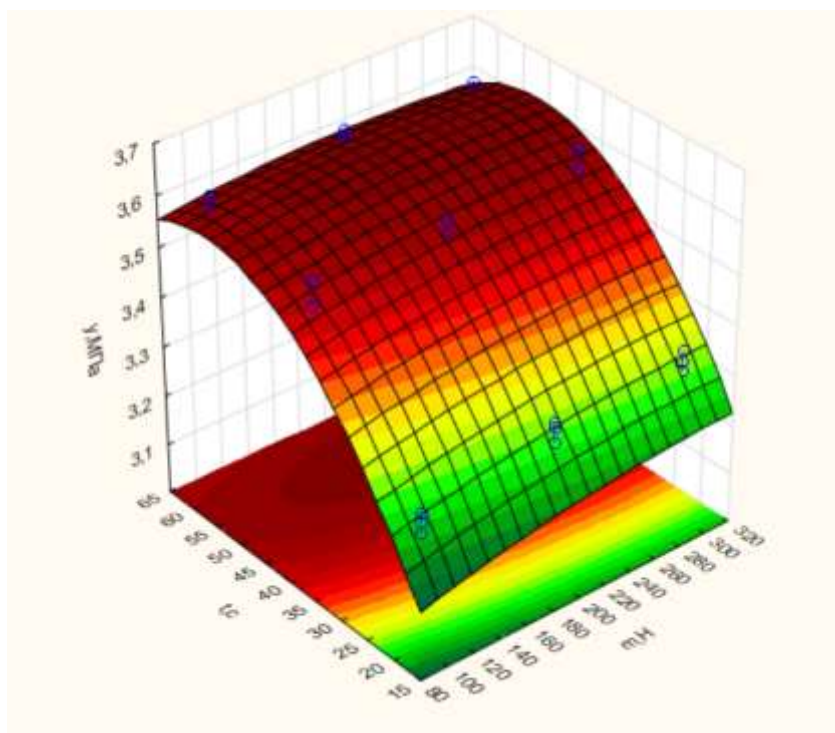


Рисунок 3.17 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів m та t при $a=10$ мм (при ущільненні без горизонтальних коливань)

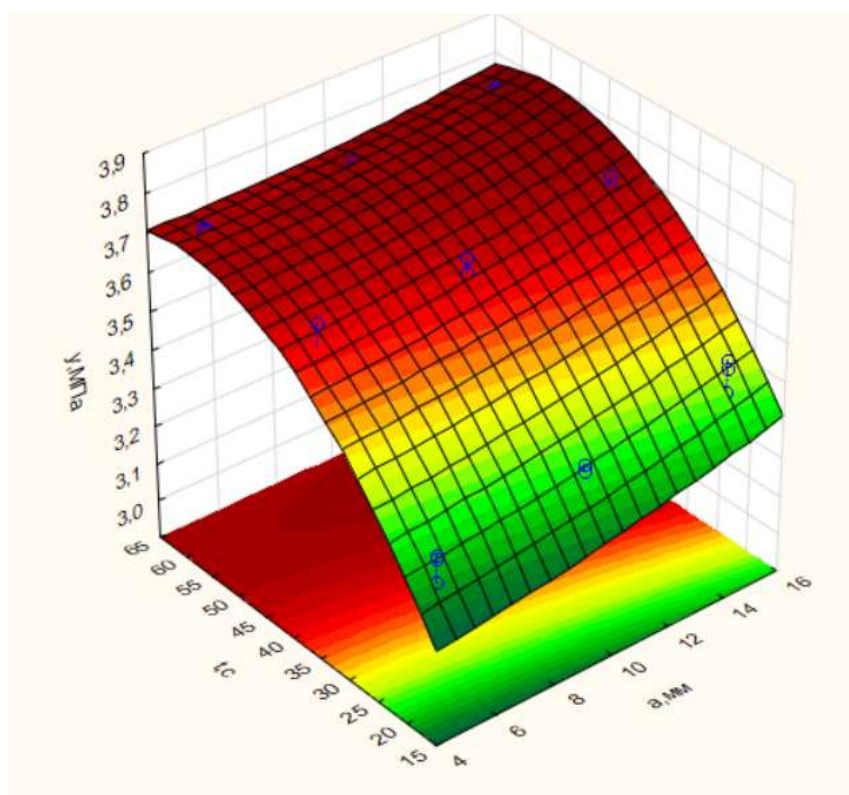


Рисунок 3.18 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів t та a при $m=200$ Н (при ущільненні з горизонтальними коливаннями)

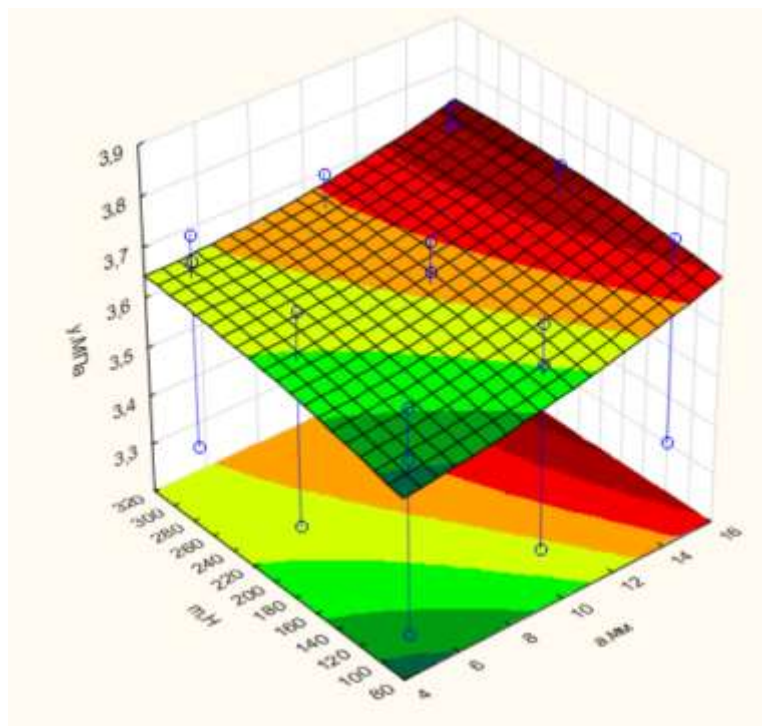


Рисунок 3.19 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів m та a при $t=40$ с (при ущільненні з горизонтальними коливаннями)

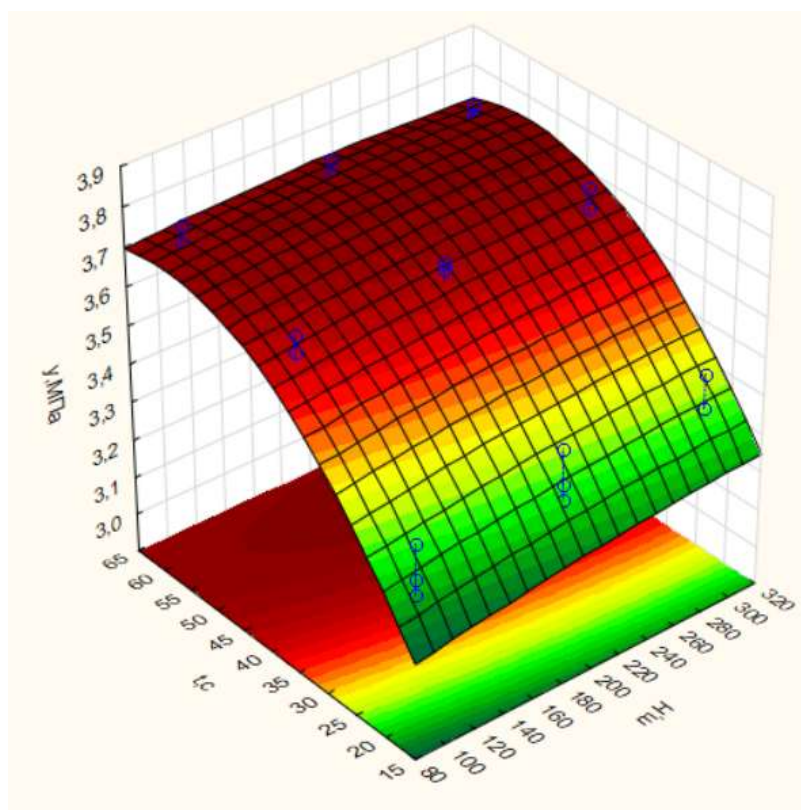


Рисунок 3.20 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів m та t при $a=10$ мм (при ущільненні з горизонтальними коливаннями)

3.3.4 Оптимізація результатів експериментальних досліджень

Проаналізуємо рівняння регресії в кодованих змінних (3.45). Середнє значення міцності при нульових рівнях усіх факторів (центральна точка) складає 3,48. Лінійний ефект $+0,02722 \cdot X_1$ має позитивний вплив зазору між рамами. Чим більший зазор (при $X_1=+1$, тобто $a = 15$ мм), тим більша міцність. $+0,02111 \cdot X_2$ – помірно позитивний лінійний ефект маси привантажувача, збільшення часу також збільшує міцність. Поруч є квадратичний ефект, що вказує на наявність оптимального значення маси привантажувача.

Квадратичні ефект $+0,00667 \cdot X_2^2$ має не великий вплив маси – функція має мінімум по X_2 , тобто занадто мала або велика маса може знижувати ефективність ущільнення. Оптимальна маса – може бути усередині інтервалу (нульова точка не є максимумом).

Але враховуємо також $+0,15167 \cdot X_3$ – найбільший лінійний коефіцієнт, тому час ущільнення має найсильніший позитивний вплив.

Квадратичний ефект $+0,05583 \cdot X_3^2$ має значний вплив часу ущільнення – оптимум теж у центрі або нижче, хоча лінійний ефект переважає. Оскільки коефіцієнт додатній, функція має мінімум по X_3 , тобто як і в випадку з масою, існує оптимальний час ущільнення. Занадто великі або малі значення можуть бути неефективні.

Таким чином, зазор між рамами слід збільшувати – він однозначно покращує міцність, час ущільнення і масу привантажувача треба оптимізувати – існує точка мінімуму по кожному з них, яку знайдено аналітично.

Такий характер рівняння вказує на складну взаємодію ефектів, яку добре описує повна квадратична модель.

Для знаходження оптимальних параметрів проведено оптимізацію аналітичними методами. Знайдено часткові похідні по всіх змінних, прирівняні до нуля і знайдено екстремуми функцій

$$\frac{\partial y}{\partial X_1} = 0, \frac{\partial y}{\partial X_2} = 0, \frac{\partial y}{\partial X_3} = 0. \quad (3.48)$$

В результаті оптимізації отримуємо оптимальні значення в межах плану: $X_1 = +1, X_2 = +1, X_3 = +0,583$.

