

В.В. Ведмідь, Т.М. Нестеренко, М.М. Нестеренко, М.О. Пирлик
**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КОМБІНОВАНОЇ
ІМПУЛЬСНО-ВІБРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ**

Анотація. У статті наведено результати експериментальних досліджень процесу ущільнення полістиролбетонної суміші за допомогою спеціально розробленої комбінованої імпульсно-вібраційної установки. Актуальність дослідження пов'язана з необхідністю підвищення щільності та міцності легкобетонних виробів шляхом удосконалення технології ущільнення. Метою роботи є встановлення ефективних параметрів ущільнення (зазору між рамами, маси привантажувача та тривалості дії) та оцінка впливу горизонтальних коливань на міцність виробів. Методами дослідження виступили планування експерименту, фізичне моделювання, а також обробка результатів із побудовою поверхонь відгуку. Встановлено, що застосування комбінованого навантаження дозволяє підвищити межу міцності на стиск до 5–7% у порівнянні з традиційним імпульсним ущільненням. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологічних параметрів виробництва стінових виробів із полістиролбетону.

Ключові слова: полістиролбетон, імпульсно-вібраційне ущільнення, комбіновані коливання, лабораторна установка, привантажувач, міцність на стиск, зазор, тривалість ущільнення, експеримент, поверхня відгуку.

Постановка проблеми. Одним із ключових чинників, що впливає на якість легкобетонних виробів, є ефективність процесу ущільнення, який визначає щільність, міцність та однорідність сформованої структури. У традиційних технологіях ущільнення легких бетонів недостатньо враховується вплив специфіки легких заповнювачів, зокрема полістирольних гранул, які мають низьку густину, високу деформативність та значну здатність до амортизації дії зусиль. Це обмежує ефективність звичайних вібраційних методів ущільнення, особливо в умовах складної геометрії або обмеженого часу формування виробів. Крім того, наявність замкнених повітряних включень та неоднорідність розподілу наповнювача знижують експлуатаційні характеристики матеріалу. Вирішенням проблеми може бути застосування комбінованої дії вертикальних імпульсних та горизонтальних вібраційних навантажень, що дозволяє активізувати реологічні властивості суміші, забезпечити ефективне витіснення повітря і рівномірне ущільнення.

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження у сфері вдосконалення процесів ущільнення легких бетонів акцентують увагу на необхідності впровадження нових методів збудження суміші, які враховують особливості легких заповнювачів та високі

вимоги до однорідності й щільності виробів. У працях [1–4] доведено ефективність імпульсного навантаження, що забезпечує покращене ущільнення за рахунок короткочасного, але інтенсивного впливу, який створює більш рівномірний тиск у тілі бетонної суміші. Результати експериментів [2, 5, 7] показують, що поєднання вертикальних імпульсів із горизонтальними вібраціями сприяє активному витісненню повітряних включень, формуванню щільної структури та зменшенню кількості дефектів. У роботах [3, 6] розвивається підхід до опису процесу ущільнення як взаємодії масово-пружинної системи, що дозволяє враховувати вплив динамічних параметрів збудження та резонансних ефектів на перебіг ущільнення. Додатково вивчаються питання впливу конструктивних параметрів обладнання, зокрема маси привантажувача, величини зазору та тривалості ущільнення, на кінцеві міцнісні характеристики матеріалу. Однак бракує системних експериментальних досліджень, які б комплексно аналізували роботу комбінованих імпульсно-вібраційних установок із варіативними режимами ущільнення. Це зумовлює актуальність проведення досліджень у даному напрямі.

Мета 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.

Викладення основного матеріалу дослідження. Розроблена лабораторна установка (рисунок 1) дозволяє моделювати процес імпульсно-вібраційного ущільнення легких бетонів (арболіт, полістиролбетон) в умовах, максимально наближених до промислових. Габарити формувального блоку – 800×600 мм, висотою виробу 100 мм або 200 мм, об'ємна маса – 800 кг/м^3 . Загальна маса рухомої частини з формою та сумішшю становить близько 1000 Н.

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; 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.

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

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 було проаналізовано [8]. У результаті для реалізації багатофакторного експерименту обрано три ключових фактори.

