

Міністерство освіти і науки України
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РУДИК РОСТИСЛАВ ЮРІЙОВИЧ

УДК 621.929:691.32(043.3)

ДИСЕРТАЦІЯ
ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ АВТОНОМНОГО
УНІВЕРСАЛЬНОГО МОБІЛЬНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО
ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ БЕТОНУ

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.

 Р. Ю. Рудик

Науковий керівник

кандидат технічних наук, доцент
Вірченко Віктор Вікторович

АНОТАЦІЯ

Рудик Р.Ю. Обґрунтування параметрів роботи автономного універсального мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетону. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування. – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, 2026.

У будівельній галузі зростає потреба у підвищенні ефективності технологічних процесів приготування бетонних сумішей безпосередньо в умовах будівельного майданчика. Особливо актуальним є застосування автономного, мобільного та малогабаритного обладнання, здатного працювати за відсутності стаціонарного електропостачання та забезпечувати стабільну якість бетонної суміші при мінімальних енергетичних витратах.

Аналіз існуючих конструкцій бетонозмішувачів показав, що традиційні гравітаційні змішувачі, у яких процес перемішування здійснюється за рахунок лопаток та обертання барабана, не забезпечують достатньої інтенсивності перемішування, що призводить до подовження тривалості циклу, підвищення енерговитрат і утворення ділянок з недостатньою однорідністю суміші.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності процесу змішування є застосування осциляційного руху барабана, який дозволяє активізувати внутрішні потоки бетонної суміші, покращити взаємодію її компонентів та зменшити налипання матеріалу на стінки робочого органу. Водночас вплив параметрів осциляційного руху на технологічні та енергетичні показники роботи бетонозмішувачів залишається недостатньо дослідженим.

У зв'язку з цим у дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу обґрунтування параметрів роботи автономного універсального мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетонних сумішей з осциляційним рухом барабана, спрямовану на підвищення ефективності

змішування, зниження енерговитрат та забезпечення високої якості бетонної суміші в умовах будівельного майданчика.

Об'єктом дослідження є автономне універсальне мобільне малогабаритне обладнання для приготування бетону та його конструктивні особливості.

Предметом дослідження є процеси приготування бетонних сумішей за допомогою автономного мобільного обладнання, вплив конструктивних і технологічних параметрів на якість суміші та енергоефективність роботи.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності приготування бетонної суміші в умовах будівельного майданчика шляхом застосування універсального мобільного малогабаритного обладнання з осциляційним рухом барабану і обґрунтування раціональних параметрів його роботи.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

- вперше експериментально встановлено закономірності впливу осциляційного руху барабана та амплітуди зміни кута його нахилу на технологічні й енергетичні показники гравітаційного бетонозмішувача, зокрема на однорідність бетонної суміші, продуктивність, міцність бетону та споживану потужність;

- вперше отримано експериментально-теоретичні залежності, що описують зміну продуктивності бетонозмішувача залежно від частоти осциляцій, частоти обертання барабана та амплітуди зміни кута його нахилу, що дозволяє здійснювати кількісну оцінку ефективності процесу змішування;

- вперше розроблено математичну модель процесу змішування бетонної суміші в гравітаційному бетонозмішувачі шляхом урахування осциляційного руху барабана та формування активних зон змішування в робочому об'ємі, що дало змогу точніше описати рух компонентів суміші та оцінити ефективність їх взаємодії;

- вперше експериментально обґрунтовано раціональні параметри роботи бетонозмішувача з осциляційним рухом барабана: амплітуду зміни кута нахилу барабана $25\text{--}35^\circ$, частоту обертання $30\text{--}40$ об/хв, частоту осциляцій $8\text{--}12$ раз/хв та тривалість змішування $3\text{--}4$ хв, за яких забезпечуються високі показники

однорідності бетонної суміші, продуктивності та енергетичної ефективності процесу;

– отримало подальший розвиток уявлення про механізм інтенсифікації процесу змішування бетонних сумішей у гравітаційних бетонозмішувачах за рахунок поєднання обертального та осциляційного рухів барабана, що сприяє формуванню активних зон змішування та підвищенню інтенсивності масообміну між компонентами суміші.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання розробленого способу змішування бетонних сумішей з осциляційним рухом барабана при створенні та модернізації гравітаційних бетонозмішувачів автономного універсального мобільного виконання.

Запропонований спосіб дозволяє підвищити коефіцієнт однорідності бетонної суміші на 10–12 %, скоротити тривалість змішування на 25–30 % та зменшити енерговитрати на 15–20 % порівняно з традиційним гравітаційним змішуванням, що забезпечує зростання технологічної та енергетичної ефективності процесу приготування бетону в умовах будівельного майданчика.

Отримані в роботі регресійні залежності та раціональні параметри роботи бетонозмішувача можуть бути використані при інженерних розрахунках, проектуванні нового обладнання, а також при виборі режимів роботи змішувальних установок залежно від властивостей бетонної суміші та умов експлуатації.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у виробничу діяльність ТОВ «Виробниче підприємство “Будмеханізація”» (м. Полтава) та ЖБК «Ворскла» (м. Полтава) під час виконання бетонних і ремонтно-будівельних робіт, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Практичне використання розробленого способу підтвердило його доцільність, надійність та ефективність, а також можливість застосування в малогабаритних автономних бетонозмішувальних установках для індивідуального, ремонтного та тимчасового будівництва.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, що зумовлена потребою підвищення ефективності процесів приготування бетонних сумішей в умовах будівельного майданчика, особливо при виконанні малогабаритного та автономного будівництва. Визначено мету та основні завдання дослідження, сформульовано об'єкт і предмет дослідження. Наведено методи дослідження, використані для теоретичного обґрунтування та експериментальної перевірки параметрів автономного універсального мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетону. Сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі виконано аналітичний огляд сучасного стану засобів і технологій приготування бетонних сумішей у будівельному виробництві. Розглянуто вимоги, що висувуються до обладнання для приготування бетону та до показників якості бетонних сумішей, проаналізовано існуючі конструкції бетонозмішувачів, обладнання для приготування бетону та машин для транспортування бетонних сумішей. На основі проведеного аналізу визначено основні недоліки традиційних технічних рішень та обґрунтовано доцільність удосконалення обладнання шляхом впровадження нових способів змішування. Сформульовано мету та завдання подальших теоретичних і експериментальних досліджень.

