

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 666.983

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2025.109.0.15

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ПОКАЗНИКІВ РОБОТИ
БЕТОНОЗМІШУВАЧА ПРИМУСОВОЇ ДІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ
КРИТЕРІЇВ ПОДІБНОСТІ

Блажко В. В., Григорків О. Б.

Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова

Анотація. У статті досліджено роботу бетонозмішувача за допомогою аналізу фізичних параметрів і використання критеріїв подібності. Визначено основні показники роботи агрегату, такі як продуктивність, енергоспоживання та рівномірність перемішування, з огляду на вплив геометричних і режимних факторів. Застосування критеріїв подібності дало змогу узагальнити результати експериментів і створити передумови для масштабування моделі змішувача. Подані результати можуть бути використані для оптимізації параметрів роботи змішувального обладнання в умовах будівельного виробництва.

Ключові слова: бетонозмішувач, критерії подібності, моделювання, продуктивність, енергоспоживання, механічне обладнання, робочі параметри.

Вступ

У сучасних умовах розвитку будівельних технологій актуальності набуває проблема підвищення ефективності та надійності обладнання для приготування бетонних сумішей [1–3]. Одним із ключових агрегатів у цьому процесі є бетонозмішувачі примусової дії, що забезпечують високу якість перемішування та сталість параметрів суміші. Незважаючи на переваги, це обладнання має низку недоліків, зокрема складну кінематику й значну енергоємність, тому конструкторські рішення таких машин мають базуватись не лише на емпіричних підходах, але й на науково обґрунтованих методах розрахунку, що дають змогу адаптувати техніку під конкретні умови експлуатації [4].

Аналіз наявних рішень

Сучасний ринок змішувального обладнання визначається значною кількістю технічних рішень, серед яких переважають двовальні горизонтальні змішувачі, турбулентні та планетарні змішувачі. Більшість таких машин мають обмежену ефективність у роботі із жорсткими та малорухомими сумішами, через що виникає необхідність у спеціалізованому обладнанні для приготування саме малорухомих (жорстких) бетонних сумішей [5].

Значний внесок у формалізацію процесів перемішування має застосування теорії подібності. У роботах українських і зарубіжних дослідників розглянуто можливості переходу від модельних до повномасштабних систем

способом аналізу безрозмірних критеріїв. Ці критерії дають змогу взяти до уваги фізико-механічні властивості сумішей, геометричні параметри змішувачів і динаміку взаємодії робочих органів із середовищем [6–9].

Встановлено, що системний підхід до моделювання сприяє зменшенню обсягів експериментальних досліджень, водночас зберігаючи точність оцінювання технічних властивостей. У низці робіт запропоновано критерії, що визначають потужність перемішування, рівень диспергування, ступінь гомогенізації. Їх застосування в проектуванні обладнання для жорстких бетонних сумішей дає змогу формувати універсальні залежності для прогнозування продуктивності та енерговитрат [10].

Незважаючи на очевидні переваги, застосування критеріїв подібності в промисловому проектуванні ще не стало стандартом. Це зумовлено як складністю побудови коректних моделей, так і необхідністю високого рівня підготовки фахівців. Саме тому дослідження, що комбінують експериментальні методи й теоретичне моделювання, зберігають актуальність і потребують подальшого розвитку [8].

Мета й постановка завдання

Метою цієї статті є визначення основних показників роботи бетонозмішувача нового конструктивного рішення на основі аналізу його конструкційних і режимних властивостей із застосуванням критеріїв подібності. Такий підхід дає змогу масштабувати й оп-

тимізувати параметри під час переходу від лабораторного зразка обладнання до промислового.

