

УДК 693.542.524

DOI <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0602>**<sup>1</sup>Володимир Кулай,**

аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4990-5336>, e-mail: [lykym339@gmail.com](mailto:lykym339@gmail.com)**<sup>1</sup>Олексій Васильєв,**

кандидат технічних наук, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9914-5482>, e-mail: [a.s.vasiliev.76@gmail.com](mailto:a.s.vasiliev.76@gmail.com)<sup>1</sup>Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», просп. Першотравневий 24, м. Полтава, 36011, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ФОРМИ РОБОЧИХ ОРГАНІВ

**АНОТАЦІЯ.** На сьогодні у зв'язку з активним розвитком технологій у галузі виробництва будівельних сумішей одним із найбільш актуальних завдань є створення високоефективних змішувачів. Одним із ключових показників, що впливає як на якість готової суміші так і на економічність процесу, є енергоспоживання змішувальної установки. Автори наводять результати дослідження впливу геометричної форми робочих органів мобільної установки для приготування ніздрюватих бетонів на енерговитрати процесу змішування. Розглядається конструктивні особливості змішувального обладнання примусової дії з вертикальним розташуванням валу та встановлено, що зміна профіля лопатей впливає на інтенсивність переміщення частинок суміші, характер формування потоку та рівень навантаження на приводний механізм. Запропоновано експериментальну методику оцінювання енергоспоживання змішувача шляхом порівняння трьох варіантів робочих органів, які відрізняються геометрією та площею взаємодії з матеріалом. На основі аналізу отриманих даних визначено найбільш раціональну форму лопатей, що забезпечує підвищення однорідності суміші та зниження витрат електроенергії. На основі даних побудовано графічні залежності, які відображають зміну енергоспоживання установки. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні енергоефективних змішувачів примусової дії та оптимізації технологічних режимів приготування ніздрюватих бетонів у виробничих умовах.

**Ключові слова:** бетонозмішувач з вертикальним валом, потужність приводу, математичне моделювання, енергоефективність, робочий орган, лопать.

## STUDY OF THE ENERGY CONSUMPTION OF THE INSTALLATION FOR THE PREPARATION OF NOSTRIL CONCRETE DEPENDING ON THE SHAPE OF THE WORKING BODIES

**ABSTRACT.** Today, in connection with the active development of technologies in the field of production of construction mixtures, one of the most urgent tasks is the creation of highly efficient mixers. One of the key indicators that affects both the quality of the finished mixture and the economy of the process is the energy consumption of the mixing plant. The authors present the results of the study of the influence of the geometric shape of the working bodies of the mobile installation for the preparation of aerated concrete on the energy consumption of the mixing process. The design features of the forced-action mixing equipment with a vertical location of the shaft are considered and it was established that the change in the profile of the blades affects the intensity of movement of the mixture particles, the nature of flow formation and the level of load on the drive mechanism. An experimental method of estimating the energy consumption of the mixer by comparing three variants of working bodies, which differ in geometry and area of interaction with the material, is proposed. Based on the analysis of the obtained data, the most rational shape of the blades was determined, which ensures an increase in the homogeneity of the mixture and a decrease in electricity consumption. On the basis of the data, graphic dependencies are constructed that reflect the change in the power consumption of the installation. The results of the work can be used in the design of energy-efficient forced action mixers and optimization of technological modes of preparation of aerated concrete in production conditions.

**Keywords:** concrete mixer with vertical shaft, drive power, mathematical modeling, energy efficiency, working body, blade.

**1. Постановка проблеми.** Сучасний етап розвитку будівництва відзначається зростанням вимог до енергоефективності технологічних процесів і якості будматеріалів. Сучасні дослідження акцентують увагу на мобільних установках примусової дії, що забезпечують компактність, універсальність і високу енергоефективність. Невідповідність потужності приводу реальним технологічним потребам може призводити до надмірних енергетичних втрат або, навпаки, до погіршення якості перемішування через недостатню інтенсивність дії. Ефективність виготовлення ніздрюватих бетонів у великій мірі визначається характером взаємодії робочого органу змішувача з компонентами суміші. Один із основних конструктивних показників, що визначає якість перемішування, є геометричний вигляд лопатей. Спосіб переміщення частинок та рівномірність розподілу пороутворювача залежать від конфігурації робочих органів. Таким чином, важливість дослідження викликана необхідністю встановлення оптимальної конфігурації робочого органу та підвищення енергоефективності мобільних змішувачів примусової дії через аналітичне й експериментальне дослідження чинників, що впливають на потужність приводу та загальні енергетичні характеристики процесу змішування ніздрюватих бетонів