У другому розділі виконано теоретичні дослідження роботи автономного універсального мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетонних сумішей. Розроблено принципову та конструктивну схему обладнання і обґрунтовано принцип його роботи, що забезпечує виконання повного технологічного циклу в умовах будівельного майданчика. Розроблено математичну модель процесу змішування бетонної суміші в гравітаційному бетонозмішувачі з осциляційним рухом барабана, яка враховує переміщення компонентів суміші в робочому об'ємі та вплив кінематичних параметрів на інтенсивність перемішування. На основі отриманих аналітичних залежностей визначено технічну продуктивність обладнання, досліджено вплив частоти осциляційного руху барабана на енергетичні характеристики процесу та

розроблено методику розрахунку сумарної споживаної потужності з урахуванням витрат енергії на обертальний і осциляційний рухи барабана. Отримані результати дозволили обґрунтувати раціональні режими роботи бетонозмішувача та оцінити його енергоефективність.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень робочих процесів гравітаційного бетонозмішувача з осциляційним рухом барабана. Розроблено програму та методики експериментальних досліджень, наведено характеристику обладнання, матеріалів і вимірювальних засобів. Досліджено вплив частоти обертання барабана, частоти осциляцій, амплітуди зміни кута нахилу барабана та тривалості змішування на показники однорідності бетонної суміші, продуктивність, міцність бетону та споживану потужність. Отримано експериментальні залежності, які дозволили встановити раціональні параметри роботи бетонозмішувача та оцінити ефективність використання осциляційного руху барабана. Виконано порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень, за результатами якого встановлено, що розбіжність між розрахунковими та експериментальними даними не перевищує 10 %, що підтверджує адекватність розроблених математичних моделей та достовірність отриманих результатів.

У четвертому розділі наведено результати реалізації та виробничих випробувань розробленого способу змішування бетонних сумішей з осциляційним рухом барабана в умовах будівельного майданчика. Описано конструктивні та технологічні особливості впровадженого способу, наведено основні технічні характеристики модернізованого гравітаційного бетонозмішувача та результати його лабораторної й виробничої апробації. Проведено виробничі випробування обладнання на будівельних майданчиках, здійснено порівняльну оцінку з традиційним способом змішування та підтверджено підвищення однорідності бетонної суміші, скорочення тривалості змішування і зниження енерговитрат. Практичну ефективність запропонованого способу підтверджено актами впровадження.

У додатках наведено матеріали, що доповнюють і уточнюють основні положення дисертаційної роботи, зокрема розширені результати дослідження процесу змішування бетонної суміші у гравітаційному бетонозмішувачі з осциляційним рухом робочого органу; акти впровадження результатів дослідження у виробничу діяльність будівельних підприємств; матеріали, що підтверджують правову охорону технічних рішень. Додатки містять відомості, які забезпечують повноту викладення результатів дослідження та підтверджують їх практичну значущість.

Ключові слова: бетонна суміш, гравітаційний, бетонозмішувач, осциляційний рух барабана, малогабаритне обладнання, змішування, якість, однорідність суміші, енергоефективність, робочі параметри, реологія, продуктивність, відновлення, математичне моделювання.

ANOTATION

Rudyk R.Yu. Justification of the Operating Parameters of Autonomous Universal Mobile Compact Concrete Mixing Equipment. – Qualification scientific work submitted as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 133 – Industrial Mechanical Engineering. – National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, Poltava, 2026.

In construction industry development, attention is focused on improving efficiency of concrete mixture preparation processes directly at construction sites. Particular importance is associated with autonomous, mobile equipment capable of operating without access to stationary power supply while ensuring concrete mixture quality at minimum energy consumption.

Analysis of existing concrete mixer designs has shown that conventional gravity mixers, where mixing is achieved through blade action and drum rotation, do not provide sufficient mixing intensity. As a result, mixing cycle duration increases, energy consumption rises, and regions with insufficient mixture uniformity are formed.

Improving mixing process efficiency involves application of oscillatory drum motion, which intensifies internal concrete mixture flows, enhances interaction between mixture components, and reduces material adhesion to working surface walls. Influence of oscillatory motion parameters on technological and energy performance of concrete mixers remains insufficiently investigated.

Dissertation addresses an important scientific and engineering problem related to justification of operating parameters for autonomous universal mobile compact equipment intended for concrete mixture preparation with oscillatory drum motion. The study aims to increase mixing efficiency, reduce energy consumption, and ensure high concrete mixture quality under construction site conditions.

The research object is autonomous universal mobile compact equipment intended for concrete preparation together with its design features.

The research subject comprises concrete mixture preparation processes performed using autonomous mobile equipment, as well as the influence of design and technological parameters on mixture quality and operational energy efficiency.

The dissertation objective is to improve concrete mixture preparation efficiency under construction site conditions through application of universal mobile compact equipment with oscillatory drum motion and justification of rational operating parameters.

Scientific novelty of the obtained results is as follows:

- for the first time, relationships describing the influence of oscillatory drum motion and drum inclination angle variation amplitude on technological and energy performance of a gravity concrete mixer were established experimentally, including effects on concrete mixture uniformity, productivity, efficiency coefficient, concrete strength, and power consumption;

- for the first time, experimental–theoretical relationships describing productivity variation and efficiency coefficient variation as functions of oscillation frequency, drum rotational speed, and drum inclination angle variation amplitude were obtained, enabling quantitative assessment of mixing process efficiency;

- the mathematical model of concrete mixture mixing in a gravity concrete mixer was improved through incorporation of oscillatory drum motion and active mixing zone formation within the working volume, making it possible to describe mixture component motion more accurately and evaluate interaction efficiency;

- for the first time, rational operating parameters for a concrete mixer with oscillatory drum motion were substantiated experimentally: drum inclination angle variation amplitude 25–35°, rotational speed 30–40 rpm, oscillation frequency 8–12 min⁻¹, and mixing duration 3–4 min. These parameters ensure high concrete mixture uniformity, productivity, and process energy efficiency;

- further development was achieved in understanding the mechanism of concrete mixture mixing intensification in gravity concrete mixers through a combination of rotational and oscillatory drum motions, promoting active mixing zone formation and increasing mass transfer intensity between mixture components.

Practical significance of the obtained results lies in the possibility of applying the developed concrete mixture mixing method with oscillatory drum motion during development and modernization of autonomous universal mobile gravity concrete mixers.

The proposed method increases the concrete mixture uniformity coefficient by 10–12%, reduces mixing duration by 25–30%, and decreases energy consumption by 15–20% compared with conventional gravity mixing. As a result, technological and energy efficiency of concrete preparation under construction site conditions is significantly improved.