Виклад основного матеріалу

Новизна дослідження полягає в тому, що вперше адаптовано й застосовано системи безрозмірних критеріїв подібності до бетонозмішувача, конструкція якого захищена патентом України [11]. Зазначену систему критеріїв раніше було використано в загальному вигляді для оцінювання процесів у змішувальних апаратах, однак не було застосовано для розрахунку продуктивності та енергоспоживання обладнання з триконтурною схемою перемішування. У цьому дослідженні критерії подібності впроваджено для виведення формул, що дають змогу розрахувати продуктивність і потужність привода без необхідності проведення повномасштабних експериментів.

Робочий орган бетонозмішувача містить три горизонтальних вали, з яких верхній і нижній лопатеві вали забезпечують рух компонентів суміші та руйнування дрібних агломератів, що містять частинки розчинного складника. Середній вал – як у зоні I, так і в

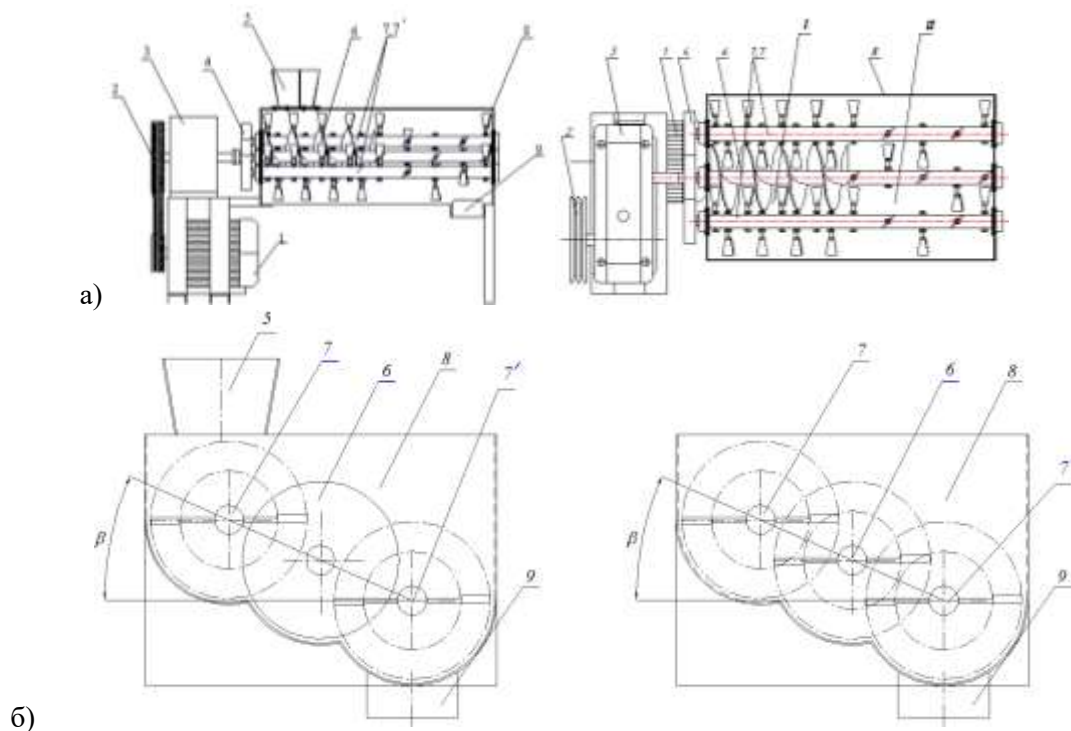
зоні II робочого простору змішувача – транспортує спочатку сухі компоненти суміші, а потім приготовану бетонну суміш у зону вивантаження.

Необхідно звернути увагу на те, що всі три вали беруть участь в організації багатоконтурного руху матеріалу в змішувачі. Це приводить до багаторазового збільшення робочого об'єму, в якому відбувається інтенсивне перемішування – аж до повного об'єму змішувача.

Для використання гравітаційних сил і посилення багатоконтурного руху частинок бетонної суміші в каскадному режимі вали встановлюються під кутом β на різних рівнях (рис. 1, б).