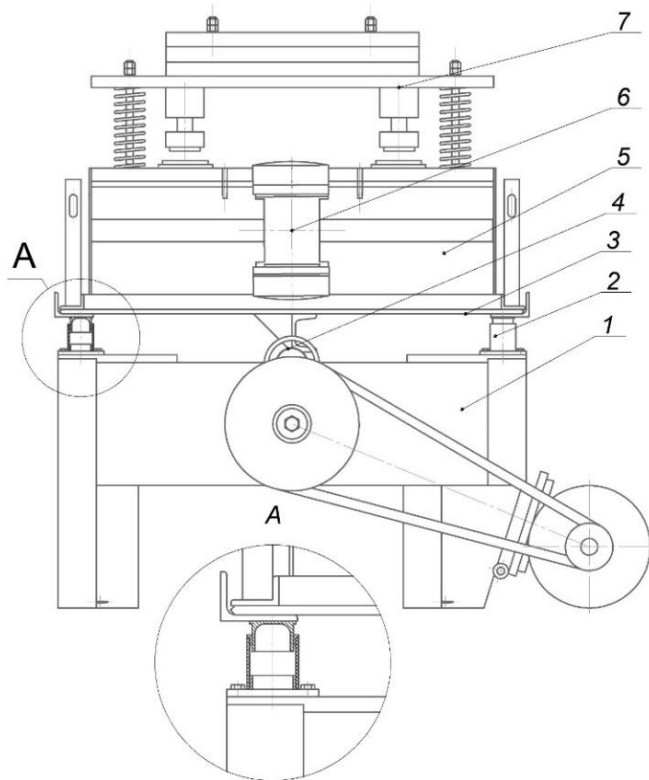


Рисунок 1 – Схема установки

- 1 – рама, 2 – опори, 3 – рама рухома,
4 – кулачковий механізм, 5 – форма,
6 – віброзбуджувач, 7 – привантажувач.

Зазор між рухомою та нерухо-
мою рамою (X_1) – безпосередньо
впливає на тривалість та інтенсив-
ність ударної взаємодії.

Маса рухомої частини привантажувача (X2) – 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 віброзбуджувачем. Ця маса значною мірою визначає імпульс удару.

Тривалість ущільнення (X3) – 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 1.

Таблица 1

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 2. В таблиці 2 наведено всі можливі комбінації для проведення експериментальних досліджень. Рівні варіювання факторів закодовані -1 , 0 , $+1$. Склад полістеролбетонної суміші наведено на в таблиці 3.

Таблиця 2

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

Процес виготовлення зразків передбачав попереднє укладання у формоутворювальну оснастку листа гіпсокартону, монтаж арматурного каркаса та послідовне завантаження полістеролбетонної суміші. На наступному етапі здійснювалося накриття суміші другим листом гіпсокартону, встановлення привантажувача та активація комбінованої

імпульсно-вібраційної установки, яка забезпечувала ущільнення з одночасним впливом вертикальних і горизонтальних коливань. Після завершення віброущільнення витримувалася короткотривала технологічна пауза для стабілізації структури суміші та зменшення внутрішніх напружень. Листи гіпсокартону перед використанням зволожувалися з метою зниження водопоглинання та запобігання утворенню поверхневих дефектів. У результаті формувалася рівномірна плоска панель із полістиролбетону з інтегрованим гіпсокартонним облицюванням, що забезпечувало готовність виробу до застосування у складі стінових конструкцій.

Після завершення первинного тужавіння здійснювалася розпалубка форми, а виріб залишався на піддоні до закінчення нормативного терміну витримки. Зразки витримувалися у вологому середовищі з відносною вологістю $95 \pm 5\%$ та температурою $20 \pm 2^\circ\text{C}$ протягом 28 діб, після чого з сформованої панелі проводилося випилювання кубічних зразків розміром $100 \times 100 \times 100$ мм.

Механічна обробка здійснювалася стрічковою пилкою або дисковою фрезою з низьким рівнем вібрації, щоб уникнути пошкодження внутрішньої структури матеріалу; геометричні параметри зразків перевірялися згідно з вимогами стандартів. Ущільнення суміші проводили за двома схемами: лише під дією вертикальних імпульсних навантажень або з одночасним застосуванням горизонтальних вібрацій, що імітувало комбіновану дію.