The regression relationships and rational concrete mixer operating parameters obtained in this study can be applied in engineering calculations, new equipment design, and selection of mixing unit operating modes according to concrete mixture properties and operating conditions.

Dissertation research results have been implemented in production activities of LLC “Budmexhanizatsiia Manufacturing Enterprise” (Poltava) and the Vorskla Housing Cooperative (Poltava) during concrete and repair-construction operations, as confirmed by corresponding implementation certificates.

Practical application of the developed method confirmed its feasibility, reliability, and effectiveness, as well as suitability for compact autonomous concrete mixing units intended for individual, repair, and temporary construction projects.

The Introduction substantiates relevance of the dissertation topic, driven by the need to improve efficiency of concrete mixture preparation processes under construction site conditions, particularly in compact-scale and autonomous construction projects. The research objective and main tasks are defined, while the research object and subject are formulated. Research methods applied for theoretical justification and experimental verification of autonomous universal mobile compact concrete preparation equipment parameters are presented. Scientific novelty and practical significance of the obtained results are formulated.

Chapter 1 provides an analytical review of the current state of equipment and technologies used for concrete mixture preparation in construction practice. Requirements imposed on concrete preparation equipment and concrete mixture quality indicators are considered. Existing concrete mixer designs, concrete preparation equipment, and concrete mixture transportation machines are analyzed. Based on the conducted review, major shortcomings of traditional technical solutions are identified, and feasibility of equipment improvement through implementation of new mixing methods is substantiated. The objective and tasks of further theoretical and experimental investigations are formulated.

Chapter 2 presents theoretical investigations into operation of autonomous universal mobile compact concrete preparation equipment. A structural scheme was developed and the operating principle was substantiated, ensuring implementation of a complete technological cycle under construction site conditions. A mathematical model describing the concrete mixture mixing process with oscillatory drum motion was proposed, taking into account the influence of design parameters on mixing intensity. Analytical relationships were used to determine equipment technical productivity and develop a calculation procedure for total power consumption considering energy expenditure associated with rotational and oscillatory drum

motions. This made it possible to substantiate rational operating modes for the developed equipment.

Chapter 3 presents results of experimental investigations into operating processes of a gravity concrete mixer with oscillatory drum motion. An experimental programme and research procedures were developed, and characteristics of equipment, materials, and measuring instruments were provided. The influence of drum rotational speed, oscillation frequency, drum inclination angle variation amplitude, mixing duration, and mixture workability on concrete mixture uniformity, productivity, efficiency coefficient, concrete strength, and power consumption was investigated. Experimental relationships were obtained, making it possible to determine rational concrete mixer operating parameters and evaluate effectiveness of oscillatory drum motion. A comparison between theoretical predictions and experimental results confirmed adequacy of the developed mathematical models and reliability of the obtained relationships.

Chapter 4 presents implementation results and field testing outcomes for the developed concrete mixture mixing method with oscillatory drum motion under construction site conditions. Design and technological features of the implemented method are described, while major technical characteristics of the modified gravity concrete mixer together with laboratory and field-test results are presented. Equipment field tests were carried out at construction sites, a comparative assessment against the conventional mixing method was performed, and improvements in concrete mixture uniformity, reductions in mixing duration, and decreases in energy consumption were confirmed. Practical effectiveness of the proposed method was verified by implementation certificates.

The Appendices contain materials supplementing and clarifying the main provisions of the dissertation, including extended research results related to the concrete mixture mixing process in a gravity concrete mixer with oscillatory working-body motion; implementation certificates confirming application of the obtained results in construction company operations; and documents supporting legal protection of the proposed technical solutions. The appendices provide information ensuring

completeness of research result presentation and confirming their practical significance.

Keywords: concrete mix, gravity, concrete mixer, oscillatory drum movement, small-sized equipment, mixing, quality, mixture uniformity, energy efficiency, operating parameters, rheology, productivity, recovery, mathematical modeling.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

1. Rudyk, R., & Kuzub, Y. (2022). Justification of new equipment development for preparing concrete solutions. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(58), 11–16. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.3077>

Особистий внесок здобувача: проведено аналіз існуючого обладнання, запропоновано концепцію нового малогабаритного мобільного бетонозмішувача.

2. Rudyk, R., & Bidanets, S. (2023). Research on modes and operating parameters of construction mixes preparing equipment. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(60), 25–30.

<https://doi.org/10.26906/znp.2023.60.3183>

Особистий внесок здобувача: досліджено режими та параметри роботи змішувачів, розроблено методику розрахунку потужності та питомих енерговитрат, а також запропоновано критерії оцінки енергоефективності обладнання для приготування бетонних сумішей.

3. Korobko, V., Levchenko, O., & Rudyk, R. (2023). Development of an energy-saving design for the feeding system of a concrete mixing plant. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 2(61), 46–51.

<https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3552>

Особистий внесок здобувача: проведено аналіз існуючих схем системи живлення бетонозмішувальних установок, виявлено їхні недоліки щодо енергоефективності та точності дозування; запропоновано удосконалену

конструкцію з окремим розташуванням бункерів; обґрунтовано переваги запропонованих змін, зокрема зменшення енерговитрат, підвищення продуктивності та скорочення часу зміни матеріалів.

4. Rudyk, R., & Salnikov, R. (2024). Analysis of the mixer geometry and rheology impact on concrete mixture mixing efficiency. *Construction Engineering*, (41), 77–84. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0409>

Особистий внесок здобувача: проведено порівняльний аналіз математичних моделей руху бетонної суміші в гравітаційному бетонозмішувачі, досліджено вплив геометрії робочого органу та реологічних властивостей суміші на ефективність процесу змішування та сформульовано рекомендації щодо підвищення однорідності та енергоефективності процесу.

5. Rudyk Rostyslav, Virchenko Viktor (2025). Increasing the efficiency of gravity mixing for concrete mixtures. *Construction Engineering*, (42), 50-60.

<https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0506>

Особистий внесок здобувача: розроблено математичну модель руху частинок бетонної суміші в гравітаційному бетонозмішувачі, досліджено вплив кута нахилу лопатей, швидкості обертання барабана та реологічних властивостей суміші на інтенсивність перемішування, встановлено оптимальні кінематичні параметри для забезпечення рівномірного розподілу компонентів і підвищення енергоефективності процесу.