При переході від кодованих координат X_1, X_2, X_3 до натуральних параметрів a, t, m необхідно врахувати межі варіювання кожного фактора, які були задані у плані повнофакторного експерименту 3³. Використовуючи формулу (3.34), параметри дорівнюють $a=5X_1+10, t=20X_3+40, m=100X_2+200$ отримано рівняння (3.49)

$$y = 3,28 + 0,00027a^2 + 0,00014t^2 - 0,000025a \cdot m + 0,000358 \cdot a - 0,0052 \cdot m - 0,0036 \cdot t \quad (3.49)$$

Тоді оптимальні значення факторів в натуральних значеннях становлять $a = 15\text{мм}, m = 300\text{Н}, t = 52\text{с}$.

Аналогічно виконано аналіз рівняння регресії в кодованих змінних (3.46). Коефіцієнт при X_1 має додатне значення 0,04722 – лінійний вплив зазору. Виявлено позитивний вплив при збільшенні зазору між рамами, що підвищує міцність. Найбільш ефективний вплив буде при $X_1=+1$ – максимальний зазор (15 мм). Відсутність квадратичної взаємодії при X_1 свідчить, що ефект лінійний і не має оптимуму всередині. Лінійний вплив маси привантажувача t має додатне значення 0,025. Ефект позитивний, але порівняно слабкий вплив. Можна зробити висновок, що збільшення маси контакту підвищує міцність. Однак, відсутність квадратичного члена при X_2 означає, що вплив вважається лінійним – без виявленого оптимуму в діапазоні значень.

Найбільшим коефіцієнтом серед усіх факторів є коефіцієнт при X_3 – лінійний вплив часу ущільнення. Значить, час ущільнення сильно підвищує міцність бетону. Однак є також позитивний квадратичний ефект часу ущільнення, що говорить про графічну опуклість параболи, і як наслідок

функція має мінімум всередині плану. Це означає, що надто великі або надто малі значення часу знижують ефективність ущільнення.

Найсильніший вплив на міцність має час ущільнення – причому як лінійно, так і квадратично. Оптимум буде десь всередині діапазону.

Зазор позитивно впливає на міцність – чим більший, тим краще, без оптимуму. Маса також покращує міцність, але її вплив відносно слабкий. Єдиний фактор, що має оптимальну величину, – це час ущільнення, оскільки він входить у рівняння як лінійно, так і квадратично.

Аналогічно як для рівняння (3.45) проведемо оптимізацію аналітичними методами для рівняння (3.46).

В результаті оптимізації отримуємо оптимальні значення в межах плану: $X_1 = +1$, $X_2 = +1$, $X_3 = +0,357$.

Після переходу до натуральних змінних отримаємо таке рівняння регресії:

$$y = 3,15 + 0,0164a + 0,00052m + 0,00103t + 0,00015t^2 - \\ - 0,000175a \cdot t - 0,000007m \cdot t \quad (3.50)$$

Максимум міцності на стиск полістеролбетону при ущільненні з горизонтальними коливаннями в межах плану досягається при $a = 15 \text{ мм}$, $m = 300 \text{ Н}$, $t = 41 \text{ с}$.

3.4 Висновки з розділу 3

1. Спроектовано та виготовлено лабораторну комбіновану імпульсно-вібраційну установку для ущільнення легких бетонів. Проведено експериментальні дослідження з використанням методики планування експерименту, із варіюванням зазору між рухомою та нерухомою рамами (5–15 мм), маси привантажувача (100–300 Н) та

тривалості ущільнення (20–60 с) відповідно до повного факторного плану типу 3^3 .

2. Отримано рівняння регресії, що описують залежність міцності полістиролбетону на стиск від основних технологічних факторів. Максимальна міцність при ущільненні без горизонтальних коливань становить 3,63 МПа, а з використанням горизонтальних коливань – 3,78 МПа, що свідчить про перевагу комбінованого впливу.

3. Установлено, що запропонована конструкція дозволяє регулювати режими ущільнення, підлаштовуючи їх під змінні параметри форми, маси суміші та жорсткості системи, завдяки двокомпонентному привантажувачу й горизонтальному збудженню.

4. Проведено аналітичну оптимізацію регресійної моделі. Визначено, що найбільший вплив на міцність має тривалість ущільнення та маса привантажувача, а також квадратичний ефект часу ущільнення, що свідчить про наявність оптимуму в середині плану. Встановлено оптимальні параметри ущільнення в межах плану без горизонтальних коливань $a = 15\text{мм}, m = 300\text{Н}, t = 52\text{с}$ та при горизонтальних коливаннях $a = 15\text{мм}, m = 300\text{Н}, t = 41\text{с}$.

5. Експериментально підтверджено, що поєднання імпульсного вертикального навантаження з горизонтальними коливаннями підвищує рівномірність ущільнення суміші, зменшує пористість і сприяє покращенню міцності виробів на 12–15% порівняно з традиційними методами.

РОЗДІЛ 4 ІНЖЕНЕРНЕ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ

4.1. Техніко-технологічне обґрунтування режимів ущільнення легких бетонів розробленою комбіновано імпульсно-вібраційною установкою

На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень обґрунтовано оптимальні параметри роботи розробленої комбінованої імпульсно-вібраційної установки, що дозволяють досягти ефективного ущільнення легкобетонних сумішей. Ключовими технологічними факторами є: висота підйому рухомої частини системи, маса привантажувача, частота обертання кулачкового вала, жорсткість пружних елементів обмеження та наявність горизонтального збудження віброзбуджувачем.

До основних конструктивно-технологічних параметрів ущільнення легкобетонних виробів на двокомпонентній системі привантажувача з вертикальним і горизонтальним збудженням належать:

- склад бетонної суміші, адаптований під відповідний тип легкого бетону (арболіт, полістиролбетон, керамзитобетон);

- висота підйому рухомої рами регульована за допомогою опор;

- маса рухомої частини привантажувача (в межах 100–300 Н);

- частота обертання кулачка (узгоджена з динамікою руху рами і вільним падінням);

- час удару (як функція пружності обмежників та жорсткості пружин привантажувача);

- вмикання горизонтального віброзбудження, що активізує суміш перед вертикальним ударом.

На підставі аналізу даних з розділу 3, найефективніше ущільнення суміші досягалося при висоті підйому 12 мм та використанні привантажувача з ударним ефектом та горизонтально направлених коливань. Таке поєднання забезпечує достатню кінетичну енергію при ударі для активації внутрішньої структури легких бетонів без надмірного розбризкування або сегрегації суміші.

Для забезпечення узгодженості роботи кулачкового механізму з коливальним рухом рами, частоту обертання кулачкового вала визначали за умовою уникнення зворотного контакту кулачка з роликком до завершення циклу вільного падіння. Це дозволяє уникнути передчасного зворотного підйому, зменшити шум, вібраційне навантаження на підшипники та зношування контактних поверхонь.

Розрахунок максимально допустимої частоти обертання кулачка виконується за умови, що час одного циклу обертання перевищує сумарний час вільного руху рами і часу контакту. Такий підхід дозволяє адаптувати частоту під конкретні характеристики форми, маси суміші та параметри амортизації в системі привантаження. Розрахункова схема для визначення граничної частоти враховує масу рухомої системи (1000 Н), висоту падіння (до 15 мм), та параметри ударної взаємодії з обмежниками, розраховані у розділі 2.

Також до обґрунтованих параметрів входять:

- жорсткість пружних обмежників коливань, які визначають не лише енерговитрати на відскок, але й регулюють форму хвильового імпульсу, що діє на бетонну суміш;
- ефективна тривалість процесу ущільнення, яка залежить від частоти імпульсів, амплітуди горизонтального збудження і пластичності суміші.

Використання горизонтального віброзбудження, як було встановлено в експерименті, дозволяє підвищити однорідність ущільнення по товщі форми, зменшити локальні пустоти та покращити контакт між легкими

заповнювачами й цементним каменем. Його доцільно активізувати на першій третині часу ущільнення перед кожним імпульсом удару.

У результаті, запропонована конструкція дозволяє:

- поєднати імпульсне вертикальне збудження з активним горизонтальним впливом;
- адаптувати роботу під змінну жорсткість та масу формувального блоку;
- забезпечити регульовані режими ущільнення легкобетонних виробів з врахуванням типу суміші, конструкції виробу та очікуваної міцності.

Наступний етап оцінки ефективності передбачає порівняння з еталонними методами ущільнення, визначення енерговитрат та економічного ефекту при переході до промислового впровадження.

4.2. Методика технічного розрахунку комбінованої імпульсно-вібраційної установки з двокомпонентним привантажувачем для ущільнення виробів із легких бетонів

Розрахунок установки із імпульсно-вібраційної впливом передбачає визначення основних параметрів, що забезпечують ефективне ущільнення легкобетонної суміші за заданих конструктивних і технологічних характеристик. Такий підхід дає змогу адаптувати систему до виробничих умов і обґрунтувати вибір технічних рішень.

Конструкція установки включає: масивну рухому раму з формою (загальна вага з бетонною сумішшю – 1000 Н), пружні опори-обмежувачі з налаштованою жорсткістю, а також двокомпонентний привантажувач, що складається з верхньої рухомої частини (вагою 100–300 Н) із ударними елементами та нижньої частини, на якій встановлено віброзбуджувач для вертикального збудження. Додатково, на бічній поверхні форми

закріплений горизонтальний віброзбуджувач, який генерує коливання в поперечному напрямку з частотою до 50 Гц.

Методика розрахунку передбачає послідовне визначення таких параметрів:

- маса сформованого виробу, яка враховується в розрахунках реактивного опору середовища та впливу на деформацію при ударному навантаженні;

- коефіцієнт жорсткості пружної опори, що визначає величину відновлювальної сили після імпульсного навантаження, впливає на характер коливань і амплітуду повторних вібрацій у системі "форма – обмежник";

- коефіцієнт жорсткості ударного обмежувача, який забезпечує пружне гальмування рами після вільного падіння і визначає час ударної взаємодії (від 0,0014 до 0,004 с за результатами розділу 2);

- енергія, що передається на ущільнення бетонної суміші, яка розраховується за формулою $E_{yui} = \frac{1}{2}mv^2$, де m – приведена маса рухомої системи, а v – швидкість у момент удару, яка залежить від висоти падіння;

- енергія, що поглинається пружними елементами обмеження коливань, визначається як потенційна енергія деформації: $E_{обм} = \frac{1}{2}k_{обм}\delta^2$, де δ – амплітуда стиснення обмежника;

- енергія втрат на тертя, що виникає в точках контакту та зчеплення між поверхнею форми та бетонною сумішшю, приблизно оцінюється як частка загальної енергії удару (до 10–15%).