Випробування міцності на стиск зразків проводилися на гідравлічному пресі типу ПГМ, із дотриманням вимог до встановлення зразка, перевірки геометрії, нульового положення шкали та герметичності гідросистеми, що забезпечувало точність і повторюваність результатів. 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. Результати експериментальних досліджень без горизонтальних коливань та з горизонтальними коливаннями наведено в таблицях 4 та 5.

Таблиця 3

Склад полістиролбетонної суміші

Компонент	на 1 м^3	на $0,05 \text{ м}^3$
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

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

Для кращої візуалізації та інтерпретації отриманих експериментальних результатів були побудовані поверхні відгуку, які наочно ілюструють вплив досліджуваних факторів на вихідну характеристику. У рамках реалізованої моделі планування один із факторів утримувався на фіксованому (середньому) рівні, тоді як два інші варіювалися в межах заданого інтервалу. Побудова поверхонь відгуку дозволила простежити закономірності зміни міцності матеріалу залежно від варіації впливових параметрів. Графічне подання результатів у вигляді тривимірних поверхонь та їх двовимірних проєкцій дозволило детально проаналізувати характер взаємодії факторів. Відповідні графіки наведено на рисунках 2–7.

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

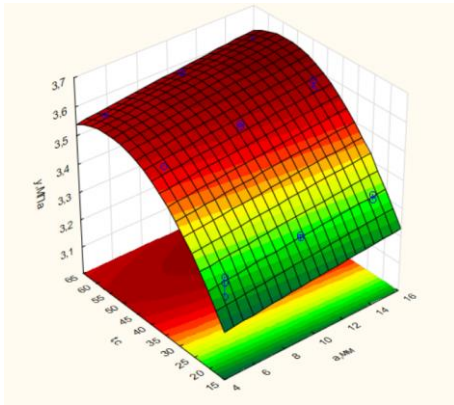


Рисунок 2 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів t та a при $m=200$ Н (при ущільненні без горизонтальних коливань)

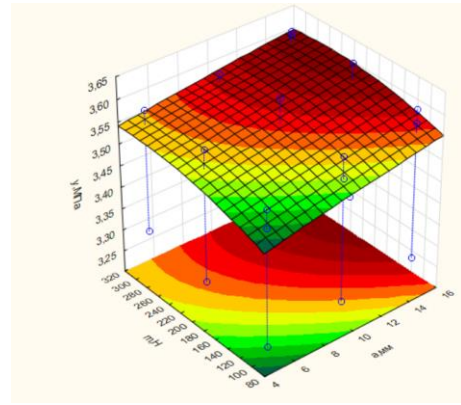


Рисунок 3 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів m та a при $t=40$ с (при ущільненні без горизонтальних коливань)

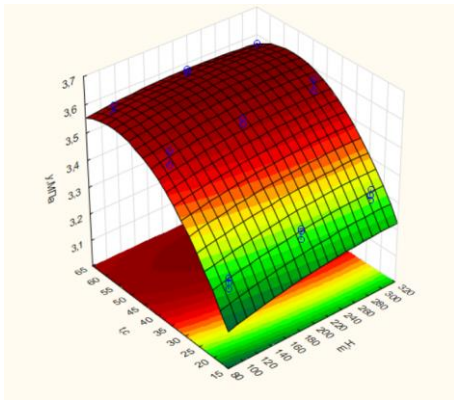


Рисунок 4 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів m та t при $a=10$ мм (при ущільненні без горизонтальних коливань)

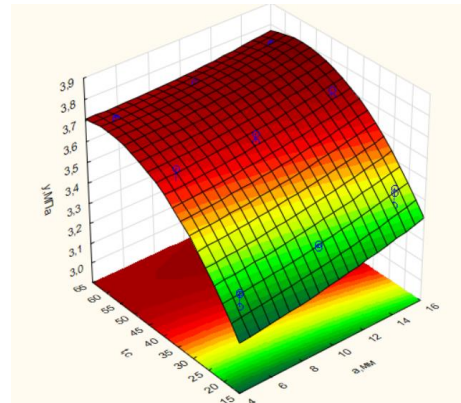


Рисунок 5 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів t та a при $m=200$ Н (при ущільненні з горизонтальними коливаннями)