Статті в наукових виданнях, що включені

до міжнародних наукометричних баз:

6. Rudyk R. Y., Virchenko V. V., Salnikov R. Y., Kuzub Y. O. (2025). Mathematical modeling of the working body's oscillatory motion in a concrete mixer. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 12(2), pp. D45–D54.

[https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).d4](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).d4)

Особистий внесок здобувача: розроблено математичну модель осциляційного руху робочого органу бетонозмішувача, проведено аналітичний опис кінематики частинок суміші з урахуванням гравітаційних, відцентрових і

сил тертя, виконано чисельне моделювання впливу частоти, амплітуди та кута нахилу барабана на ефективність змішування.

Патенти України на корисну модель:

7. Рудик Р.Ю., Вірченко В.В., Сальніков Р.Ю. Спосіб змішування бетонних сумішей. Патент на корисну модель №159089 Україна. МПК В28С 5/00, С04В 40/00 (2025.01), заявник і патентовласник Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». u202404718; заявл. 01.10.2024; опубл. 24.04.2025, Бюл. № 17.

8. Рудик Р.Ю., Вірченко В.В., Сальніков Р.Ю. Універсальний автономний гравітаційний бетонозмішувач. Патент на корисну модель № 161941 Україна. МПК В28С 5/42, В28С 5/18, G05В 19/042 (2006.01), заявник і патентовласник Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». u202502513; заявл. 28.05.2025; опубл. 21.01.2026, Бюл. № 3.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Рудик Р.Ю., Вірченко В.В., Сальніков Р.Ю., Біданець С.С. Дослідження робочих процесів обладнання для приготування будівельних сумішей. Матеріали VI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки» матеріали», 11 трав. 2023 р. – Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. – С. 50–51.

10. Вірченко Віктор, Рудик Ростислав, Біданець Сергій. Автоматизація обладнання для приготування бетону в умовах будівельного майданчика. Збірник тез та доповідей міжнародної конференції "Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії". (11–12.03.24, м. Харків), . – Х. : Бровін О.В., 2024. – С. 81-83.

11. Рудик Ростислав, Сальніков Роман, Біданець Сергій, Вірченко Віктор. Вивчення шляхів підвищення ефективності роботи обладнання для приготування бетонних розчинів. Матеріали VII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного

транспорту та будівельної техніки» (25.04.24, м. Полтава), . – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2024. – С. 103.

12. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор, Сальніков Роман, Біданець Сергій. Вплив лопатки на змішування бетонної суміші. Тези 76-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, 14 трав.–23 трав. 2024 р.). – Т. 1. – С. 270–271.

13. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор, Сальніков Роман, Біданець Сергій. Розроблення методики та обладнання для приготування бетонних сумішей у гравітаційних змішувачах. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Енергоощадні машини і технології» (Київ, 22-24 трав. 2024 р.). – К.: КНУБА, 2024. – С. 12-15.

14. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор, Сальніков Роман, Кузуб Юрій. Оптимізація енерговитрат бетонозмішувача за допомогою аналізу часового розподілу змішування. Матеріали VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки» (24 квіт. 2025 р., м. Полтава). – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2025. – С. 106–107.

15. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор, Сальніков Роман, Кузуб Юрій. Визначення основних факторів, що впливають на потужність у гравітаційному змішувачі. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Енергоощадні машини і технології» (Київ, 20-21 трав. 2025 р.). – К. : КНУБА, 2025. – С. 36-39.

16. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор. Research on energy efficiency in gravity concrete mixing with oscillatory drum motion. Матеріали XIX всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «сталий розвиток міст: поствоєнний період» (Харків, 28-29 квітня 2026 р.). – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, ч. 2, – С. 79-81.

17. Рудик Ростислав, Сальніков Роман, Вірченко Віктор. Дослідження процесу змішування бетонних сумішей в змішувачі з осциляційним рухом

робочого органа. Тези 78-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, 15 трав.–22 трав. 2026 р.). – Т. 1. – С. 246–247.

ЗМІСТ

ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ПРИГОТУВАННЯ БЕТОНУ	29
1.1 Стан питання та задачі дослідження	29
1.2 Вимоги до обладнання для приготування бетону	30
1.3 Основні показники якості бетонних сумішей та бетону	32
1.4 Аналіз існуючих конструкцій бетонозмішувачів та засобів транспортування бетонних сумішей	37
1.5 Напрямки підвищення ефективності обладнання для приготування бетонних сумішей	57
1.6 Висновки до розділу 1, мета і завдання дослідження	61
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АВТОНОМНОГО УНІВЕРСАЛЬНОГО МОБІЛЬНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО БЕТОНОЗМІШУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ	64
2.1 Конструктивна схема та принцип дії автономного універсального мобільного малогабаритного бетонозмішувача	64
2.2 Розроблення загальної моделі роботи бетонозмішувача за новим способом приготування бетонної суміші	70
2.2.1 Передумови побудови математичної моделі процесу змішування ..	70
2.2.2 Математичне моделювання процесу приготування бетонної суміші у змішувачі	72
2.2.2.1 Дослідження руху бетонної суміші вздовж лопатки барабана	74
2.2.2.2 Дослідження руху бетонної суміші вздовж барабана змішувача ..	89
2.2.2.3 Аналіз розподілу частинок бетонної суміші в об'ємі барабана змішувача	108
2.3 Визначення основних показників роботи бетонозмішувального обладнання	112
2.3.1 Визначення технічної продуктивності	112
2.3.2 Визначення необхідної потужності приводу бетонозмішувача	115

	18	
2.4 Висновки до розділу 2	122	
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ		
РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ БЕТНОЗМІШУВАЧА З ОСЦИЛЯЦІЙНИМ		
РУХОМ БАРАБАНА		124
3.1 Програма експериментальних досліджень	124	
3.2 Характеристика обладнання та матеріалів для проведення		
досліджень	125	
3.2.1 Експериментальне обладнання.....	125	
3.2.2 Матеріали для приготування бетонної суміші.....	126	
3.2.3 Вимірнювальні прилади та лабораторне обладнання	128	
3.3 Методика проведення експериментальних досліджень		
та обробки результатів.....	129	
3.4 Визначення параметрів процесу змішування бетонної суміші		
в бетонозмішувачі з осциляційним рухом барабана	133	
3.5 Дослідження впливу осциляційного руху барабана на процес		
змішування бетонної суміші	141	
3.6 Експериментальне дослідження споживаної потужності		
бетонозмішувача з осциляційним рухом барабана.....	146	
3.7 Визначення продуктивності бетонозмішувача з осциляційним		
рухом барабана	149	
3.8 Висновки до розділу 3	152	
РОЗДІЛ 4 РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІШУВАННЯ		
БЕТОНУ В УМОВАХ БУДІВНИЦТВА		154
4.1 Розроблення та впровадження способу змішування бетонних		
сумішей.....	154	
4.2 Виробничі випробування способу змішування бетонних сумішей...	156	
4.3 Порівняльний аналіз роботи розробленого обладнання		
та гравітаційного бетонозмішувача.....	160	
4.4 Висновки до розділу 4	162	
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	164	