Оскільки в конструкції передбачено змінну вагу рухомої частини привантажувача (100–300 Н), це дозволяє гнучко регулювати рівень імпульсу, що передається на суміш, залежно від її рецептури та консистенції. Додаткове горизонтальне збудження активізує зсувні

деформації у бетоні та підвищує щільність укладки зерен заповнювача, зменшуючи кількість пустот.

При підборі обладнання для формування потрібно скористатися наступним алгоритмом зображеним на рисунку 4.1.

У підсумку, правильний вибір зазначених параметрів дозволяє забезпечити не лише високі міцнісні характеристики готового виробу, але й енергоефективність процесу ущільнення. Для їх точного розрахунку доцільно використовувати формули, наведені в таблиці 4.1, які є результатом аналітичних досліджень, виконаних у розділі 2. Вони враховують нелінійність деформацій, динамічні ефекти удару, а також змінну частоту і амплітуду коливань.

Таблиця 4.1

Методика розрахунку комбінованої імпульсно-вібраційної установки

№ п/п	Назва параметра	Аналітична залежність
1	2	3
1.	Кінетична енергія удару привантажувача:	$E_{\text{ум}} = \frac{1}{2} m_p v_p^2,$ де m_p – маса рухомої частини привантажувача, кг; $v_p = \sqrt{2gh}$ привантажувача перед ударом, м/с; h – висота виробу, м; g – прискорення вільного падіння, м/с²

Методика розрахунку комбінованої імпульсно-вібраційної установки

1	2	3
2	Час удару між привантажувачем і рамою (із врахуванням пружного обмежника):	$t_{\text{уд}} \approx \pi \cdot \sqrt{\frac{m_{\text{еф}}}{k_{\text{обм}}}}$ де $m_{\text{еф}}$ – приведена маса системи (привантажувач + рама), кг; $k_{\text{обм}}$ – жорсткість пружного обмежувача, Н/м.
3	Максимальне прискорення при ударі:	$a_{\text{макс}} = \frac{v_{\text{р}}}{t_{\text{уд}}}$ де $v_{\text{р}}$ – швидкість ударного елемента перед зіткненням, м/с; $t_{\text{уд}}$ – тривалість удару, с.
4.	Деформація пружного обмежника:	$\delta_{\text{макс}} = \frac{F_{\text{уд}}}{k_{\text{обм}}},$ $F_{\text{уд}} = m_{\text{р}} \cdot a_{\text{макс}}$ – ударна сила, що діє під час короткочасного контакту, Н; де $m_{\text{р}}$ – приведена маса (або маса ударного елемента), кг; $a_{\text{макс}}$ – максимальне прискорення у момент удару, м/с²;
5.	Енергія, поглинута обмежувачем, Дж:	$E_{\text{обм}} = \frac{1}{2} \cdot k_{\text{обм}} \cdot \delta_{\text{макс}}^2,$ де $k_{\text{обм}}$ – жорсткість у місці удару, Н/м; $\delta_{\text{макс}}^2$ – максимальна деформація, м.

Методика розрахунку комбінованої імпульсно-вібраційної установки

1	2	3
6.	Енергія, що передається в бетонну суміш (за рахунок пружної дії):	$E_{\text{уш}} = E_{\text{уд}} - E_{\text{обм}} - E_{\text{втрат}}$ де $E_{\text{уд}}$ – загальна енергія удару (механічна енергія, передана системі); $E_{\text{обм}}$ – пружна енергія, що накопичується в обмежувачах або пружних елементах; $E_{\text{втрат}}$ – енергійні втрати, пов’язані з тертям, в’язкістю, демпфуванням тощо
7.	Визначення частоти коливань рухомої рами:	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\text{сум}}}{m_{\text{сист}}}}$ де $k_{\text{сум}}$ – сумарна жорсткість системи; $m_{\text{сист}}$ – загальна маса рухомої частини з бетоном, кг.
8.	Потужність віброзбуджувача горизонтального збудження (оцінка):	$P_{\text{гор}} = m_p \cdot \omega^2 \cdot A \cdot \sin(\varphi),$ де $\omega = 2\pi f_{\text{гор}}$ – кругова частота горизонтальних коливань; A – амплітуда горизонтальних коливань, м; φ – фаза відносно вертикального удару.
9.	Коефіцієнт відновлення при ударі:	$e = \frac{v_{\text{після}}}{v_{\text{до}}},$ де $v_{\text{після}}$ – швидкість відскоку після удару; $v_{\text{до}}$ – швидкість перед ударом

Для прикладу виконаємо розрахунок установки за наступними вихідними даними: густина бетонної суміші $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$, площа блоків $S = 0,08 \text{ м}^2$; висота виробу $h = 0,1 \text{ м}$; частота $\omega = 24 \text{ с}^{-1}$; швидкість розповсюдження хвиль $c = 28 \text{ м/с}$; коефіцієнт опору $\gamma = 0,15$; час удару $\tau = 0,006 \text{ с}$; маса форми $m_{\phi} = 100 \text{ кг}$; модуль пружності гуми $E = 4.81 \text{ МПа}$; коефіцієнт поглинання $\psi = 0,5$, привантажувач ударної дії вагою 400Н з яких додаткова вага ударних елементів 200Н .

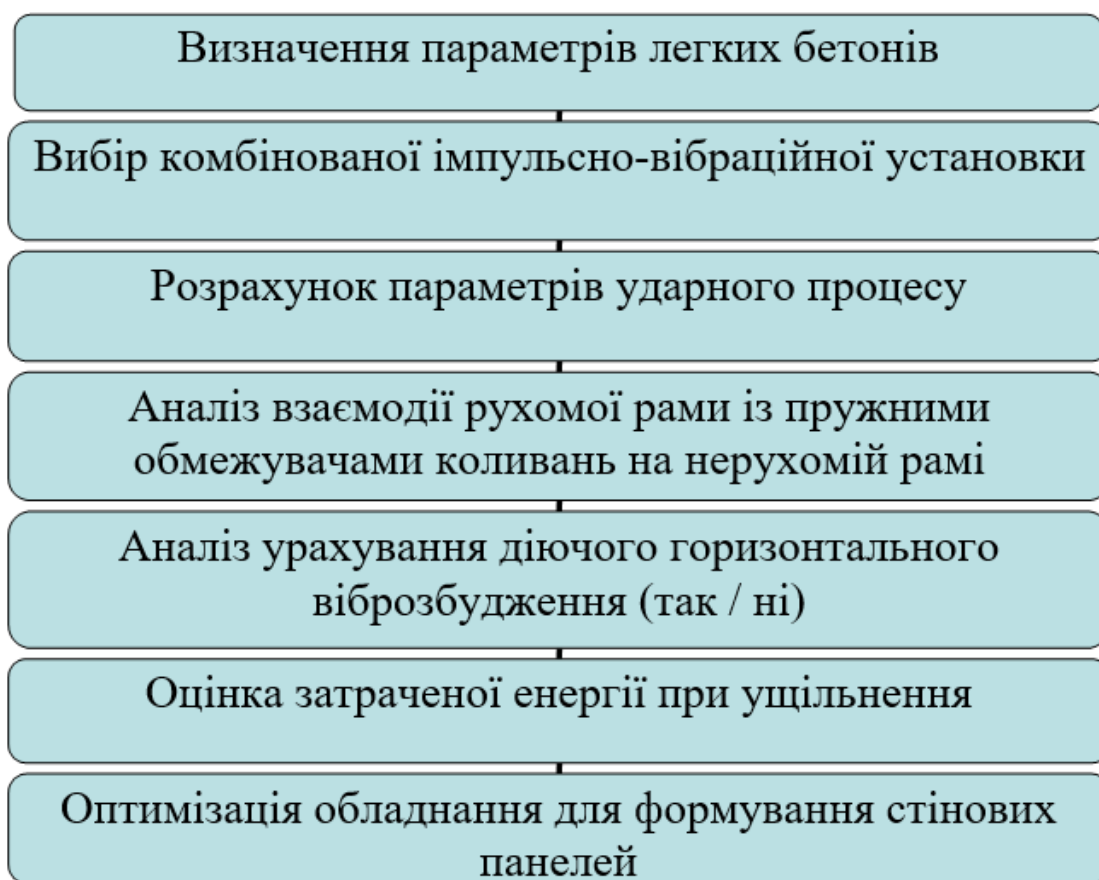


Рисунок 4.1 – Алгоритм підбору обладнання для формування стінових панелей за допомогою комбінованої імпульсно-вібраційної установки

Таблиця 4.2

Методика розрахунку комбінованої імпульсно-вібраційної установки

№ п/п	Назва параметра	Аналітична залежність
1	2	3
1.	Кінетична енергія удару привантажувача, Дж	15,69
2	Час удару між привантажувачем і рамою (із врахуванням пружного обмежника), с	208,80
3	Максимальне прискорення при ударі, м/с ²	208,8
4.	Деформація пружного обмежника, м	0,0008
5.	Енергія, поглинута обмежувачем, Дж:	1,74
6.	Енергія, що передається в бетонну суміш (за рахунок пружної дії), Дж:	12,38
7.	Частота коливань рухомої рами, Гц	72,64
8.	Потужність віброзбуджувача горизонтального збудження, Вт:	600
9.	Коефіцієнт відновлення при ударі:	0,7

4.3 Результати виробничих випробувань дослідного зразка комбінованої імпульсно-вібраційної установки для ущільнення легкобетонних сумішей

Після завершення етапу лабораторного моделювання та стендових випробувань дослідного зразка ударно-імпульсно вібраційної установки з двокомпонентним привантажувачем і горизонтальним віброзбудженням було прийнято рішення провести виробничі випробування в реальних умовах. Установка була передана на виробничі потужності

КТ «Підприємство „Теплотехбуд“» (м. Полтава, вул. Романтична 13) для формування полістиролбетонних стінових панелей розміром $800 \times 600 \times 100$ мм.

Метою виробничих випробувань було:

перевірка ефективності ущільнення бетонної суміші в умовах великої форми;

оцінка надійності роботи усіх вузлів установки в циклічному режимі;

підтвердження можливості промислового застосування експериментального зразка.