**2. Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підвищення ефективності будівельного виробництва в сучасних умовах повинно забезпечуватися в основному за рахунок зростання продуктивності праці, скорочення термінів будівництва, і вартості робіт. На сьогодні у зв'язку з активним розвитком технологій у галузі виробництва будівельних сумішей одним із найбільш актуальних завдань є створення вискоелективних змішувачів. До таких установок висуваються вимоги які полягають у зниженні енерговитрат та розширенні номенклатури одержаної продукції яка може бути приготовлена при забезпеченні високої якості змішування суміші. Додаткову актуальність цьому напруму надає складна ситуація на енергетичному ринку України, що обумовлює необхідність розроблення конструкцій змішувачів із суттєво зменшеними витратами електроенергії в процесі експлуатації.

Аналіз останніх наукових і технічних робіт свідчить про зростання інтересу дослідників до проблеми оптимізації енергоспоживання при приготуванні бетонних та розчинних сумішей. У більшості сучасних робіт [1–4] підкреслюється, що величина енерговитрат змішувальних установок визначається комплексом чинників, серед яких ключову роль відіграють конструктивні особливості робочих органів, фізико-механічні властивості суміші та кінематичні режими роботи обладнання. У зв'язку з цим постає необхідність формування теоретичних засад, які дозволять якісно описати вплив кінематичних параметрів та геометрії робочих органів на траєкторії руху частинок суміші під час їх перемішування. Саме такі теоретичні моделі здатні слугувати основою для подальших інженерних рішень щодо зниження енергоспоживання та підвищення ефективності розчинозмішувачів.

Окремий напрям досліджень присвячено удосконаленню методів оцінювання енергоефективності змішувачів [5, 6]. Сучасні підходи базуються на комплексному аналізі, який поєднує експериментальні дані щодо споживаної потужності з аналітичним моделюванням силової взаємодії між робочими органами та частинками суміші.

У значній кількості публікацій дослідники звертають увагу на змішувачі з вертикально розташованим приводним валом. Такі системи забезпечують утворення зон зниженого опору руху частинок, це сприяє інтенсифікації перемішування, покращує рівномірність структури суміші та підвищує ефективність роботи обладнання при приготуванні складних або багатокомпонентних сумішей [7, 8].

**3. Мета і завдання дослідження.** Мета даної статті полягає у висвітленні результатів дослідження впливу форми робочих органів на енерговитрати установки для приготування ніздрюватих бетонів та залежності від впливу факторів, таких як: частота обертання, час перемішування та рухливість суміші.

**4. Основний матеріал і результати.** Процес роботи змішувачів примусової дії ґрунтується на інтенсивному перемішуванні компонентів шляхом обертання лопатей,

розташованих на валу. Такий принцип сприяє активному переміщенню частинок суміші у межах всього робочого об'єму та забезпечує утворення однорідної структури суміші.

За результатами конструкторських напрацювань була створена експериментальна установка для виробництва ніздрюватих бетонів, з вертикально розташованим приводним валом (рис. 1) [9, 10]. Головною ознакою виготовленої установки є можливість швидкої заміни робочих органів та регулювання швидкості обертання лопатей. Це дозволяє досліджувати вплив форми робочих органів на ефективність процесу змішування та витрати електроенергії. Завдяки модульному підходу, установка може бути адаптована до різних рецептур сумішей, одночасно забезпечуючи високу точність експериментів та аналізу динамічних характеристик процесу.



Рис. 1. Установка для приготування ніздрюватих бетонів  
Fig. 1. Installations for the preparation of cellular concrete

В умовах зростання вимог до енергоефективності технологічного обладнання важливо зменшувати електроспоживання установок для приготування ніздрюватих бетонів.

Головною ознакою виготовленої установки є можливість швидкої заміни робочих органів та регулювання швидкості обертання лопатей. Це дозволяє досліджувати вплив форми робочих органів на ефективність процесу змішування та витрати електроенергії. Завдяки модульному підходу, установка може бути адаптована до різних рецептур сумішей, одночасно забезпечуючи високу точність експериментів та аналізу динамічних характеристик процесу.