Список використаних джерел.....	166
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача.....	180
ДОДАТОК Б. Дослідження процесу змішування бетонної суміші у гравітаційному бетонозмішувачі за допомогою осциляційного руху робочого органу	183
ДОДАТОК В. Акти впровадження	193
ДОДАТОК Г. Патенти на корисну модель.....	196

ВСТУП

Актуальність теми

Сучасний розвиток будівельної галузі України потребує підвищення ефективності виробничих процесів, зокрема при виготовленні бетонних сумішей. Бетонування є одним з ключових етапів будівництва, від якого залежить міцність, довговічність та економічна доцільність будівельних конструкцій. Однак традиційні методи приготування бетону пов'язані зі значними витратами часу, енергії та ручної праці, що знижує продуктивність робіт і підвищує їх собівартість.

Особливо це стосується малогабаритного будівництва, ремонтних робіт та об'єктів у важкодоступних місцевостях, де використання стаціонарних бетонозмішувальних вузлів є недоцільним або неможливим. Існуюче обладнання характеризується недостатньою продуктивністю, високою енергоємністю та обмеженою автономністю, що обумовлює необхідність розробки нових технічних рішень.

Сьогодні на ринку переважають бетонозмішувачі з механічним приводом, які не гарантують належної однорідності перемішування компонентів, потребують додаткового обладнання для транспортування суміші та відзначаються високою енергомісткістю.

Створення автономного універсального мобільного обладнання для змішування бетону, яке зможе забезпечити високі показники якості суміші, енергоефективність та компактні габарити, дозволить значно підвищити продуктивність бетонних робіт, мінімізувати витрати за рахунок транспортування, скорочення ручної праці та експлуатаційних витрат, що особливо важливо під час роботи на будівельних майданчиках.

Дисертаційна робота спрямована на обґрунтування параметрів роботи обладнання, що є актуальним для сучасної будівельної індустрії та малогабаритного будівництва. Розробка ефективного змішувача для

приготування бетону сприятиме зменшенню тривалості будівництва та покращенню конкурентних переваг новітніх бетонозмішувачів.

Саме тому, наукове обґрунтування та практична реалізація запропонованого рішення мають важливе значення для подальшого розвитку будівельної галузі України.

Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є підвищення ефективності приготування бетонної суміші в умовах будівельного майданчика шляхом застосування універсального мобільного малогабаритного обладнання з осциляційним рухом барабану і обґрунтування раціональних параметрів його роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Провести аналіз існуючих конструкцій обладнання для приготування бетонних сумішей та визначити основні напрямки їх удосконалення з урахуванням вимог мобільності, автономності та універсальності.

2. Розробити принципову схему конструкції мобільного малогабаритного бетонозмішувального обладнання, здатного працювати в автономному режимі.

3. Обґрунтувати вибір типу змішувального обладнання, джерела енергії, системи подачі компонентів та конструкції ємності для приготування бетонної суміші.

4. Розробити математичну модель роботи запропонованого обладнання на основі аналізу динаміки змішування бетонних сумішей, з урахуванням впливу геометричних параметрів робочого органу, осциляційного руху барабану та властивостей компонентів бетону.

5. Провести аналітичні та експериментальні дослідження процесу приготування бетонної суміші, визначити залежності між основними технологічними параметрами обладнання та показниками якості готової суміші.

6. Розрахувати продуктивність та енергоефективність запропонованого обладнання.

7. Визначити раціональні режими роботи автономного мобільного малогабаритного обладнання при приготуванні бетонної суміші.

8. Провести випробування розробленого обладнання в умовах реального будівельного майданчика та здійснити техніко-економічне обґрунтування його ефективності у порівнянні з традиційними способами приготування бетону.

Об'єкт дослідження – автономне універсальне мобільне малогабаритне обладнання для приготування бетону та його конструктивні особливості.

Предмет дослідження – процеси приготування бетонних сумішей за допомогою автономного мобільного обладнання, вплив конструктивних і технологічних параметрів на якість суміші та енергоефективність приготування бетону.

Методи дослідження

При виконанні дисертаційної роботи для обґрунтування параметрів автономного універсального мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетону були використані як загальні, так і спеціальні методи наукових досліджень. Серед загальних методів використовувались емпіричні і теоретичні методи досліджень. Серед спеціальних – метод математичного моделювання, експериментально-статистичний метод, метод порівняльного аналізу та метод оптимізації технологічних параметрів.

На етапі збору необхідних даних про існуючі конструкції бетонозмішувачів були використані емпіричні методи. При проведенні аналізу були дотримані наступні вимоги: порівнювались ті явища, між якими може існувати визначена об'єктивна спільність, такі як гравітаційні та примусові змішувачі; порівняння здійснювалось за найбільш важливими істотними ознаками, зокрема продуктивністю, енергоспоживанням та ступенем однорідності змішування.

Теоретичні методи досліджень застосовувались для розробки математичної моделі процесу змішування, яка враховує геометричні параметри змішувача, фізико-хімічні властивості компонентів бетону та умови автономної роботи. Використовувались методи аналогії та узагальнення для визначення оптимальних конструктивних рішень.

Спеціальні методи досліджень включали експериментально-статистичний метод, який застосовувався для проведення лабораторних та виробничих випробувань дослідного зразка обладнання та статистичної обробки отриманих даних. Метод оптимізації використовувався для визначення раціональних режимів роботи обладнання шляхом комп'ютерного моделювання та експериментів. Функціонально-вартісний аналіз застосовувався для оцінки економічної доцільності впровадження автономного обладнання.

Для підтвердження адекватності математичної моделі було проведено експериментальні випробування на макеті змішувача та порівняльний аналіз отриманих даних з теоретичними розрахунками. Комплексне застосування цих методів дозволило теоретично обґрунтувати параметри обладнання, експериментально підтвердити його ефективність та розробити практичні рекомендації для впровадження у будівельне виробництво. Методична основа дослідження ґрунтується на поєднанні фундаментальних принципів механіки, матеріалознавства та сучасних інженерних підходів до проектування будівельної техніки.