У процесі формування стінових панелей використовувався привантажувач, що складався з двох частин: нижня – жорстко змонтована з вібробуджувачем, верхня – рухома на пружинах з ударними елементами. Кулачковий механізм піднімав і скидав всю форму з бетонною сумішшю на пружні обмежувачі, створюючи імпульсно-ударний вплив, а горизонтальний вібробуджувач активував суміш для зниження в'язкості перед ударом.

За період випробувань було сформовано 27 стінових панелей з полістиролбетону. Усі зразки пройшли випробування на стиск через 28 діб витримки. Середній результат для полістиролбетону становив 3,75 МПа при питомій щільності 820 кг/м^3 , що перевищило показники, отримані при класичних методах ущільнення, щонайменше на 12–15%.

Позитивні технічні особливості конструкції установки:

Можливість точного налаштування енергії удару за рахунок зміни маси рухомої частини привантажувача (100–300 Н).

Комбінована дія вертикального імпульсу та горизонтальної вібрації, що дозволяє рівномірно ущільнювати суміш по всьому об'єму.

Регульований зазор між ударними елементами та змінні обмежувачі ходу форми, що забезпечують контроль часу контакту і амплітуди удару.

Модульна конструкція, що дозволяє застосовувати установку для різних типів бетонів, форм і розмірів виробів.

Енергозберігаючий режим ущільнення, оскільки ефективне ущільнення досягається при порівняно низьких енерговитратах на цикл.

Зменшення рівня шуму та тривалості вібраційного навантаження на персонал завдяки короткочасності ударного імпульсу.

У ході виробничих випробувань було також виявлено певні конструктивні особливості, які потребують доопрацювання:

потреба у збільшенні жорсткості пружин рухомої частини привантажувача при ущільненні важких бетонів;

необхідність встановлення демпферного обмежувача ходу для гасіння надмірних коливань у кінці циклу;

бажано доукомплектувати систему цифровим контролером, який дозволить автоматичне регулювання частоти імпульсів і режиму горизонтальної вібрації.

Загалом, дослідний зразок ударно-вібраційної установки підтвердив технічну ефективність і технологічну доцільність застосування в умовах формування великогабаритних стінових виробів із легких бетонів. Отримані результати є підставою для розроблення дослідно-промислової серії обладнання, що дозволить масово використовувати технологію в будівництві з підвищеними вимогами до енергоефективності та конструктивної якості.

4.4 Рекомендації щодо подальшого вдосконалення конструкції установки для ущільнення легкобетонних виробів

Проведені лабораторні та виробничі дослідження дослідного зразка ударно-вібраційної установки з комбінованим збудженням і двокомпонентним привантажувачем дозволили сформулювати ключові напрями її удосконалення. Пропоновані конструктивні зміни спрямовані на підвищення надійності, зменшення зношування вузлів, а також

покращення ергономіки та стабільності роботи установки в циклічному режимі ущільнення легких бетонів.

Підвищення зносостійкості вузлів напрямного руху рами

З метою запобігання зносу напрямних підшипникових вузлів рухомої рами та для підвищення ресурсу ковзання/качання при багатоцикловому навантаженні, доцільно передбачити:

встановлення гумово-металевих ущільнень манжетного типу на контактних ділянках напрямних;

використання антифрикційних втулок зі сплаву на основі бронзи або білого чавуну з термічною обробкою;

введення системи централізованого або автоматизованого змащування для вузлів з періодичним контактом.

Вдосконалення механізму кулачкового підйому

Під час інтенсивної експлуатації спостерігалось перевантаження та підвищене навантаження на профіль кулачків, що призводить до зростання шуму та зносу. З метою зниження навантажень рекомендовано:

реалізувати демпфувальний елемент між кулачком і підштовхувачем;

застосувати змінні зношувані накладки на профілі кулачків, виготовлені з композитних зносостійких матеріалів;

розробити шумоізоляційний кожух кулачкового вузла для зменшення акустичного навантаження на оператора.

Оптимізація взаємодії ударного привантажувача

З метою підвищення ефективності імпульсного ущільнення та зменшення перенавантаження:

передбачити різні змінні варіанти пружних елементів верхньої частини привантажувача для адаптації під різні типи бетонів;

застосувати налаштування маси рухомої частини привантажувача із використанням змінних вставок або модульної ваги;

забезпечити обмеження ходу ударника з прогресивною амортизацією при досягненні граничного прискорення.

Інтеграція системи контролю режимів ущільнення

Для точнішого керування та документування параметрів ущільнення рекомендовано:

встановити датчики прискорення, положення та навантаження для моніторингу стану системи;

реалізувати інтерфейс оператора з можливістю регулювання частоти імпульсів і амплітуди горизонтальної вібрації;

впровадити архівування параметрів ущільнення для забезпечення якості формованих виробів.

Зменшення вібраційного впливу на раму та фундамент

З метою підвищення комфорту роботи та довговічності конструкції рекомендується:

встановити віброгасники або гумові демпфери між базою установки та фундаментом;

оптимізувати жорсткість опор, щоб зменшити передачу вібрацій на підлогу виробничого цеху.

4.5 Розрахунок економічної ефективності впровадження комбінованої імпульсно-вібраційної установки

На сучасному ринку присутні різні типи установок для формування бетонних виробів, зокрема легких бетонів, однак більшість із них не забезпечують одночасного імпульсного та горизонтального вібраційного впливу, а також не обладнані регульованим двокомпонентним привантажувачем, що є характерною особливістю розробленої конструкції. Саме тому доцільно провести економічне обґрунтування доцільності впровадження нової установки у виробничий процес.

Основним критерієм вибору обладнання для формування стінових панелей з легкобетонних сумішей на основі полістиролбетону є економічна ефективність, яка виражається як різниця приведених витрат

при порівнянні базового (традиційного) варіанту та інноваційної установки.

В якості еталона для визначення економічної ефективності застосування спроектованої комбінованої імпульсно-вібраційної установки приймаємо ударно-вібраційну установку УВ-6 [123].

Галузь застосування еталона та нової техніки ідентичні, що відповідає умовам порівняння варіантів. Вихідні дані наведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

№	Найменування	Один.вим.	УВ-6	Нова техніка
1	Ціна, B	грн.	34000	28000
2	Розмір блока за одну формовку (600x800x200 мм), N	шт	1	1
3	Термін роботи	років	10	10
4	Час ущільнення суміші при формуванні, $t_{ущ.}$	с	60	35
5	Тривалість циклу формування, $t_{ц.форм.}$	хв.	10	8
6	Об'єм фундамента, V	м ³	2	—
7	Встановлена потужність, P	кВт	1,6	1,75 (1,5+0,25)

Визначення економічної ефективності від впровадження спроектованої ударно-вібраційної установки:

$$E = \left(Z_1 \cdot K_B \cdot \frac{B_2}{B_1} - Z_2 \cdot K_B \right) + \left(E_{P.B.1} \cdot \frac{B_2}{B_1} - E_{P.B.2} \right) \quad (4.1)$$

де Z_1 , Z_2 – приведені затрати на виготовлення вібраційних установок та будівництво фундаментів під них, відповідно по базовому та новому варіанту, гр.;

B_1, B_2 – кількість відформованих блоків за один цикл, шт,

K_C – коефіцієнт що враховує зміну терміну роботи обладнання складає 1, оскільки, термін роботи однаковий:0

$$K_C = E_{P.B.2} - E_{P.B.1}, \quad (4.2)$$

де E_C – економія в будівельному виробництві на витратах по експлуатації обладнання.

Визначаємо приведені затрати Z :

$$Z = I_{I.B.} + B_{\Phi}. \quad (4.3)$$

Інвентарна вартість вібраційної установки визначена по оптовій вартості, помноженій на $K_B = 1,12$ коефіцієнт, що враховує витрати на доставку обладнання та його монтаж:

$$I_{I.B.} = B \cdot K_B. \quad (4.5)$$

Витрати на зведення фундаменту B_{Φ} під обладнання

$$B_{\Phi} = V \cdot 3190, \quad (4.6)$$

де 3190 – вартість грн. 1 м³, бетонної суміші.

Витрати на капітальний ремонт $Z_{K.P.}$ та поточне утримання $Z_{П.У.}$:

$$Z_{K.P.} = I_{I.B.} \cdot A_{K.P.}, \quad (4.7)$$

де $A_{K.P.}$ – норма амортизаційних відрахувань 10%;

$$Z_{П.У.} = Z_{K.P.} \cdot 0,8, \quad (4.8)$$

де 0,8 – коефіцієнт відношення річних затрат на поточне утримання обладнання до затрат на капітальний ремонт.

Розрахунок витрат електроенергії за рік $P_{B.E.}$:

$$P_{B.E.} = 1 \cdot 8 \cdot 249 \cdot P \cdot \frac{t_{уц.}}{t_{ц.форм.}}, \quad (4.9)$$

де 1 – число змін протягом доби;

8 – число робочих годин в зміну;

249 – число робочих днів у рік.

Витрати протягом року на електроенергію $E_{ел.}$:

$$E_{ел.} = 11,0 \cdot P_{B.E.}, \quad (4.10)$$

де 11,0 грн. – вартість 1 кВт електроенергії.

Річні витрати на утримання вібраційної площадки $E_{P.B.}$:

$$E_{P.B.} = E_{ел.} + Z_{П.У.} + Z_{К.Р.}, \quad (4.11)$$

Вартість формування одної панелі $E_{БЛ}$:

$$E_{БЛ} = \frac{E_{P.B.} + B_{\Phi} + I_{I.B.}}{\frac{60}{t_{ц.форм.}} \cdot 8 \cdot 249 \cdot N_{БЛ}}. \quad (4.12)$$

Порівняння базової техніки та нової техніки за формулами (4.7-4.17) наведено в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9

Результати розрахунку економічної ефективності

№	Позначення	Базова техніка	Нова техніка
1	Z , грн	47180,0	33600
2	$I_{I.B.}$, грн	40800,0	33600,0
3	B_{Φ} , грн	6380,0	0,0
4	$Z_{К.Р.}$, грн	4080,0	3360,0
5	$Z_{П.У.}$, грн	3264,0	2688,0
6	$P_{B.E.}$, кВт	318,7	348,6
7	$E_{ел.}$, грн	3505,7	3834,6
8	$E_{P.B.}$, грн	10849,7	9882,6
9	$E_{БЛ}$, грн	4,85	2,91
10	E , грн	16176,7	

Розрахунку економічної ефективності показав, що запропонована нами техніка дає річний економічний ефект у розмірі 16176,7 грн., при цьому собівартість ущільнення блока знижується майже в 2 рази.