Головною ознакою виготовленої установки є можливість швидкої заміни робочих органів та регулювання швидкості обертання лопатей. Це дозволяє досліджувати вплив форми робочих органів на ефективність процесу змішування та витрати електроенергії. Завдяки модульному підходу, установка може бути адаптована до різних рецептур сумішей, одночасно забезпечуючи високу точність експериментів та аналізу динамічних характеристик процесу.



а (a)

б (b)

в (c)

Рис. 2. Змінні робочі органи установки для приготування ніздрюватих бетонів

а) робочий орган у формі прямокутного перерізу; б) робочий орган у формі умовно трикутного перерізу; в) робочий орган у формі круглого перерізу.

Fig. 2. Replaceable working elements of the installation for preparing cellular concrete

а) working body in the form of a rectangular section; б) working body in the form of a conventionally triangular section; в) working body in the form of a round section.

З метою вивчення енерговитрат при використанні різних змінних робочих органів установки для приготування ніздрюватих бетонів було проведено експериментальні вимірювання кількості спожитої енергії під час змішування суміші у робочому контейнері (рис. 3). Принцип роботи такого змішувача полягає в обертанні лопатей, закріплених на вертикальному приводному валу в нижній частині змішувальної камери. Під час роботи лопаті здійснюють інтенсивний механічний вплив на суміш, забезпечуючи рівномірний розподіл компонентів у всьому об'ємі робочої зони. Саме умови взаємодії лопатей із середовищем, що переміщується, визначають величину споживаної потужності та рівень енерговитрат установки загалом.



Рис. 3. Показники лічильника при виконанні експерименту

Figure 3. Counter readings during the experiment

Для визначення впливу змінних робочих органів установки на енерговитрати та отримання достовірної математичної моделі впливу робочого органу на матеріал при проведенні експериментальних досліджень застосовані методи математичного планування та математичної статистики [11]. В таблиці 1 наведено діапазони варіювання факторів на основі попередніх теоретичних досліджень та конструктивних обмежень установки. Кожен фактор варіювався на трьох рівнях: мінімальному, середньому та максимальному.

Таблиця 1. Діапазони зміни вихідних факторів.

Table 1. Ranges of change of initial factors.

№	Найменування	Розмірність	Позначення	Верхній рівень (+)	Нульовий рівень (0)	Нижній рівень (-)	Інтервал варіювання
$X_1$	Час впливу	с	$t$	50	40	30	10
$X_2$	Частота обертання	об/хв	$n$	620	465	310	155
$X_3$	Рухливість суміші	см	$\Pi$	12	10	8	2

Для знаходження ступеня впливу рухливості суміші  $\Pi$ , часу перемішування суміші  $t$  та частоти обертання вертикального приводного валу  $n$  на енерговитрати дослідного обладнання при різних формах робочого органу, було поставлено за мету знаходження функціональної залежності впливу вищенаведених параметрів на витрати електроенергії  $P$  досліджуваної установки для приготування ніздрюватих бетонів.

$$P = f(t, n, \Pi). \quad (1)$$

Матриця планування експерименту та отримані результати вимірювань електроенергії які проводилися у діапазонах зміни описаних вище вихідних факторів, наведені в таблиці 2.

Реалізація експерименту та обробка отриманих даних дозволяють отримати математичну модель витрати електроенергії установки для приготування ніздрюватих бетонів у вигляді рівняння регресії:

$$y_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3. \quad (2)$$

де  $y$  – витрати електроенергії;  $b_0, b_1, b_2, b_3$  – коефіцієнти рівняння регресії.

Таблиця 2. Реалізація плану експерименту.

Table 2. Implementation of the experiment plan.

№ досліджу	Матриця планування ( $x_i$ )			Квадрати параметрів ( $x_i^2$ )			Взаємодія ( $x_i x_j$ )			Витрати електроенергії, Вт
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$y_i$
$N_I$	1	+	+	+	+	+	+	+	+	70
	2	—	+	+	+	+	—	—	+	56
	3	+	—	+	+	+	+	—	—	64
	4	—	—	+	+	+	+	+	—	42
	5	+	+	—	+	+	+	+	—	78
	6	—	+	—	+	+	+	—	+	64
	7	+	—	—	+	+	+	—	—	61
	8	—	—	—	+	+	+	+	+	54
$N_a$	9	+	0	0	+	0	0	0	0	65
	10	—	0	0	+	0	0	0	0	55
	11	0	+	0	0	+	0	0	0	59
	12	0	—	0	0	+	0	0	0	57
	13	0	0	+	0	0	+	0	0	50
	14	0	0	—	0	0	+	0	0	58
$n_0$	15	0	0	0	0	0	0	0	0	55
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	56
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	54

Розраховані значення коефіцієнтів регресії перевірено на значущість за критерієм Стьюдента та встановлено, що всі вони є значущими.