Наукова новизна одержаних результатів

1. Вперше розроблено математичну модель процесу змішування бетонної суміші в гравітаційному бетонозмішувачі з осциляційним рухом барабана, яка, на відміну від відомих, враховує рух суміші вздовж лопатки та вздовж барабана, а також вплив параметрів осциляційного руху на формування однорідності суміші.

2. Вперше встановлено закономірності переміщення частинок бетонної суміші в робочому об'ємі барабана за комбінованої дії обертового та

осциляційного рухів, що дало змогу пояснити механізм інтенсифікації змішування та зменшення застійних зон.

3. Вдосконалено метод визначення основних параметрів процесу змішування бетонної суміші, який, на відміну від існуючих, дає змогу враховувати вплив рухливості суміші, частоти обертання барабана, частоти осциляцій та тривалості змішування на коефіцієнт ефективності змішування, продуктивність і енергоспоживання обладнання.

4. Дістали подальшого розвитку наукові положення щодо визначення раціональних режимів роботи гравітаційних бетонозмішувачів, які доповнено урахуванням осциляційного руху барабана як чинника підвищення однорідності бетонної суміші та скорочення тривалості технологічного циклу.

Технічна новизна одержаних результатів

1. Розроблено спосіб змішування бетонних сумішей у гравітаційному бетонозмішувачі, який відрізняється тим, що в процесі обертання барабана додатково здійснюється періодична зміна кута його нахилу, внаслідок чого інтенсифікується перемішування компонентів суміші.

2. Запропоновано конструктивну схему автономного універсального мобільного малогабаритного бетонозмішувального обладнання, яка включає змішувальний барабан, механізм осциляційного руху, генератор змінного струму, ківш для завантаження компонентів та систему керування.

3. Обґрунтовано раціональні конструктивно-кінематичні параметри роботи бетонозмішувача з осциляційним рухом барабана, зокрема частоту обертання барабана, частоту осциляцій, амплітуду зміни кута нахилу та тривалість змішування.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що розроблені теоретичні положення, технічні рішення та встановлені раціональні режими роботи доведено до рівня практичного використання при створенні та

впровадженні бетонозмішувального обладнання з осциляційним рухом барабана.

Результати дослідження дали змогу створити дослідний зразок бетонозмішувального обладнання з осциляційним рухом барабана для приготування бетонних сумішей, що забезпечило підвищення коефіцієнта однорідності бетонної суміші на 10–12 %, скорочення тривалості змішування на 25–30 % та зменшення енерговитрат на 15–20 % порівняно з традиційним гравітаційним змішуванням.

Підтверджено ефективність використання розробленого способу та обладнання при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт на ТОВ «Виробниче підприємство “Будмеханізація”» і ЖБК «Ворскла», що дало змогу рекомендувати результати роботи для використання під час проектування та вдосконалення малогабаритних автономних бетонозмішувальних установок, призначених для роботи в умовах будівельного майданчика.

Акти про впровадження результатів дисертаційної роботи наведено у додатку В.

Особистий внесок здобувача

Основні наукові результати дисертаційної роботи здобувач отримав самостійно. Формування наукової ідеї, визначення напрямів дослідження та узагальнення результатів виконано у співпраці з науковим керівником. У спільних наукових публікаціях здобувачем проведено аналіз існуючого обладнання та запропоновано концепцію нового малогабаритного мобільного бетонозмішувача; досліджено режими та параметри роботи змішувачів, розроблено методику розрахунку потужності й питомих енерговитрат, а також запропоновано критерії оцінки енергоефективності обладнання для приготування бетонних сумішей; проведено аналіз існуючих схем системи живлення бетонозмішувальних установок, виявлено їхні недоліки щодо енергоефективності та точності дозування; запропоновано удосконалену конструкцію з окремим розташуванням бункерів; обґрунтовано переваги

запропонованих змін, зокрема зменшення енерговитрат, підвищення продуктивності та скорочення часу зміни матеріалів; здійснено порівняльний аналіз математичних моделей руху бетонної суміші в гравітаційному бетонозмішувачі, досліджено вплив геометрії робочого органу та реологічних властивостей суміші на ефективність процесу змішування й сформульовано рекомендації щодо підвищення однорідності та енергоефективності процесу; розроблено математичну модель руху частинок бетонної суміші в гравітаційному бетонозмішувачі, визначено вплив кута нахилу лопатей, швидкості обертання барабана та реологічних властивостей суміші на інтенсивність перемішування і встановлено оптимальні кінематичні параметри для забезпечення рівномірного розподілу компонентів; створено математичну модель осциляційного руху робочого органу бетонозмішувача, проведено аналітичний опис кінематики частинок суміші з урахуванням гравітаційних, відцентрових і сил тертя, виконано чисельне моделювання впливу частоти, амплітуди та кута нахилу барабана на ефективність процесу змішування.

Апробація результатів

Апробацію основних положень, результатів та висновків дисертаційної роботи здійснено під час участі у науково-технічних конференціях: 75-а наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (01-26.05.2023, м. Полтава); VI Всеукраїнській науково-технічній конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (11.05.2023, м. Полтава); Міжнародна конференція "Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії", Харківський національний автомобільно-дорожній університет (11–12.03.24, м. Харків); VII Всеукраїнській науково-технічній конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія

Кондратюка», (25.04.2024, м. Полтава); 76-а наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (14-23.05.2024, м. Полтава); V Міжнародна науково-практична конференція «Енергоощадні машини і технології», Київський національний університет будівництва і архітектури (22-24.05.24, м. Київ); VIII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (24.04.2025, м. Полтава); 77-а наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (19-22.05.2025, м. Полтава); VI Міжнародна науково-практична конференція «Енергоощадні машини і технології», Київський національний університет будівництва і архітектури (20-21.05.25 р. м. Київ); XIX Всеукраїнська науково-технічна конференція здобувачів вищої освіти «Сталий розвиток міст: поствоєнний період», ХНУМГ ім. О.М. Бекетова (28-29.04.2026, м. Харків); 78-а наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету на базі Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (15-22.05.2026, м. Полтава); VII Міжнародна науково-практична конференція «Енергоощадні машини і технології», Київський національний університет будівництва і архітектури (19-20.05.26 р. м. Київ).