Очікуваний техніко-економічний ефект від впровадження полягає в зменшенні вартості виготовлення виробів, підвищенні їх якості та зменшенні браку, що сумарно може дати економію понад 150 000 грн на кожні 1000 м² формованих панелей.

4.7. Висновки з розділу 4.

1. Обґрунтовано техніко-технологічні параметри роботи комбінованої імпульсно-вібраційної установки, які забезпечують ефективне ущільнення легкобетонних сумішей з урахуванням типу бетону, висоти підйому, маси привантажувача, частоти обертання кулачкового механізму та параметрів горизонтального збудження.

2. Розроблено методику технічного розрахунку основних динамічних параметрів установки, включаючи кінетичну енергію удару, тривалість імпульсу, енерговтрати, прискорення та частоту коливань, що дозволяє адаптувати систему до різних рецептур легких бетонів.

3. Проведено виробничі випробування дослідного зразка установки на базі КТ «Підприємство „Теплотехбуд“», у ході яких виготовлено 27 стінових панелей із полістиролбетону з середньою міцністю 3,75 МПа і питомою щільністю 820 кг/м³.

4. Виявлено конструктивні особливості, які підлягають вдосконаленню: жорсткість пружин, амортизація крайових коливань, інтеграція цифрового контролера для автоматизації режимів ущільнення.

5. Розрахунок економічної ефективності показав, що впровадження комбінованої установки дає річний економічний ефект у розмірі 16 176,7 грн, а собівартість ущільнення одного блока зменшується майже вдвічі порівняно з базовим варіантом.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз існуючих конструкцій вібраційних машин та обладнання для ущільнення бетонних сумішей за допомогою вібрації, визначено основні перспективні напрямки розроблення та вдосконалення обладнання.

2. Обґрунтовано доцільність просторово комбінованого ущільнення бетонної суміші, що поєднує гармонічні й імпульсні коливання. Такий підхід дозволяє ефективно формувати стінові панелі із легких бетонів, зокрема арболіту та полістиролбетону, забезпечуючи рівномірність ущільнення по висоті виробу та зменшення повітряних включень.

3. Створено комплексну математичну модель системи «установка – бетонна суміш – форма», яка враховує масо-інерційні, демпфуючі, хвильові та контактні ефекти з урахуванням хвильових ефектів та реологічних властивостей середовища. Це дозволило визначити раціональні параметри режимів ущільнення та фазового зсуву для досягнення максимального ущільнення з мінімальними втратами енергії.

4. У результаті досліджень встановлено, що основними параметрами коливального збудження, які визначають ефективність ущільнення бетонної суміші, є частота, амплітуда, тривалість імпульсу та фаза зсуву коливань. Виявлено, що збільшення частоти до оптимального резонансного значення сприяє підвищенню щільності суміші, а амплітуда коливань безпосередньо впливає на глибину проникнення енергії в бетонне середовище. Тривалість імпульсу та фазовий зсув визначають умови формування хвильового поля, яке забезпечує однорідне ущільнення та мінімізацію залишкової пористості, що дозволяє досягти підвищення щільності до 7% і зниження пористості на 1,2–1,5%.

5. Запропоновано інженерну методику визначення оптимальних режимів ущільнення бетонних сумішей, яка базується на поєднанні аналітичного моделювання хвильових процесів, експериментального планування та багатофакторної оптимізації. Методика передбачає

врахування фізико-механічних характеристик суміші (щільність, в'язкість, зерновий склад), параметрів обладнання (тип збудження, маса привантажувача, жорсткість пружних елементів), а також конструкції форми. Оптимальні режими визначаються шляхом побудови поверхонь відгуку й вибору таких комбінацій частоти, амплітуди та тривалості імпульсу, які забезпечують максимальну щільність при мінімальному енергоспоживанні з урахуванням заданого типу бетону.

6. Розроблено й досліджено інноваційну енергоефективну імпульсно-вібраційну установку, що поєднує горизонтальне збудження і вертикальні імпульси від кулачкового приводу. Така конструкція продемонструвала зниження тривалості формувального циклу на 20–25% та економію енергії до 15% порівняно з традиційними методами ущільнення.

7. Проведено експериментальні дослідження, які підтвердили теоретичні розрахунки. Отримано збільшення щільності на 5–7%, зменшення пористості на 1,2–1,5%, а також покращення міцнісних характеристик виробів до 20% за рахунок рівномірного ущільнення.

8. Запропоновано інженерну методику проектування та вибору режимів ущільнення, яка базується на реологічних моделях Бінгама та Кельвіна–Фойгта, і дозволяє адаптувати установку до різних типів бетонних сумішей у виробничих умовах. Практичне значення роботи полягає у створенні обладнання, яке забезпечує надійне формування великогабаритних виробів у складних умовах: обмеженого часу, енергоресурсів і змінної якості бетонної суміші. Отримані результати впроваджено у навчальний процес та рекомендовано для використання у виробництві.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Balachandran B., Magrab E. *Vibrations* / B. Balachandran, E. Magrab. – Toronto : Cengage Learning, 2008. – 712 p.
2. Columbia Machine. *Columbia Vibration Technology (CVT) – vertical vibration for uniform density, cement savings, reduced mold wear, and up to 70% improved homogeneity.* – [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.columbiamachine.com>
3. CPI. *Our solution for your success: CPI Product Overview 2021.* – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://images.cpi-worldwide.com>
4. CPI. *Our solution for your success: CPI Product Overview 2021.* – – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://images.cpi-worldwide.com>
5. Despotovic, Z., Urukalo, D., Lecic, M., Cosic, A. Mathematical modeling of resonant linear vibratory conveyor with electromagnetic excitation: simulations and experimental results. *Applied Mathematical Modelling*. 41, 1–24 (2017)
6. Hartmann K. *Statistische Versuchsplanung und -auswertung in der Stoffwirtschaft* / ed. K. Hartmann. – Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1974. – 552 s.
7. Jamroz Z. *Beton i jego technologie.* – Warszawa : Wydawnictwo naukowe, 2000. – 486 s.
8. Kelly G. *Mechanical Vibrations* / G. Kelly. – Toronto : Cengage Learning, 2011. – 896 p.
9. Kelly S.G. *Mechanical Vibrations: Theory and Applications.* Stamford: Cengage Learning, 2012. 896 p.
10. Luo, G., Ma, L., Lv, X. Dynamic analysis and suppressing chaotic impacts of a two-degree-of-freedom oscillator with a clearance. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*. 10, 756–778 (2009)

11. Luo, G., Yu, J., Xie, J. Codimension two bifurcation and chaos of a vibro-impact forming machine associated with 1:2 resonance case. *Acta Mechanica Sinica*. 22, 185–198 (2006)
12. Maslov A.G. Deep compactor with a concrete mixture laid in a form interaction process investigation / A.G. Maslov, Ja. Batsaikhan, M.M. Nesterenko, T.M. Nesterenko // *International Journal of Engineering & Technology*. – 2018. – Vol. 7, № 4.8. – P. 385–389. – DOI: 10.14419 / ijet.v7i4.8.27275.
13. 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.
14. Michalczyk, J. Transient resonance of machines and devices in general motion. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 50, 577–587 (2012)
15. Michalczyk, J., Czubak, P. Natural vibrations of long vibratory conveyers. *Archives of Metallurgy and Materials*. 51, 145–154 (2006)
16. Mishchuk Ye. O., Nazarenko I. I. Analysis of the energy laws of material destruction. *Strength of Materials and Theory of Structures*, (2023). №110, P. 294–315.
17. Nazarenko I., Dedov O., Bernyk I., Bondarenko A., Onyshchenko A., Lisnevskyi R., Slyusar V. Determining the influence of higher harmonics of nonlinear technological load in dynamic action systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 4, No. 7 (124). P. 79–88. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.285419>
18. Nazarenko I., Ruchynskyi M., Delembovskyi M. The basic parameters of vibration settings for sealing horizontal surfaces // *International Journal of Engineering & Technology*. – 2018. – Vol. 7, No. 3.2 (Spec. iss. 2). – P. 255–259. – <http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14415>.
19. Nazarenko I.I., Dedov O.P., Svidersky A.T., Ruchinsky N.N. Research of energy-saving vibration machines with account of the stress-strain state of

technological environment // The IX International Conference HEAVY MACHINERY HM 2017, Zlatibor, Serbia. – 2017. – P. 14–15.

20. Nazarenko I. Structural analysis of vibration platform for panel units forming and consideration of its utilizing options / Ivan Nazarenko, Oleksandr Diachenko, Vasyl Pryhotskyi, Mykola Nesterenko // Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2021. – Вип. 1 (56). – С. 37–42. – DOI: <https://doi.org/10.26906/znp.2021.56.2505>.

21. Nazarenko I., Slipetskyi V. Analysis and synthesis of creation of vibration machines with an estimation of their efficiency and reliability // Technology audit and production reserves. – 2019. – Vol. 6, No. 1 (50). – P. 29–31. – <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.189057>.

22. Nazarenko I., Slipetskyi V. Development of the organizational principles of formation of the optimal diagram and parameters of vibration system // Technology audit and production reserves. – 2019. – Vol. 5, No. 1 (49). – P. 29–31. – <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.183874>.

23. Nazarenko I.I. The Dynamic Processes Mathematical Modeling in the Traction Coupling Device From Cars to the Trailers / I.I. Nazarenko, M.M. Nesterenko, O.V. Orysenko, A.Yu. Zygun // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, № 4.8. – P. 284–288. – DOI: [10.14419/ijet.v7i4.8.27257](https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.8.27257).

24. Nazarenko I.I., Ruchynskyy M.M., Terenchuk S.A. Doslidzhennya rezhyznykh ta enerhetychnykh kharakterystyk prohresyvnykh vibromashyn // Вісник НТУУ «КПІ». – 2011. – Вип. 63. – С. 214–218. – DOI: <https://doi.org/10.20535/2305-9001.2011.63.58587>.

25. Nesterenko M.M. Theoretical studies of stresses in a layer of a light-concrete mixture, which is compacted on the shock-vibration machine / M.M. Nesterenko, T.M. Nesterenko, T.O. Skliarenko // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, № 3.2. – P. 419–424.