Отже, шукане рівняння регресії має вигляд:

$$y_i = 55.239 + 6.7x_1 + 4.9x_2 - 3.3x_3 + 4.606x_1^2 + 2.6.6x_2^2 - 1.394x_3^2 - 0.125x_1x_2 + 1.875x_1x_3 - 0.875x_2x_3. \quad (3)$$

Одержане рівняння встановлює залежність витрати електроенергії від значень визначених факторів. Дане рівняння перевірено на адекватність за критерієм Фішера:

$$\begin{aligned} P_p &\leq P_{таб} \\ 16,64 &\leq 19,3 \end{aligned} \quad (4)$$

Встановлено, що різниця відповідних значень даних експерименту та обчислених за рівнянням регресії не перевищує допустимі межі і рівняння регресії з достатньою точністю відображає реальний процес роботи робочого органу.

Використовуючи програмне забезпечення були побудовані графіки, що демонструють вплив трьох основних факторів – часу впливу, рухливості суміші та частоти обертання на витрати електроенергії при змінних робочих органах.

Графіки залежності величини витрати електроенергії змішувача при фіксованому одному параметрі та змінним двома іншими в визначених діапазонах показано на рис. 4 – 6 (1 – робочий орган у формі прямокутного перерізу; 2 – робочий орган у формі умовно трикутного перерізу; 3 – робочий орган у формі круглого перерізу).