Для цієї конструкції змішувача запропоновано застосування системи безрозмірних критеріїв подібності [12–15], які адаптовано до конкретних особливостей машини з триконтурним перемішуванням.

Уперше узагальнено вплив гравітаційних, інерційних, пружних, поверхнево-активних і турбулентних ефектів у формі п'яти критеріїв $K_{п1}$ – $K_{п5}$.



1 – двигун; 2 – клинопасова передача; 3 – редуктор; 4 – відкрита зубчаста передача; 5 – завантажувальний бункер; 6 – шнековий вал; 7, 7' – верхній і нижній лопатеві вали; 8 – корпус бетонозмішувача; 9 – вивантажувальний патрубок із затвором; I – зона перемішування сухих компонентів бетонної суміші; II – зона приготування бетонної суміші із заданим водоцементним відношенням

Рис. 1. Конструктивна схема бетонозмішувача

а – бетонозмішувач; б – розташування валів у корпусі змішувача

Критерій співвідношення між узагальненим тиском від робочого органа й динамічним тиском середовища. Демонструє, наскільки інтенсивно енергія передається суміші

$$K_{\Pi_1} = \frac{P}{\rho \cdot v^2}. \quad (1)$$

Критерій відношення гравітаційної сили до кінетичної енергії середовища. Це аналог числа Фруда (Fr), яке відтворює вплив сили тяжіння на потік

$$K_{\Pi_2} = \frac{g \cdot l}{v^2}. \quad (2)$$

Порівняння опору середовища до деформації (через P_i) із його здатністю до пружного відновлення (модуль пружності E). Показує, наскільки середовище чинить опір робочому органу

$$K_{\Pi_3} = \frac{P_i}{l^2 \cdot E}. \quad (3)$$

Співвідношення поверхневої активності до зовнішнього тиску. Бере до уваги роль міжфазної взаємодії у сумішах із добавками чи поверхнево-активними речовинами

$$K_{\Pi_4} = \frac{\sigma_\alpha \cdot l^2}{P}. \quad (4)$$

Узагальнене число Рейнольдса, адаптоване до бетонозмішування. Відтворює співвідношення інерційних та сил в'язкості в процесі

$$K_{\Pi_5} = \text{Re} = \frac{\rho \cdot n}{P}, \quad (5)$$

де P – узагальнений питомий тиск з боку робочого органа; ρ – густина середовища; v – швидкість руху середовища (бетонної суміші); g – прискорення вільного падіння; l – поперечний перетин навантаженого мікрооб'єму; P_i – узагальнений опір середовища; E – модуль пружності середовища; σ_α – поверхнева активність речовини.

Зазначені критерії, встановлені на основі загальних закономірностей, властивих для процесів взаємодії робочих органів із середовищем, у якому вони працюють, дали змогу отримати коефіцієнти масштабного переходу від базової моделі до реальної машини.

Для розв'язання системи рівнянь і отримання коефіцієнтів переходу використовували конструктивні розміри: r – радіус оберту лопатей; d – ширина, b – висота лопатей; а також робочі параметри: ω – кутова швидкість робочого органа; W – повна енергія на перемішування компонентів базової моделі, і основні фізико-технічні властивості малорухомих бетонних сумішей

$$K_{\Pi_1} = \frac{P}{\rho \cdot v^2} = 2,18; \quad P = dF \cdot z_n; \quad (5)$$

$$dF = c \cdot \rho \cdot d \cdot b \cdot r \cdot \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2};$$

$$K_{\Pi_2} = \frac{g \cdot l}{v^2} = 32; \quad (6)$$

$$K_{\Pi_3} = \frac{P_i}{l^2 \cdot E} = 10,56; \quad (7)$$

$$P_i = c \cdot \rho \cdot b \cdot \frac{\omega^2}{2} \int_{r_{\text{вн}}}^{r_n} r^2 dr = c \cdot \rho \cdot b \cdot \frac{\omega^2}{2} \left(\frac{r_n^3 - r_{\text{вн}}^3}{3} \right);$$

$$K_{\Pi_4} = \frac{\sigma_\alpha \cdot l^2}{P} = 0,68; \quad (8)$$

$$\sigma_\alpha = \frac{\sum W}{\sum P_{p.o}};$$

$$K_{\Pi_5} = \text{Re} = \frac{\omega \cdot r \cdot i \cdot \rho}{\mu} = 46,1. \quad (9)$$