26. Nesterenko M. M., Vedmid V. V. Movement of air voids in lightweight concrete mixtures during vibration compaction. System technologies. – 2025. – T. 3, № 158. – С. 201–208. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-158-2025-20>
27. Nesterenko M.P. Investigation of vibration machine interaction with compacted concrete mixture / M.P. Nesterenko, A.G. Maslov, Ju.S. Salenko // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, № 3.2. – P. 260-264.
28. Nesterenko M.P. Vibrating tables with the spatial oscillations of the moving frame technological properties for forming reinforced concrete products / M.P. Nesterenko, M.M. Nesterenko, O.V. Orysenko, T.O. Sklyarenko // Academic Journal Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering. – 2019. – Vol. 2 (53). – P. 13–19.
29. Nesterenko M.P., Molchanov P.O. Study of vibrations of plate of oscillation cassette setting as active working // Problems of energy and nature use : conference reports materials. – Budapest, 2014. – P. 146–151.
30. Nesterenko M. M., Vedmid V. V. Дослідження впливу вертикальних вібраційних режимів на взаємодію робочого органу віброплощадки з бетонною сумішшю. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. 2025. No. 2. P. 182-188. URL: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2025.2.23> *(Розробив математичну модель та провів експеримент)*.
31. Neville A.M. Właściwości betonu. – Kraków : Polski Cement, 2000. – 874 s.
32. Nguyen H., Tran V. Rheological properties of concrete under vibration. Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 15, No. 4. P. 30–40.
33. Nguyen T., Patel V. Smart Vibration Control Systems in Modern Construction. Automation in Construction. 2022. Vol. 144. P. 104–112.
34. Rivin E.I. Passive vibration isolation / E.I. Rivin. – New York : ASME Press, 2003. – 426 p.

35. Sheka O., Yakovenko A., Vedmid V. Reasoning of the expediency of using vibration supports with variable parameters // 36. наук. праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво = Academic Journal. Series: Industrial Machine Building, Civil Engineering. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2022. – Вип. 2 (59). – С. 27–34. – <https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.XXXX>; <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/14825>.
36. Shigeyuki D., Goryozono Y., Hashimoto S. Study on consolidation of concrete with vibration // Physics Procedia. – 2012. – Vol. 25. – P. 325–332. – <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.091>.
37. Taylor R., White S. Dynamic analysis of vibratory construction equipment. Mechanics of Structures and Machines. 2021. Vol. 49, No. 2. P. 30–40.
38. Wagg, D.J. Multiple non-smooth events in multi-degree-of-freedom vibroimpact systems. Nonlinear Dyn. 43, 137–148 (2006)
39. Wang, J., Shen, Y., Yang, S. Dynamical analysis of a single degree-of-freedom impact oscillator with impulse excitation. Advances in Mechanical Engineering. 9, 1– 10 (2017)
40. Yang H., Feng Y., Wang H., Jeremić B. Energy Dissipation Analysis for Inelastic Reinforced Concrete and Steel Beam-Columns. Engineering Structures. – 2019. – Vol. 197. – Article 109431.
41. Zhyhylyi S.M., Kharchenko M.O., Katella J.O. Mathematical model of the dynamic action of the controlled vibration exciter on the processed medium of mixer with toroidal working container // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, No. 3.2. – P. 478–485. – DOI: 10.14419/ijet.v7i3.2.14576.
42. Азаренков М.О., Гірка В.О., В.І. Лапшин В.І., В.І. Муратов В.І. Теорія коливань та хвиль. Навчальний посібник. – Харків, 2005. – 154 с.
43. Аніщенко А.І. Комплексний підхід до виробництва та ущільнення бетонних блоків для модульного будівництва / А.І. Аніщенко, М.Ю.

- Бугрименко, Д.С. Каленіч, В.В. Блажко, **В.В. Ведмідь** // Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова/ 2025 – №112. – 179–187. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.22>
44. Баранов Ю.О, Клименко М.О, Басараб В.А Методика експериментальних досліджень взаємодії середовища з робочим органом ударно-вібраційної площадки// Техніка будівництва. – 2003. – №11. – С. 24-28.
45. Бікс Ю.С., Ратушняк Г.С., Коц І.В. Моделювання взаємодії бетонної суміші з прес-формою під час ущільнення // Сучасні технології, матеріали та конструкції у будівництві. – 2011. – № 2. – С. 92–95.
46. Боровець В. М., Шенбор В. С., Беспалов А. С. Визначення кінетичних параметрів елементів вібраційної машини з обертовим пристроєм. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2009. – Вип. 43. – С. 3–7.
47. Боровець В.М., Савчин Б.М., Шенбор В.С., Брусенцов В.Г. Вібраційні майданчики для виготовлення бетонних виробів // Спецпроект: анализ научных исследований : веб-сайт. – 2014. – URL: https://www.confcontact.com/2014-specproekt/tn3_borovets.htm (дата звернення: 17.03.2025).
48. Василенко Р.О. Вібромайданчики для формування великорозмірних об'ємних залізобетонних виробів / Р.О. Василенко, М.П. Нестеренко // 36. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава : ПолтНТУ, 2003. – Вип. 13. – С. 182–188.
49. 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>.
50. Визначення раціональних режимів і параметрів віброустановки з складним характером руху / І.І. Назаренко та ін. // Гідроаеромеханіка в

інженерній практиці : матеріали XXIV Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Київ, 27–30 трав. 2019 р.). – Київ : НТУ «КПІ», 2019. – С. 192–194.

51. Гриценко І.О. Математичне моделювання процесів ущільнення бетонних сумішей. Харків: ХНУБА, 2019. 178 с.

52. Гусев Б.В., Зазимко В.Г. Вібраційна технологія бетону. – Київ : Будівельник, 1991. – 230 с.

53. Давиденко Ю.О. Розробка та дослідження керованої віброплощадки для ущільнення легких бетонів : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.02 / Давиденко Юрій Олександрович. – Полтава, 1999. – 181 с.

54. Демченко С.В. Вплив параметрів вібрації на міцність бетону. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. 2022. № 55. С. 89–94.

55. Дєдов О.П. Моделювання та визначення раціональних параметрів робочого процесу формуютьуючої поверхні віброустановки із просторовими коливаннями // Прогресивні технології у машинобудуванні : тези доп. VIII Міжнар. наук.-техн. конф. – 2019. – С. 127.

56. Дєдов О.П. Розповсюдження плоских хвиль напруження в пружно-пластичному середовищі під дією силового навантаження // Техніка будівництва. – 2010. – № 25. – С. 6–73.

57. Дідковський В.С., Дрозденко К.С. Основи аналітичної механіки та теорії коливань: підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. С. 250.

58. 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.

59. Загреба В.П., Дудар І.Н., Коваленко А.О. Технологія роздільного віброімпульсного формування каменебетонних виробів : монографія. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 92 с.

60. Іщук С.І., Гладкий О.В. Техніко-економічні основи промислового виробництва : навч. посіб. – Київ : Академія, 2011. – 296 с.
61. Карвацький А.Я. Механіка суцільних середовищ: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 290 с.
62. Ковальчук В.А. Дослідження резонансних режимів роботи вібраційних машин. Техніка будівництва. 2021. № 48. С. 23–28
63. Коротич Ю.Ю. Складання математичної моделі вібраційного столу // Технічні науки та технології. – 2023. – № 3 (33). – С. 83–96. – DOI: 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-83-96.
64. Кравченко І.М. Керування динамічними параметрами електромагнітної ударно-вібраційної системи / І.М. Кравченко, В.А. Басараб // Техніка будівництва. – К.: КНУБА, 2006. – №19. – С. 56-63.
65. Кривенко П.В. Будівельне матеріалознавство : підручник / П.В. Кривенко та ін. – Київ : ЕксОб, 2004. – 704 с.
66. Кришталь Є.М., Ткачук О.В., Шевченко С.А. Динаміка механічних систем при дії змінних навантажень. Дніпро: Інститут технічної механіки НАН, 2018. 84 с
67. Кузьо, І.В., Ланець, О.С., Гурський, В.М. Оптимізаційний синтез полічастотних вібраційних систем з імпульсним електромагнітним приводом. Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. 47, 2013. С. 3–12.
68. Ланець О.С. Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом. Теоретичні основи та практика створення : монографія / О.С. Ланець. – Львів : Львів. політехніка, 2008. – 324 с.
69. Маслов О., Саленко Ю., Маслова Н. Дослідження взаємодії вібруючої плити з цементобетонною сумішшю // Вісник КНУ імені Михайла Остроградського. – 2011. – Вип. 2/201 (67), ч. 1. – С. 93–98.
70. Маслов О.Г., Нестеренко М.П., Скляренко Т.О. Аналітичні дослідження коливань вібраційної установки для формування бетонних виробів для дорожнього будівництва у режимі холостого ходу // Зб. наук.

праць (Галузеве машинобудування, будівництво) / Полтавський нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – 2012. – Вип. 4 (34). – С. 249–254.

71. Маслов О.Г. Дослідження вібраційного органу для ущільнення бетонних сумішей з віброімпульсними коливаннями / О. Г. Маслов, Ю. С. Саленко, І. І. Жовтяк, Р. А. Вакуленко, В. Л. Дятловська // [Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkdpu_2020_5-6_21). - 2020. - Вип. 5-6. - С. 139-146. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkdpu_2020_5-6_21

72. Мельник П.С. Енергоощадні технології у виробництві залізобетонних виробів. Науковий вісник будівництва. 2022. № 76. С. 102–108.

73. Мороз В.М. Підвищення ефективності процесу вібраційного ущільнення великогабаритних залізобетонних виробів / наук. кер. М.М. Нестеренко, В.В. Ведмідь // Тези 77-ї студ. наук. конф. ХНУБА. – Харків : ХНУБА, 2022. – С. 282–283. – <https://reposit.nupr.edu.ua/handle/PoltNTU/11128>.

74. Назаренко І. Огляд і аналіз вібраційного обладнання для формування плоских залізобетонних виробів / І. Назаренко, О. Дєдов, О. Дьяченко, А. Свідерський // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2017. – Вип. 90. – С. 49–58.

75. Назаренко І., Дєдов О., Ручинський М., Свідерський А.Т., Сліпецький В.В. Визначення раціональних режимів і параметрів віброустановки з складним характером руху. XXIV міжнародна науково-технічна конференція “Гідроаеромеханіка в інженерній практиці”. 2019. С. 192–194.

76. Назаренко І.І. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії : навч. посіб. / І.І. Назаренко. – Київ : ХНУБА, 2007. – 230 с.

77. Назаренко І.І. Вплив кінематичного віброзбуджувача на коливання рухомої рами вібраційної площадки / І.І. Назаренко, М.М. Нестеренко, Т.М. Нестеренко, А.Є. Бондаренко // Академічна й університетська наука:

результати та перспективи : зб. наук. праць XIII Міжнар. наук.-практ. конф., 10–11 груд. 2020 р. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2020. – С. 248–251.