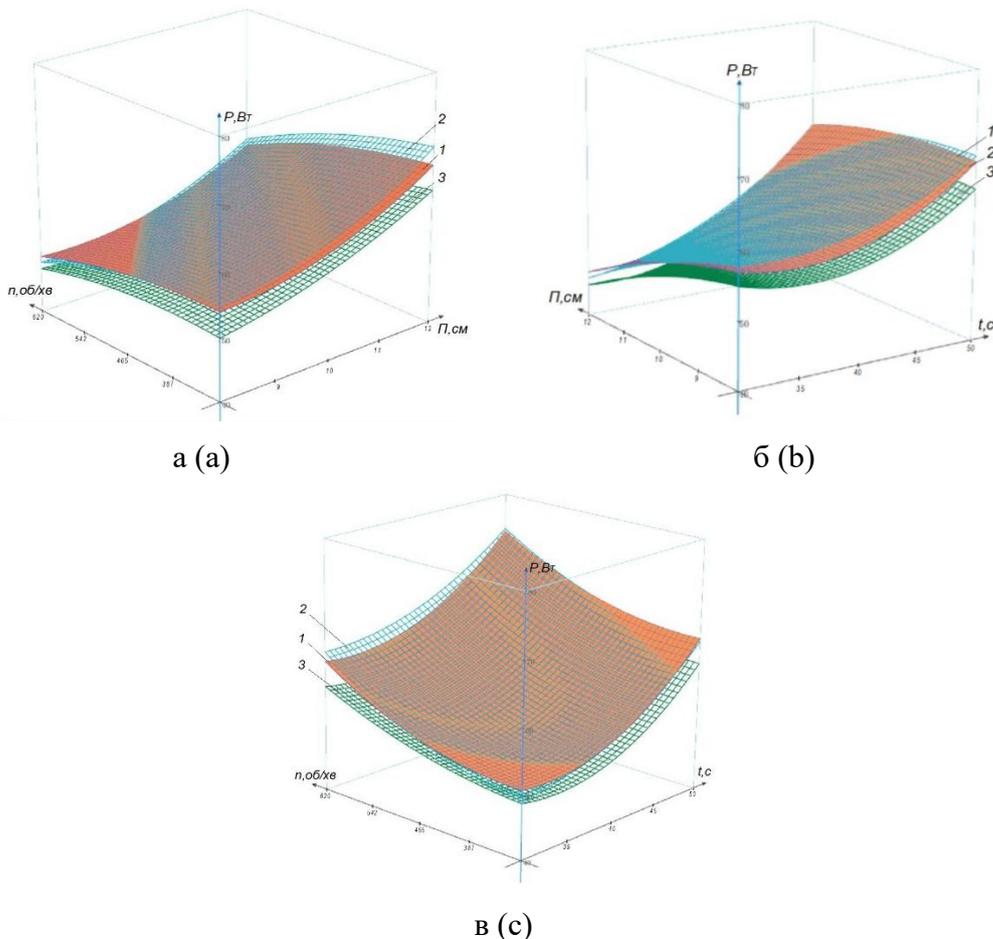


Рис. 4. Графік залежності витрат електроенергії  $P$  від: а - часу впливу  $t$  та рухливості суміші  $\Pi$ ; б - рухливості суміші  $\Pi$  та часу впливу  $t$ ; в - частоти обертання  $n$  та часу впливу  $t$ .

Fig. 4. Graph of the dependence of electricity consumption  $P$  on the: a - time of exposure  $t$  and mobility of the mixture  $\Pi$ ; b - mobility of the mixture  $\Pi$  and exposure time  $t$ ; c - rotation frequency  $n$  and exposure time  $t$

Проаналізувавши отримані експериментальні результати які відображені на графіках (рис. 4–6), простежується залежність впливу форми робочого органу на витрати електроенергії. На всіх трьох графіках робочий орган який має круглий поперечний переріз лопаті змішувача показав найменшу спожиту електроенергію. Це забезпечує можливість глибше зрозуміти характер енергоспоживання установки та визначити шляхи його подальшої оптимізації в умовах промислового застосування. Також було встановлено, що збільшення тривалості перемішування супроводжується пропорційним зростанням енерговитрат, що зумовлено необхідністю підтримання сталого режиму роботи приводу. Разом з тим визначено оптимальний час змішування ніздрюватих бетонів — 40 с, який забезпечує досягнення необхідної однорідності без надмірного енергоспоживання. Значний вплив на формування енергетичного режиму відіграє й рухливість суміші, оптимальне значення якої становить 12 см, що гарантує ефективну взаємодію лопатей із матеріалом та стабільність технологічного процесу.

**5. Висновки.** У статті описано проведення дослідження по встановленню впливу геометричної форми робочого органу на енерговитрати процесу змішування у мобільній установці для приготування ніздрюватих бетонів. Експериментальні дослідження виконані на спеціально розробленій установці які дозволили порівняти роботу трьох типів лопатей — прямокутного перерізу, умовно трикутного перерізу та круглого перерізів та визначити їх вплив на витрати електроенергії без погіршення якості перемішування. В першу чергу було отримано математичну модель, що описує зміну енергоспоживання змішувача залежно від частоти обертання робочого органу, тривалості перемішування та рухливості суміші. Модель підтвердила, що саме ці фактори формують основний енергетичний режим змішування та визначають продуктивність процесу.

Побудовані за результатами експериментальних досліджень графіки залежності спожитої потужності від часу впливу, частота обертання та рухливості суміші показують, що енерговитрати найменші при застосуванні лопаті з круглим перерізом за якої забезпечується мінімальне енергоспоживання при збереженні високої інтенсивності перемішування. Це дозволяє обґрунтовано підходити до вибору оптимальної форми лопатей і режимів роботи змішувальної установки.

Отримані результати становлять практичний інтерес для модернізації існуючих змішувальних установок, а також можуть бути використані при проектуванні нових типів обладнання з підвищеною енергоефективністю. Виявлені закономірності розширюють наукове розуміння процесів взаємодії робочих органів із сумішшю та створюють підґрунтя для подальших досліджень у напрямі вдосконалення конструкцій мобільних змішувачів примусової дії.