На основі аналізу й досягнутих результатів виконано низку розрахунків із використанням наявної методики визначення основних параметрів робочої машини.

Базова модель (лабораторний змішувач):

$$\Pi_{\text{тех}} = 3600 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot b \cdot n \cdot z_n \times \sin \alpha \cdot \kappa_3^{\text{cp}} \cdot \kappa_6^{\text{II}} = 4,28 \text{ м}^3/\text{г}. \quad (10)$$

Промисловий змішувач:

$$\Pi_{\text{тех}} = 3600 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 \cdot K_{\Pi_1} - d^2 \cdot K_{\Pi_1}) \times (b \cdot K_{\Pi_1}) \cdot n \cdot z_n \cdot \sin \alpha \cdot \kappa_3^{\text{cp}} \cdot \kappa_6^{\text{II}} = 31 \text{ м}^3/\text{г}. \quad (11)$$

Формули (10) і (11) беруть до уваги геометричні властивості робочого об'єму та кінематичні параметри з огляду на аналогі критеріїв подібності: зокрема вплив інерційності (через R_e), гравітації (через Fr) і взаємодії з поверхнево-активними добавками.

У формулах (12) і (13), що використовують для визначення потужності привода, взято до уваги компоненти потужності:

P_1 – витрати енергії на подолання сил гравітації (зв'язок з F_r);

P_2 – витрати на переміщення суміші в об'ємі (зв'язок з R_e , KP_1);

P_3 – витрати на зсувну деформацію та пружний опір (зв'язок з KP_3).

Потужність привода бетонозмішувача:

– базова модель (лабораторний змішувач):

$$P = \frac{\lambda(P_1 + P_2 + P_3)}{1000 \cdot \eta} = \frac{1,2 \cdot (803 + 1537 + 1591)}{1000 \cdot 0,85} = 5,53 \text{ кВт}; \quad (12)$$

– промисловий змішувач:

$$P = \frac{\lambda(P_1 + P_2 + P_3)}{1000 \cdot \eta} = \frac{1,2 \cdot (1318 + 5672 + 11460)}{1000 \cdot 0,85} = 21 \text{ кВт}, \quad (13)$$

де λ – коефіцієнт запасу потужності двигуна; η – коефіцієнт корисної дії привода, P_1 , P_2 ; P_3 – узагальнені компоненти потужності.

Висновки

У роботі запропоновано обґрунтований підхід до оцінювання основних експлуатаційних властивостей бетонозмішувача нового конструктивного рішення за допомогою застосування адаптованої системи безрозмірних критеріїв подібності.

На відміну від попередніх досліджень, критерії, розглянуті в працях [12–15], уперше були інтегровані в методику розрахунку продуктивності та потужності привода машини з триконтурним режимом перемішування, що реалізовано в конструкції, захищеній патентом України [11].

Такий підхід дає змогу перейти від лабораторної моделі до промислового зразка без потреби в повномасштабних випробуваннях.