78. Назаренко І.І. Дослідження конструктивних та технологічних параметрів вібраційних машин для формування малогабаритних виробів / І.І. Назаренко, М.М. Нестеренко // Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2021 : тези II Міжнар. наук.-техн. конф. (Вінниця, 15 трав. 2021 р.). – Вінниця : ВНТУ, 2021. – С. 377–378. – URL : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2021/schedConf/presentations>.

79. Назаренко І.І. Ефективність використання різних типів збудників коливань в машинах технологічного призначення / І.І. Назаренко та ін. // Перспективи розвитку машинобудування та транспорту : тези доп. I Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Вінниця, 13–15 трав. 2019 р.). – Вінниця : Едельвейс, 2019. – С. 256–259.

80. Назаренко І.І. Машина для виробництва будівельних матеріалів : підручник / І.І. Назаренко. – Київ : КНУБА, 1999. – 488 с.

81. Назаренко І.І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем : навч. посіб. (2-е вид.) / І.І. Назаренко. – Київ, 2010. – 440 с.

82. Назаренко І.І. Теоретичні дослідження робочого процесу ударно-вібраційної установки з визначенням законів руху та напружень в шарі бетонної суміші, що ущільнюється при кінематичному збудженні коливань / І.І. Назаренко, М.М. Нестеренко, С.М. Жигилій, Т.М. Нестеренко // [Науковий вісник будівництва](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2016_86_4_37). - 2016. - Т. 86, № 4. - С. 172-176. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2016_86_4_37,

83. Назаренко І.І., Дєдов О.П. Цілеспрямоване застосування форми коливань формоутворюючої поверхні вібраційної установки для реалізації полічастотного режиму ущільнення // Матеріали II Всеукр. наук.-техн. конф. «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки». – 2018. – С. 59–61.

84. 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/gbdmm1892.0301>.
85. Назаренко І.І., Нестеренко М.М., Ведмідь В.В. Розроблення високоефективного вібраційного обладнання для формування залізобетонних стінових панелей // Тези 74-ї наук. конф. Нац. ун-ту «Полтавська політехніка» (Полтава, 25 квіт. – 21 трав. 2022 р.). – Полтава : Нац. ун-т ім. Ю. Кондратюка, 2022. – Т. 1. – С. 152–153. – <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/10893>.
86. 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. (Київ, 17–19 трав. 2022 р.). – Київ : КНУБА, 2022. – С. 12–14. – <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/11137>.
87. Назаренко І.І., Нестеренко М.М., Нестеренко Т.М., Ведмідь В.В. Дослідження напружено-деформованого стану складових та формоутворюючих елементів вібраційних машин із мінімізацією металоємності // Тези X Міжнар. наук.-практ. конф. «Ресурс і безпека експлуатації конструкцій, будівель та споруд» (Харків, 26–27 жовт. 2021 р.). – Харків : ХНУБА, 2021. – С. 75–76. – <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/10090>.
88. Назаренко І.І., Нестеренко М.М., Нестеренко Т.М., Ведмідь В.В. Лабораторний вібромайданчик зі змінно направленими коливаннями для ущільнення бетонних сумішей // Комплексні композитні конструкції будівель та споруд в умовах воєнного часу (CSCS-2022) : зб. наук. пр. XIV Міжнар. наук.-техн. конф. – Полтава : Нац. ун-т ім. Ю. Кондратюка, 2022. – С. 84–86. – <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/11135>.

89. Назаренко І.І., Нестеренко М.М., Орісенко О.В., Ведмідь В.В. Структурний та параметричний синтез вібраційних машин // Академічна й університетська наука: результати та перспективи : зб. наук. пр. XIV Міжнар. наук.-практ. конф. (Полтава, 09 груд. 2021 р.). – Полтава : Нац. ун-т ім. Ю. Кондратюка, 2021. – С. 282–285. – <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/10096>.
90. Назаренко І.І., Ручинський М.М. Фізичні основи механіки будівельних матеріалів. – Львів : Афіша, 2002. – 128 с.
91. Назаренко І.І., Ручинський М.М., Свідерський А.Т., Дєдов О.П. Оцінка вкладу вищих гармонік в робочий процес машин різного технологічного призначення // Вібрації в техніці та технологіях. – 2011. – № 1 (61). – С. 41–45.
92. Назаренко І.І., Слюсар В.С., Нестеренко М.М., Ведмідь В.В. Оцінка ефективності вібраційного ущільнення бетонних сумішей // Академічна й університетська наука: результати та перспективи : зб. наук. пр. XVII Міжнар. наук.-практ. конф. (Полтава, 12–13 груд. 2024 р.). – Полтава : Нац. ун-т ім. Ю. Кондратюка, 2024. – С. 102–104. – <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/17822>.
93. Назаренко І.І., Туманська О.В. Машини і устаткування підприємств будівельних матеріалів: конструкції та основи експлуатації : підручник / І.І. Назаренко, О.В. Туманська. – Київ : Вища шк., 2004. – 590 с.
94. Настоящий В.А., Нестеренко Т.М., Нестеренко М.М. Розрахунок металевої форми для виготовлення стінових блоків // Зб. наук. праць. Наук. записки КНТУ. – 2010. – № 3. – Кіровоград : КНТУ. – С. 30–34.
95. Нестеренко М.М., **Ведмідь В.В.** Теоретичні положення та аналіз робочого процесу ущільнення бетонних сумішей. Техніка будівництва. – 2025. – № (42). – С. 4–13. <https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0501>
<http://tehbud.knuba.edu.ua/article/view/331978/320980>
96. Нестеренко М.М. Визначення основних характеристик коливань рухомої рами на пружних прокладках // Проблеми розвитку дорожньо-

транспортного і будівельного комплексів : зб. ст. і тез доп. Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Кіровоград, 3–5 жовт. 2013 р.). – Кіровоград : КНТУ, 2013. – С. 67–71.

97. Нестеренко М.М. Використання імпульсного вібраційного привантажувача для доущільнення бетонних сумішей / М.М. Нестеренко, О.І. Панфілов, М.О. Пирлик, В.В. Ведмідь [та ін.] // Створення, експлуатація і ремонт автотранспорту та будівельної техніки : матеріали VII Всеукр. наук.-техн. конф. (Полтава, 25 квіт. 2024 р.). – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2024. – С. 128–130. – <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/16748>.

98. Нестеренко М.М. Дослідження пружних властивостей гумових прокладок ударно-струшувальної установки при різних питомих тисках // Техніка будівництва. – 2010. – № 25. – С. 24–28.

99. Нестеренко М.М. Дослідження робочих параметрів вібраційної установки / М.М. Нестеренко, Т.О. Скляренко, О.С. Дьяченко // 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. 99–100.

100. Нестеренко М.М. Привантажувач для додаткового формування залізобетонних виробів : пат. 33705 Україна, МПК (2006) B28B 1/08 / заявник Нестеренко М.М. ; власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № u200802032 ; заявл. 18.02.2008 ; опубл. 10.07.2008, Бюл. №14. – 4 с.

101. Нестеренко М.М. Форма для виготовлення стінових блоків : пат. 51631 Україна, МПК (2006) B28B 1/08 / заявники Нестеренко М.М., Тобольченко М.О., Чуваєв А.С., Федій І.В. ; власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № u201000429 ; заявл. 18.01.2010 ; опубл. 26.07.2010, Бюл. №14. – 4 с.

102. Нестеренко М.М., Нестеренко Т.М., Скляренко Т.О. Теоретичні дослідження напружень в шарі легкобетонної суміші, що ущільнюється на ударно-вібраційній установці // *Building Innovations* – 2018 : зб. наук. пр. І Міжнар. азербайджан.-укр. конф. (24–25 трав. 2018 р., Баку). – Полтава : ПолтНТУ, 2018. – С. 168–170.
103. Нестеренко М.М., Панфілов О.І., Ведмідь В.В., Пирлик М.О. Дослідження динаміки ущільнення полістиролбетону при вертикальних гармонійних коливаннях віброплощадки // *Тези 77-ї наук. конф. (Полтава, 16–22 трав. 2025 р.)*. – Полтава : Нац. ун-т ім. Ю. Кондратюка, 2025. – Т. 1. – С. 246–247. – <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/18771>.
104. Нестеренко М.М., Панфілов О.І., Пирлик М.О. Використання імпульсного вібраційного привантажувача для доущільнення бетонних сумішей // *Створення, експлуатація і ремонт автотранспорту та будівельної техніки : матеріали VII Всеукр. наук.-техн. конф.* – Полтава, 2024. – С. 128–130.
105. Нестеренко М.М., Панфілов О.І., Пирлик М.О., Ведмідь В.В. Оцінка та аналіз конструкцій і параметрів вібраційних привантажувачів для доущільнення бетонних сумішей // *Створення, експлуатація і ремонт автотранспорту та будівельної техніки : матеріали VI Всеукр. наук.-техн. конф. (Полтава, 11 трав. 2023 р.)*. – Полтава : Нац. ун-т ім. Ю. Кондратюка, 2023. – С. 90–91. – <https://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/12843>.
106. Нестеренко М.П. Вібраційні площадки з просторовими коливаннями для підприємств будівельної індустрії // *Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтава : ПолтНТУ, 2002. – Вип. 9. – С. 90–93.
107. Нестеренко М.П. Вібраційні площадки з просторовими коливаннями для виготовлення залізобетонних виробів широкої номенклатури // *Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтава : ПолтНТУ, 2005. – Вип. 16. – С. 182–191.

108. Нестеренко М.П. Віброустановка для формування малогабаритних бетонних та залізобетонних виробів у касетній формі / М.П. Нестеренко, Т.О. Складенко // Каталог наукових розроблень 2011 / Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Редколегія: Онищенко В.О. та ін. – Полтава: ПолтНТУ, 2011. – С. 86.
109. Нестеренко М.П. Класифікація та оцінка споживчих якостей сучасних вібраційних машин для формування залізобетонних виробів // Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава : ПолтНТУ, 2007. – Вип. 20. – С. 20–25.
110. Нестеренко М.П. Оцінка технологічних можливостей вібраційних машин типу ВПГ для формування залізобетонних виробів / М.П. Нестеренко, Д.С. Педь, Т.М. Нестеренко // Проблеми розвитку будівельного та дорожньо-транспортного комплексів регіону : регіон. наук.-практ. конф., 7–9 жовт. 2008 р. – Кіровоград, 2008. – Вип. 2. – С. 12–17.
111. Нестеренко М.П. Пристрій для ущільнення виробів із бетонних сумішей : пат. 33711 Україна, МПК (2006) B28B 1/08 / заявник Нестеренко М.П., Орисенко О.В., Нестеренко М.М. ; власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № u200802245 ; заявл. 21.02.2008 ; опубл. 10.07.2008, Бюл. №13. – 4 с.
112. Нестеренко М.П. Пристрій для ущільнення стінових блоків із бетонних сумішей : пат. 34903 Україна, МПК (2006) B28B 1/08 / заявники Нестеренко М.П., Орисенко О.В., Нестеренко М.М. ; власник Полтав. нац. техн. ун-т ім. Юрія Кондратюка. – № u200804161 ; заявл. 02.04.2008 ; опубл. 26.08.2008, Бюл. №16. – 4 с.
113. Нестеренко М.П. Прогресивний розвиток вібраційних установок з просторовими коливаннями для формування залізобетонних виробів // Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – 2015. – Вип. 2 (44). – С. 16–23.