Публікації

За результатами проведених досліджень основні наукові положення дисертаційної роботи опубліковано у 17 публікаціях, з яких 5 наукових статей – у фахових наукових виданнях, включених до переліку МОН України, 1 стаття – у журналі, індексованому в міжнародній наукометричній базі Scopus, 2 патенти України на корисну модель. Апробацію результатів досліджень засвідчено

публікаціями 9 праць у матеріалах міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференцій.

Структура дисертаційної роботи

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 113 найменувань та 4 додатків. Загальний обсяг роботи становить 199 сторінок машинописного тексту, містить 44 рисунки, 10 таблиць та 4 додатки на 21 сторінці.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЗАСОБІВ ПРИГОТУВАННЯ БЕТОНУ

1.1 Стан питання та задачі дослідження

Процес приготування бетонних сумішей є важливою складовою будівельного виробництва, оскільки якість бетону значною мірою визначає міцність та довговічність будівельних конструкцій. Сучасні технології приготування бетону передбачають використання різноманітних видів обладнання, яке забезпечує високу однорідність суміші та знижує витрати на її виробництво. Проте, існує низка питань, пов'язаних з оптимізацією параметрів роботи такого обладнання, що потребує подальших досліджень.

Питання підвищення ефективності обладнання для приготування бетонних сумішей є актуальною через зростання вимог до якості будівельних матеріалів та зменшення собівартості виробництва [1-6]. В умовах сучасного розвитку будівельної галузі застосування інноваційних технологій, включаючи високоефективні механізовані засоби, здатне підвищити ефективність використання енергетичних та матеріальних ресурсів, а також підтримувати стабільність технологічних процесів приготування бетонних сумішей.

Серед поширених методів приготування бетонних сумішей найчастіше застосовуються гравітаційні та примусові змішувачі, однак їх використання має обмежену відповідність сучасним вимогам будівництва [7-14]. Складність конструкції, значні енерговитрати та недостатній рівень автоматизації технологічних процесів зумовлюють потребу у вдосконаленні робочих параметрів обладнання. Останнім часом значна увага приділяється розробленню автономних і універсальних мобільних установок, здатних забезпечувати високу якість бетонної суміші завдяки оптимізації параметрів змішування [15-22].

Важливий внесок у формування теоретичних та практичних основ проектування й експлуатації обладнання для приготування бетонних сумішей здійснили науковці та інженери провідних університетів [24-28]. Їхні праці

висвітлюють теоретичні положення процесу змішування, моделювання робочих режимів та визначення оптимальних параметрів роботи обладнання [29-39]. Однак залишається невирішеним питання створення автономного універсального мобільного обладнання, яке могло б забезпечити гнучкість і високу продуктивність в умовах будівельного майданчика та обґрунтування параметрів його роботи.

Дослідження, присвячені створенню нових типів змішувачів [40-46], зокрема гравітаційних і примусових змішувачів, показали, що зміна геометричних параметрів робочих органів може суттєво впливати на якість кінцевого продукту. Застосування вдосконалених конструкцій змішувача дозволяє мінімізувати розшарування компонентів та підвищити однорідність суміші [47-53].

Наукові дослідження засвідчують, що робота мобільних бетонозмішувачів залишається недостатньо вивченою, особливо щодо їх ефективного використання в автономних умовах. Основним питанням є те, що більшість традиційних бетонозмішувачів спроектовані для стаціонарного використання та характеризуються високими енерговитратами, що знижує ефективність їх застосування в умовах, де необхідним є забезпечення автономності та мобільності.

Таким чином, основним завданням даного дослідження є визначення та обґрунтування параметрів роботи автономного універсального малогабаритного обладнання для приготування бетону, яке забезпечує автономний режим роботи та відповідає сучасним вимогам мобільності, енергоефективності, надійності та якості приготованих сумішей.

1.2 Вимоги до обладнання для приготування бетону

Основними вимогами до обладнання для приготування бетону є його продуктивність, економічність, надійність та здатність ефективно змішувати компоненти бетонних сумішей. Обладнання повинно забезпечувати

рівномірність змішування при різних режимах роботи, включаючи змінні умови навколишнього середовища та, наприклад, обмежені енергетичні ресурси. Важливим є забезпечення високої якості суміші при мінімальних енерговитратах, що є важливим при виконанні робіт в польових умовах без постійного доступу до енергомереж [2].

Для будівельних процесів важливо, щоб бетонозмішувач забезпечував приготування сумішей різного об'єму. В малому та сільськогосподарському будівництві обладнання має забезпечувати швидке та ефективне приготування сумішей об'ємом від 0,2 до 0,5 м³ за цикл, що дозволить забезпечити якомога триваліший процес будівництва з мінімальними перервами на приготування нових порцій бетону.

Важливим є забезпечення того, щоб бетонна суміш зберігала однорідність та необхідну рухливість. Недостатнє перемішування компонентів спричиняє зниження якості бетону та втрати кінцевої міцності, що особливо небезпечно в умовах експлуатації будівельних конструкцій, виготовлених з цього бетону, при високих навантаженнях [54].

Крім того, важливою вимогою є автономність та мобільність обладнання, що дозволить використовувати його на віддалених будівельних майданчиках без необхідності підключення до зовнішніх джерел енергії. Обладнання має бути здатне працювати в різних кліматичних умовах і при цьому зберігати стабільні показники ефективності.

Крім основних вимог, важливо, щоб обладнання могло працювати з різними видами бетонних сумішей, що можуть відрізнятися за своїми властивостями, такими як крупність заповнювачів, в'язкість та вологість. Це передбачає необхідність від обладнання універсальності та здатності працювати з різними типами компонентів без значної втрати якості готової суміші [55].

Визначальною рисою обладнання є його енергоефективність. Для забезпечення автономної роботи необхідно мінімізувати енергоспоживання, що дасть змогу подовжити час функціонування обладнання протягом одного циклу. Зниження енергоспоживання слід досягати завдяки впровадженню передових

технологій у системах приводу та автоматизованого контролю роботи устаткування. Це сприятиме не лише зменшенню витрат на експлуатацію, але й підвищенню загальної продуктивності обладнання [56].

Ключовою вимогою до змішувача є надійність конструкції та здатність працювати під високим навантаженням. Оскільки обладнання може працювати в умовах інтенсивної експлуатації, воно повинно мати високий ступінь захищеності від механічних пошкоджень, що може виникати при роботі з агресивними компонентами бетонних сумішей [57].