Література

1. Valigi M. C., et al. (2019). Twin-Shaft Mixers' Mechanical Behavior: Power Consumption and Exchanged Forces.
2. Emelyanova I. A. (2008). Features of Preparation of Inactive Mortars in Concrete Mixers with Horizontal Blade Shafts.
3. Волянський О. А. Технологія бетонних і залізобетонних конструкцій: підручник: у 2 ч. Київ: Вища шк., 1994. Ч. 1. Технологія бетону. 271 с.
4. Ващенко К. М., Пархитко Г. С. Дослідження впливу геометричних характеристик робочих органів на ефективність роботи роторного змішувача. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. 2012. Вип. 1 (31). С. 97–103.
5. Будівельна техніка: підручник / В. О. Онищенко та ін. Київ: Кондор-Видавництво, 2017. 416 с.
6. Сидоров В. П. Змішувальні машини в будівництві. Київ: Вища школа, 2015. 208 с.
7. Назаренко М. С., Петренко І. В. Дослідження ефективності змішування бетонних сумішей. *Вісник будівництва*. 2020. № 2. С. 65–71.
8. Бойко І. П., Павленко С. А. Особливості роботи багатовальних змішувачів. *Машини і механізми*. 2018. № 3. С. 44–49.
9. Гришко О. М. Фізичне моделювання в інженерній справі. Львів: ЛПІ, 2017. 146 с.
10. Siddique R., et al. (2024). Control of Concrete Segregation and Quality Enhancement Using Continuous Mixers. *Advances in Civil Engineering*, 2024, 6849967.
11. Емельянова І. А., Баранов А. М., Блажко В. В., Тугай В. В. Змішувач для приготування будівельної суміші: пат. №74444 Україна, МПК B28C5/14 / заявл. 15.12.2005. Держ. департамент інтелектуальної власності України. Опубл. в бюл. № 12, 2006.
12. Kliukas R., Vadiūga R. Analysis of Structural Spun Concrete properties. *In Proceedings of the 3rd International Conferences SDSMS'03*. Klaipėda, Lithuania, 17–19 September 2003. P. 141–150.
13. Kudzys A., Kliukas R. The resistance of compressed spun concrete members reinforced by high-strength steel bars. *Mater. Struct.* 2008. 41, 419–430.
14. Ferraris C. F. (2001). Concrete Mixing Methods and Concrete Mixers: State of the Art. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 106 (2), 391–399.
15. Galletti C., et al. (2023). Numerical Mixing Index: Definition and Application on Concrete Mixer. *Fluids*, 10 (3), 72.

References

1. Valigi, M. C., et al. (2019). Twin-Shaft Mixers' Mechanical Behavior: Power Consumption and Exchanged Forces.
2. Emelyanova, I. A. (2008). Features of Preparation of Inactive Mortars in Concrete Mixers with Horizontal Blade Shafts.

3. Volianskyi, O. A. (1994). Technology of Concrete and Reinforced Concrete Structures: Textbook in Two Parts. Part 1. Concrete Technology. Kyiv: Vyshcha Shkola. (in Ukrainian)
4. Vashchenko, K. M., Parkhitko, H. S. (2012). Study of the Influence of the Geometric Characteristics of Working Bodies on the Efficiency of a Rotary Mixer. *Collection of Scientific Papers (Sectoral Mechanical Engineering, Construction)*, Issue 1(31), 97–103. (in Ukrainian)
5. Onyshchenko, V. O., et al. (2017). Construction Equipment: Textbook. Kyiv: Kondor-Vydavnytstvo. (in Ukrainian)
6. Sydorov, V. P. (2015). Mixing Machines in Construction. Kyiv: Vyshcha Shkola. (in Ukrainian)
7. Nazarenko, M. S., Petrenko, I. V. (2020). Study of the Efficiency of Mixing Concrete Mixtures. *Bulletin of Construction*, 2, 65–71. (in Ukrainian)
8. Boiko, I. P., Pavlenko, S. A. (2018). Peculiarities of Multishaft Mixers Operation. *Machines and Mechanisms*, 3, 44–49. (in Ukrainian)
9. Hryshko, O. M. (2017). Physical Modeling in Engineering. Lviv: Lviv Polytechnic. (in Ukrainian)
10. Siddique, R., et al. (2024). Control of Concrete Segregation and Quality Enhancement Using Continuous Mixers. *Advances in Civil Engineering*, 2024, Article ID 6849967.
11. Emelianova, I. A., Baranov, A. M., Blazhko, V. V., Tuhai, V. V. (2006). Mixer for Preparing Construction Mixture: Patent of Ukraine No. 74444, IPC B28C5/14. Application date: 15.12.2005. State Department of Intellectual Property of Ukraine. Published in Bulletin No. 12. (in Ukrainian)
12. Kliukas, R., & Vadlūga, R. (2003). Analysis of Structural Spun Concrete Properties. *Proceedings of the 3rd International Conference SDSMS'03*, Klaipėda, Lithuania, September 17–19, pp. 141–150.
13. Kudzys, A., & Kliukas, R. (2008). The Resistance of Compressed Spun Concrete Members Reinforced by High-Strength Steel Bars. *Materials and Structures*, 41, 419–430.
14. Ferraris, C. F. (2001). Concrete Mixing Methods and Concrete Mixers: State of the Art. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 106(2), 391–399.
15. Galletti, C., et al. (2023). Numerical Mixing Index: Definition and Application.