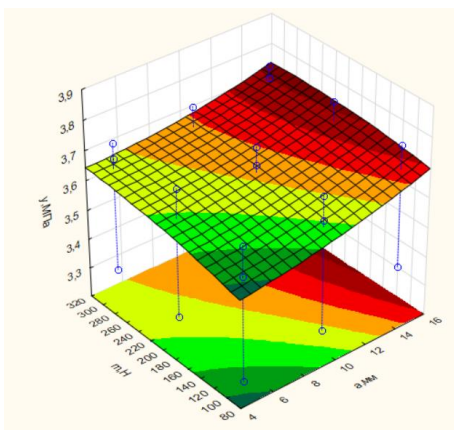


Рисунок 6 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів m та a при $t=40$ с (при ущільненні з горизонтальними коливаннями)

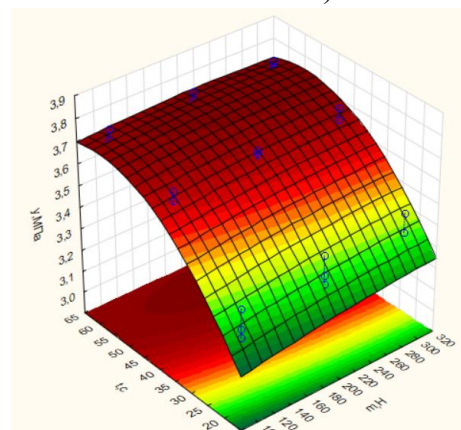


Рисунок 7 – Поверхня відгуку міцності на стиск полістеролбетонних зразків у координатах факторів m та t при $a=10$ мм (при ущільненні з горизонтальними коливаннями)

Висновки: 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 . 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 $a=15\text{мм}$, $m=300\text{Н}$, $t=41\text{с}$.

ЛІТЕРАТУРА

1. Назаренко І. І. Прикладні задачі теорії вібраційних систем : навч. посіб. / І. І. Назаренко. – 2-ге вид. – Київ : Видавничий Дім «Слово», 2010. – 440 с.
2. Maslov O., Savielov D. Theoretical definition of the law of motion for mobile frame of a vibrating platform with polymer concrete when compacting it // Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. – 2020. – No 4. – С. 84–90. – DOI: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.4.84-90>
3. Назаренко І., Дєдов О., Дьяченко О. Обґрунтування алгоритму розрахунку вібраційної установки для ущільнення бетонних сумішей зі змінним режимом роботи // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2019. – No 93. – С. 19–26.
4. Назаренко І. І., Дьяченко О. С. Експериментальні дослідження робочого процесу вібраційної установки для ущільнення бетонних сумішей зі змінним режимом роботи // Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. – 2018. – Вип. 92. – С. 24–31.
5. Nesterenko M.M., Vedmid V.V. Movement of air voids in lightweight concrete mixtures during vibration compaction // System technologies. – 2025. – Vol. 3, No. 158. – P. 201–208. – URL: <https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-158-2025-20> (дата звернення: 11.06.2025).
6. Nesterenko M., Maslov A., Salenko J. Investigation of vibration machine interaction with compacted concrete mixture // International Journal of Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 7, No 3.2. – P. 260–264. – DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14416>
7. Черевко О. М., Давиденко Ю. О., Черевко П. О. Вплив параметрів вібрації на процес ущільнення бетонних сумішей // Зб. наук. пр. (Галузеве машинобудування, будівництво) / редкол.: О. Г. Онищенко (голов. ред.) [та ін.]. – Полтава : ПолтНТУ, 2010. – Вип. 26. – С. 138–146.
8. 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.