114. Нестеренко М.П., Білецький В.С., Семко О.В. Оцінка конструктивно-технологічних параметрів та експлуатаційних якостей вібраційних машин для формування залізобетонних виробів // Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – 2015. – Вип. 1 (43). – С. 231–237.
115. Нестеренко М.П., Орисенко О.В., Нестеренко М.М., Педь Д.С. Розроблення конструкції форми для виробництва стінових блоків // Каталог сучасних наукових розроблень. – Полтава : ПолтНТУ, 2009. – С. 18.
116. Нестеренко М.П., Педь Д.С. Математичне моделювання вібраційних машин для формування залізобетонних виробів з урахуванням впливу бетонної суміші на робочий орган // Вісн. Кременчуц. держ. політехн. ун-ту імені Михайла Остроградського. – 2009. – № 1 (54), ч. 1. – С. 78–80.
117. Нестеренко М.П., Педь Д.С., Молчанов П.О., Скляренко Т.О. Принципи раціонального конструювання стаціонарних вібраційних форм та інженерна методика їх динамічного розрахунку // Тези 64-ї наук. конф. професорів, викладачів, наук. працівників, аспірантів та студентів ун-ту (м. Полтава, 17 квітня – 11 травня 2012 р.). – Полтава, 2012. – Т. 3. – С. 54–56.
118. Нестеренко М.П., Скляренко Т.О. Математичне моделювання коливань вібраційної установки для виготовлення малогабаритних залізобетонних виробів з урахуванням впливу оброблюваного середовища // Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – 2013. – Вип. 1 (36). – С. 256–265.
119. Нечаєв В.П. Теорія планування експерименту : навч. посіб. / В.П. Нечаєв та ін. – Київ : Кондор, 2005. – 232 с.
120. Онищенко О.Г. Нестеренко М.П. Аналітичні дослідження впливу поздовжніх стінок форми на ущільнення бетонної суміші при горизонтально направлених коливаннях віброплощини. Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво) , №1(31). Полтава: ПНТУ, 2012. С. 22–28.

121. Орисенко О.В., Нестеренко М.М. Динамічний розрахунок металевої форми для виготовлення арболітових стінових блоків // Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава : ПолтНТУ, 2010. – Вип. 1 (26). – С. 100–107.
122. Орисенко О.В., Нестеренко М.М. Реакція середовища, що ущільнюється, на ударно-струшуючий рух робочого органа формувальної установки // Тези 62-ої наук. конф. професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів ун-ту (Полтава, 23 квіт. – 13 трав. 2010 р.). – Том 3. – Полтава : ПолтНТУ, 2010. – С. 27–28.
123. Орисенко О.В., Нестеренко М.М., Шевченко О.О. Ударно-струшувальна установка для формування будівельних блоків із жорстких сумішей // Зб. наук. праць каф. «Будівельні, дорожні машини і будівництво» : за матеріалами регіон. наук.-практ. конф. «Проблеми розвитку будівельного та дорожньо-транспортного комплексів регіону». – Кіровоград : КНТУ, 2008. – С. 88–90.
124. Орисенко О.В., Нестеренко М.П. Дослідження просторового руху робочого органа вібраційної машини для формування тубчастих залізобетонних виробів // Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава : ПолтНТУ, 2000. – Вип. 6, ч. 1. – С. 172–175.
125. Орисенко О.В., Рева М. Математичне моделювання руху робочого органу вібраційної установки для формування залізобетонних кілець // Зб. наук. праць студентів ЕМФ. – Полтава : ПолтНТУ, 2013. – Вип. 5. – С. 144–153.
126. Основи теорії взаємодії робочих органів будівельних машин із напружено-деформованим середовищем : монографія / І.І. Назаренко, В.М. Смірнов, А.В. Фомін, А.Т. Свідерський, О.О. Костенюк, О.П. Дєдов, А.Г. Зухба ; за ред. І.І. Назаренка. – Київ : МП Леся, 2010. – 216 с.
127. Пічугін С.Ф., Нестеренко М.М. Дослідження режимів ущільнення легкобетонних сумішей на ударно-вібраційній установці методом математичного планування експерименту // Зб. наук. праць (Галузеве

машинобудування, будівництво). – Полтава : ПолтНТУ, 2013. – Вип. 1 (36), т. 1. – С. 183–190.

128. Повідайло В.О. Вібраційні процеси та обладнання. Львів: Львівська політехніка, 2004. 248с.

129. Поляченко В.А., Сівко В.Й., Назаренко І.І., Яковенко В.Б. та ін. Створення та впровадження енергозберігаючих високотехнологічних процесів і машин у будівельній індустрії. – Київ : МП «Леся», 2006. – 148с.

130. Русан І.В., Сліпецький В.В. Дослідження режимів та параметрів резонансної вібраційної машини для виробництва плоских плит // Гідроаеромеханіка в інженерній практиці : матеріали XXVI Міжнар. наук.-техн. конф. (Херсон, 7–10 верес. 2021 р.). – Київ : НТУ «КПІ», 2021. – С. 276–278.

131. Ручинський М.М., Свідерський А.Г., Дьяченко О.С. Огляд і аналіз існуючих режимів ущільнення бетонних сумішей // Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта : матеріали XX Міжнар. наук.-практ. конф. (Херсон, 10–15 верес. 2019 р.). – Київ, 2019. – С. 298–300.

132. Саєнко Л.В., Ємельяненко М.Г. Дослідження динаміки двохмасної системи вібропресу з урахуванням параметрів формовочного матеріалу // Наук. вісн. буд-ва. – Харків : ХДТУБА, 2004. – № 29. – С. 106–111.

133. Сванадзе, М.М. Про розв'язки рівнянь квазістатичних та усталених коливань у теорії в'язкопружності для матеріалів з подвійною пористістю. Праці Математичного інституту ім. А. Размадзе, 172 (2), 276–292. (2018).

134. Свідерський А.Т., Делембовський М.М. Критерії оцінки якості віброплощадок // Техніка будівництва. – 2010. – Вип. 24. – С. 24–27.

135. Сердюк Л.І. Теорія розмірностей, теорія подібності та математичне моделювання : посіб. для студентів та аспірантів. – Полтава : ПолтНТУ, 2005. – 154 с.

136. 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.

137. Симоновський В. І. Коливання нелінійних систем / В. І. Симоновський. – Суми : Вид-во СумДУ, 1999. – 131 с.

138. Сівко В.Й. Деякі питання теорії будівельних матеріалів і сумішей / В.Й. Сівко, М.П. Нестеренко // Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава : ПолтНТУ, 2000. – Вип. 6, ч. 1. – С. 84–89.

139. Сівко В.Й. Основи механіки вібруємих бетонних сумішей. – Київ : Вища шк., 1988. – 168 с.

140. Сівко В.Й. Теорія деформування будівельних матеріалів і сумішей // Техніка будівництва. – Київ, 2001. – № 13. – С. 32–45.

141. Сівко В.Й., Константиновський Б.Я. Дослідження опору на робочі органи машини при віброущільненні бетонних сумішей // Техніка будівництва. – Київ, 2002. – № 12. – С. 23–28.

142. Сівко В.Й., Кузьмінець М.П. Оцінка впливу робочого середовища на режими коливань вібраційних машин // Теорія і практика будівництва. – 2012. – № 10. – С. 3–5.

143. Слюсар Володимир. Методика визначення енергії на ущільнення бетонної суміші. VI Всеукраїнська науково-технічна конференція «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки». 2023. С. 60–61.

144. Черевко О.М., Давиденко Ю.О., Черевко П.О. Вплив параметрів вібрації на процес ущільнення бетонних сумішей // Зб. наук. праць (Галузеве машинобудування, будівництво). – 2010. – Вип. 2 (27). – С. 138–146.

145. Черевко О.М. Вібраційна площадка для виготовлення тротуарної плитки / О.М. Черевко, Ю.О. Давиденко, О.О. Хероїм // Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво). – Полтава : ПолтНТУ, 2011. – Вип. 1 (29). – С. 36–41.

146. Ярошевич О. М., Забродець І. П., Мартинюк В. Л. Коливання привода вібраційних машин з дебалансними збудниками. Інформаційні системи, механіка та керування в будівництві. – 2018. – Вип. 52. – С. 114–128.

ДОДАТОК А
ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

АКТ

про результати впровадження наукової розробки

«06» Листопада 2024 р.м. Полтава

Ми, що нижче підписалися: з одного боку – директор КП «Підприємство "Теплотехбуд"» Панфілов О.І., з іншого боку – представники Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»: доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки Нестеренко М.М., аспірант Ведмідь В.В., склали цей акт про те, що в період з 09 вересня 2024 року по 06 листопада 2024 року було проведено випробування обладнання, виготовленого за результатами наукових досліджень аспіранта Ведмідя В.В. (тема дослідження: «Розроблення високоефективного комбінованого імпульсно-вібраційного обладнання для формування стінових панелей»).

У ході випробувань було підтверджено технічні показники, заявлені у дослідженнях. Розбіжності між результатами, отриманими під час лабораторних досліджень, та результатами на виробництві – мінімальні.

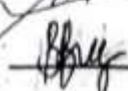
Цей акт не є підставою для здійснення взаємних фінансових розрахунків.

директор КП
«Підприємство "Теплотехбуд"»

Олександр ПАНФІЛОВ



Представники
Національного університету
«Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»

 Микола НЕСТЕРЕНКО
 Василь ВЕДМІДЬ

ДОДАТОК Б
СТІНОВІ ПАНЕЛІ ВИГОТОВЛЕНІ ЗА ДОПОМОГОЮ
ЛАБОРАТОРНОГО КОМБІНОВАНОГО ІМПУЛЬСНО-
ВІБРАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ



Рисунок Б.1 – Готові фрагменти стінових панелей



Рисунок Б.2 – Перевезення стінових панелей