Блажко Володимир Володимирович, канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, blazhko.vladimir@kname.edu.ua, тел. +38 097-534-60-67;

Григорків Олексій Борисович, аспірант кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій, Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, oleksii.hryhorkiv@kname.edu.ua, тел. +38 099-030-62-79.

Determination of the main performance indicators of a forced-action concrete mixer using similarity criteria

Abstrac. The article presents a theoretical approach to determining the main performance parameters of a forced-action three-shaft concrete mixer based on the application of similarity theory. A system of dimensionless similarity criteria has been developed, which enables the transfer from a basic laboratory model to a full-scale industrial machine. This method is proposed as a means of optimizing the design and operating parameters of concrete mixers for the preparation of stiff and low-mobility concrete mixes without costly full-scale experimentation. **Problem.** The intensification of technological processes in modern construction requires highly efficient and reliable mixing equipment. Determining the performance characteristics of a real-scale concrete mixer through experimentation can be resource-intensive and time-consuming. Therefore, the need arises for a universal method that allows predicting the operational parameters of the equipment at the design stage. **Goal** The goal of the study is to justify the applicability of similarity criteria for calculating the productivity and drive power of a three-shaft forced concrete mixer. The method aims to provide a mathematically grounded alternative to experimental determination by using a scaling approach based on geometric and dynamic similarity. **Methodology.** The study uses the principles of dimensional analysis and the theory of similarity, particularly Buckingham's π -theorem, to derive a set of key similarity criteria. These criteria describe the interactions between the working elements of the mixer and the concrete mixture, taking into account density, elasticity, surface activity, gravitational and inertial forces. Using these dimensionless numbers, transition coefficients between the basic model and the full-scale machine were calculated. Based on them, formulas for determining productivity and required drive power were derived. **Results.** The research resulted in a set of validated equations for calculating the main performance indicators of a full-scale mixer based on known parameters of a prototype or laboratory model. The system of similarity criteria allows taking into account the influence of design and operating factors without direct testing. It was shown that the three-shaft design enables three-circuit material flow and increased mixing intensity across the entire volume. The proposed approach is recommended for use in the design of energy-efficient and productive mixers for construction applications.

Blazhko Volodymyr, Ph.D., Assoc. Professor, Department of automation and computer-integrated technologies, Kharkiv National University of Urban Economy O. M. Beketova, ORCID: 0000-0002-5649-9379, blazhko.vladimir@kname.edu.ua;

Hryhorkiv Oleksiy, Graduate Student, Department of automation and computer-integrated technologies, Kharkiv National University of Urban Economy O. M. Beketova, oleksii.hryhorkiv@kname.edu.ua.

¹Kharkiv National University of Urban Economy named after O. M. Beketova, 17, Chornoglazivska str., 61002, Kharkiv, Ukraine.