#### Список використаних джерел:

1. Назаренко І. І. (2017) Визначення раціональних параметрів гравітаційних бетонозмішувачів. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини. Вип. 90. С. 67-72.
2. Вірченко В. В. (2006) Приготування будівельних розчинових сумішей за допомогою ефективних змішувачів. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Вип. 1(66). Ч. 1. С. 71 – 74.
3. Свиридюк Д. Я. (2011) Аналіз та оцінка конструктивно – технологічних параметрів бетонозмішувачів. Теорія і практика будівництва. Вип. № 8. С. 11-14.
4. Онищенко О. Г., Ващенко К. М. (2006) Розрахунок потужності та визначення опорів, що виникають при роботі стрічкового шнекового розчинозмішувача. Вісник КДПУ. Вип. 1(36). С. 58 – 63
5. Popov S.V., Shpylka A.M., Gnitko. S.M. (2018) The research of mortar components mixing process. International Journal of Engineering & Technology, no.3.2(7), pp. 27–31.
6. Gyawali, T.R. (2019). Mixing of High Ductile Mortar (HDM) in Concrete Mix-ers. Journal of Engineering Technology and Planning, 2019, (1), pp. pp. 1–10. <https://doi.org/10.3126/joetp.v1i0.38238>.

7. Коробко Б.О., Васильєв О.С., Рогозін І.А. (2013). Установа розчинозмішувальна з вертикальним шнеком (Патент України № 81413).
8. Rohozin I.A., Vasyliiev O.S., Pavelieva. A.K. Determination of Building Mortar Mixers Effectiveness. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, no.3.2(7), P. 360–366.
9. Васильєв О.С., Яковенко А.М., Кулай В.П. (2025). Мобільна установа для приготування ніздрюватих бетонів (Патент України № 161192).
10. Васильєв О.С., Кулай В.П. Аналіз необхідної потужності для приведення в рух лопатей установки для приготування ніздрюватих бетонів. *Технічні науки та технології*, 2025. № 3 (41), С. 472–479. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-472-479](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-472-479)
11. Нечаєв В.П., Берідзе Т.М., Кононенко В.В. (2005). Теорія планування експерименту. Київ: Кондор.

## References:

1. Nazarenko I. I. (2017) Vyznachennia ratsionalnykh parametriv hraitatsiinykh betonozmishuvachiv [Determination of rational parameters of gravity concrete mixers]. *Gimichi, budivelni, dorozhni ta meliorativni mashini*. Vol. 90. 67-72.
2. Virchenko V. V. (2006) Preparation of mortar mixtures using effective mixers. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*. Vol. 1(66). Ch. 1. 71 –74.
3. Svyrydiuk D. Ya. (2011) Analiz ta otsinka konstruktyvno – tekhnolohichnykh parametriv betonozmishuvachiv. [Analysis and evaluation of structural and technological parameters of concrete mixers] *Teoriia i praktyka budivnytstva*. Vol. № 8. 11-14.
4. Onyshchenko O., Vashchenko K. (2006) Rozrakhunok potuzhnosti ta vyznachennia oporiv, shcho vynykaiut pry roboti strichkovoho shnekovoho rozchynozmishuvacha. [Calculation of power and determination of resistances arising during the operation of a ribbon screw mortar mixer.] *Visnyk KDPU*. Vol. 1(36). 58 – 63.
5. Popov S.V., Shpylka A.M., Gnitko. S.M. (2018) The research of mortar components mixing process. *International Journal of Engineering & Technology*, no.3.2(7), pp. 27–31.
6. Gyawali, T.R. (2019). Mixing of High Ductile Mortar (HDM) in Concrete Mix-ers. *Journal of Engineering Technology and Planning*, 2019, (1), pp. pp. 1–10. <https://doi.org/10.3126/joetp.v1i10.38238>.
7. Korobko, B.O., Vasyliiev, O.S., Rohozin, I.A. (2013). Ustanovka rozchynozmishuvalna z vertykalnym shnekom [Mortar mixing plant with vertical screw] (Patent Ukrainy - Patent of Ukraine № 81413).
8. Rohozin I.A., Vasyliiev O.S., Pavelieva. A.K. Determination of Building Mortar Mixers Effectiveness. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, no.3.2(7), P. 360–366.
9. Vasyliiev O.S., Yakovenko A.M., Kulay V.P. (2025). Mobil'na ustanovka dlya pryhotuvannya nizdryuvatykh betoniv [Unit for cellular concrete preparation] (Patent Ukrainy - Patent of Ukraine № 161192).
10. Vasyliiev O., Kulay V. (2025) Analysis of the required power for driving the blades of the installation for the preparation of nostril concrete. *Technical sciences and technologies*. №3 (41), 472–479pp. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-472-479](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-472-479)
11. Nechaev V.P., Beridze T.M., Kononenko V.V. (2005). Theory of experiment planning. Kyiv: Condor.