REFERENCES

1. Nazarenko, I. I. (2010). Prykladni zadachi teorii vibratsiinykh system [Applied Problems of the Theory of Vibrating Systems] (2nd ed.). Kyiv: Vydavnychiy Dim "Slovo".
2. Maslov, O., & Savielov, D. (2020). Theoretical definition of the law of motion for mobile frame of a vibrating platform with polymer concrete when compacting it. Transactions of

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, (4), 84–90.
<https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.4.84-90>

3. Nazarenko, I., Diedov, O., & Diachenko, O. (2019). Obgruntuvannia alhorytmu rozrakhunku vibratsiinoi ustanovky dlia ushchilnennia betonnykh sumishei zi zminnym rezhymom roboty [Justification of the Calculation Algorithm for a Vibration Installation for Compaction of Concrete Mixtures with a Variable Operating Mode]. Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Reclamation Machines, (93), 19–26.

4. Nazarenko, I. I., & Diachenko, O. S. (2018). Eksperymentalni doslidzhennia robochoho protsesu vibratsiinoi ustanovky dlia ushchilnennia betonnykh sumishei zi zminnym rezhymom roboty [Experimental Studies of the Vibration Installation Operating Process for Compaction of Concrete Mixtures with a Variable Mode]. Hirnychi, budivelni, dorozhni ta melioratyvni mashyny – Mining, Construction, Road and Reclamation Machines, (92), 24–31.

5. Nesterenko, M. M., & Vedmid, V. V. (2025). Movement of air voids in lightweight concrete mixtures during vibration compaction. System Technologies, 3(158), 201–208.
<https://doi.org/10.34185/1562-9945-3-158-2025-20>

6. Nesterenko, M., Maslov, A., & Salenko, J. (2018). Investigation of vibration machine interaction with compacted concrete mixture. International Journal of Engineering and Technology, 7(3.2), 260–264. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14416>

7. Cherevko, O. M., Davydenko, Yu. O., & Cherevko, P. O. (2010). Vplyv parametriv vibratsii na protses ushchilnennia betonnykh sumishei [Influence of Vibration Parameters on the Process of Concrete Mixture Compaction]. In Zbirnyk naukovykh prats (Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo) – Collected Scientific Works (Industrial Engineering, Construction) (Vol. 26, pp. 138–146). Poltava: PoltNTU.

8. Pichuhin, S. F., & Nesterenko, M. M. (2013). Doslidzhennia rezhymiv ushchilnennia lehkobetonnykh sumishei na udarno-vibratsiinii ustanovtsi metodom matematychnoho planuvannia eksperymentu [Investigation of Compaction Modes of Lightweight Concrete Mixtures on a Impact-Vibrational Installation by the Method of Mathematical Experiment Planning]. Zbirnyk naukovykh prats (Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo) – Collected Scientific Works (Industrial Engineering, Construction), 1(36), Part 1, 183–190.

Received 23.06.2025.

Accepted 26.06.2025.

Experimental studies of a combined impulse-vibration installation

The article presents the results of experimental studies on the compaction process of polystyrene concrete mixture using a specially developed combined impulse-vibration installation. The relevance of the research is due to the need to increase the density and compressive strength of lightweight concrete products by improving the compaction technology. The aim of the study is to determine the effective compaction parameters (gap between frames, mass of the loading device, and duration of action) and to evaluate the influence of horizontal vibrations on the strength of the products. The research methods included experimental design, physical modeling, and analysis of results using response surface methodology. It was found that the use of combined loading allows for an increase in compressive strength by 5–7% compared to traditional impulse compaction. The obtained

results can be used to optimize technological parameters for the production of wall elements made of polystyrene concrete.

Keywords: polystyrene concrete, impulse-vibration compaction, combined oscillations, laboratory setup, loading device, compressive strength, gap, compaction duration, experiment, response surface.

Ведмідь Василь Васильович - аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» ORCID: 0000-0003-1514-1212

Нестеренко Тетяна Миколаївна - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри нафтогазової інженерії та технологій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» ORCID: 0000-0002-2387-8575

Нестеренко Микола Миколайович - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» ORCID: 0000-0002-4073-1233

Пирлик Маклим Олександрович - аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» ORCID: 0009-0006-1343-9516

Vedmid Vasyi - Postgraduate student of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» ORCID: 0000-0003-1514-1212

Tetiana Nesterenko – PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Engineering and Technologies, National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» ORCID: 0000-0002-2387-8575

Mykola Nesterenko - PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» ID ORCID: 0000-0002-4073-1233

Pyrlyk Maklym – Postgraduate student of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic» ORCID: 0009-0006-1343-9516