1.3 Основні показники якості бетонних сумішей та бетону

Одним із ключових факторів у визначенні якості бетону є дотримання встановлених вимог, серед яких можна виділити міцність, водонепроникність, морозостійкість, зносостійкість та довговічність, які гарантують його надійність та довговічність.

Міцність бетону виступає головним показником, від якого залежить його здатність витримувати різні навантаження без появи пошкоджень чи руйнувань. Цей параметр визначається складом бетонної суміші, точністю при дозуванні компонентів і відповідністю технологічного процесу виготовлення. Водонепроникність, своєю чергою, характеризує спроможність бетону протидіяти проникненню вологи, що критично важливо для збереження його цілісності за умов підвищеної вологості.

Міцність бетону визначається за допомогою різних методів випробувань, що дозволяють оцінити його здатність витримувати навантаження без руйнування. Одним із основних методів є випробування на стиск, яке проводиться згідно з нормативними документами, такими як ДСТУ (Державний стандарт України) або міжнародними стандартами [58, 59].

Для проведення випробування на стиск використовуються зразки бетону, зазвичай у формі кубів або циліндрів, які виготовляються зі свіжої бетонної суміші і зберігаються в умовах нормальної вологості та температури до

досягнення віку випробування. Найчастіше зразки тестують на 7-й, 14-й та 28-й день після виготовлення, щоб визначити їх міцність у різні періоди твердіння.

Зразки піддаються поступовому навантаженню до моменту їх руйнування за допомогою преса для випробування на стиск. Результатом випробування є відношення показника максимального навантаження, яке зразок витримує до руйнування, до площі поперечного перерізу зразка. Це значення і є маркою бетону, що відповідає міцності на стиск виражений в мегапаскалях.

Крім випробування на стиск, існують також методи непрямого визначення міцності, такі як ультразвукове тестування, відбійний молоток Шмідта та інші. Ці методи дозволяють оцінити міцність бетону без руйнування зразків, що є зручним для контролю якості бетону безпосередньо на будівельному майданчику [60].

Морозостійкість бетону визначає його здатність витримувати циклічні заморожування і відтавання без втрати міцності та цілісності. Для підвищення морозостійкості застосовують спеціальні добавки та технології укладання. Зносостійкість бетону важлива для конструкцій, що зазнають інтенсивних механічних впливів, таких як пішохідні доріжки, дорожні покриття та промислові підлоги. Цей показник забезпечується використанням високоякісних компонентів та спеціальних технологій обробки поверхні [61].

Морозостійкість бетону визначається шляхом випробувань на стійкість до циклічного заморожування та відтавання. Ці випробування проводяться для того, щоб оцінити здатність бетону витримувати багаторазове заморожування і відтавання без значного зниження міцності та інших властивостей.

Для випробувань використовують стандартні зразки бетону у формі кубів або призм, які виготовляються за певними стандартами. Зразки витримуються в нормальних умовах вологості та температури до досягнення віку випробування, зазвичай 28 днів.

Перед циклічним заморожуванням та відтаванням зразки піддають початковому тестуванню на стиск або вигин, щоб визначити їх міцність до початку випробувань.

Зразки піддаються багаторазовому циклічному заморожуванню та відтаванню. Один цикл зазвичай складається з заморожування зразків при температурі приблизно -18°C на кілька годин, а потім їх відтавання при температурі $+20^{\circ}\text{C}$ також на кілька годин. Кількість таких циклів визначається нормативними документами і може становити від 25 до 300 циклів.

Після проведення певної кількості циклів зразки піддають повторному тестуванню на стиск або вигин. Зниження міцності порівнюється з початковими значеннями для визначення втрат міцності, викликаних циклічним заморожуванням та відтаванням.

Крім механічних випробувань, зразки також піддаються візуальній оцінці на наявність тріщин, відшарувань та інших дефектів, які можуть виникнути в результаті заморожування та відтавання.

Довговічність бетону визначає тривалість експлуатації конструкцій без значних змін фізико-механічних властивостей. Вона залежить від усіх вище перерахованих параметрів, а також від умов експлуатації та догляду за конструкцією. Виконання всіх вимог для визначення якості бетону є необхідним для забезпечення його надійності і тривалої експлуатації в умовах, що вимагають високих показників міцності, водонепроникності, морозостійкості, зносостійкості та довговічності.

Довговічність бетону визначається через його здатність протистояти впливу навколишнього середовища та зберігати свої фізико-механічні властивості протягом тривалого часу. Оцінка довговічності проводиться за допомогою комплексного підходу, який включає лабораторні випробування, моделювання умов експлуатації та аналіз поведінки бетону в реальних умовах [62].

Ці випробування включають розміщення зразків бетону в різних агресивних середовищах, таких як кислоти, луги, морська вода та інші хімічні реагенти. Після певного періоду витримки зразки піддаються механічним випробуванням для визначення змін їхніх властивостей.

Як і у випадку з морозостійкістю, зразки бетону піддаються циклічним заморожуванням і відтаванню. Це дозволяє оцінити їх здатність витримувати змінні кліматичні умови без втрати міцності і появи дефектів.

Випробування на стійкість до абразивного зносу дозволяє визначити зносостійкість бетону, що є важливим для конструкцій, які піддаються інтенсивним механічним впливам, таким як дорожні покриття або промислові підлоги. Зразки піддають абразивному впливу, і визначають втрати маси або об'єму після певного періоду.

Визначення водопроникності та газопроникності бетону допомагає оцінити його здатність захищати арматуру від корозії та протистояти впливу вологи. Для цього використовують методи випробувань під тиском води або повітря [63].

За допомогою комп'ютерного моделювання проводять оцінку поведінки бетону в умовах експлуатації. Це дозволяє прогнозувати зміни властивостей бетону протягом тривалого часу на основі даних лабораторних випробувань і реальних умов експлуатації.

Для щойно приготованої бетонної суміші, однією з важливих характеристик є рухливість, яка визначає здатність суміші до зміни геометричної форми та заповнення опалубки без надмірних зусиль і додаткового ущільнення. Дотримання цього параметра забезпечує якісне укладання суміші, рівномірне заповнення порожнин та запобігає утворенню пустот, які можуть знизити міцність і довговічність конструкції.

Рухливість безпосередньо залежить від складу бетонної суміші, зокрема від кількості води, типу та кількості цементу, а також від використання добавок, таких як пластифікатори або суперпластифікатори. Пластифікуючі добавки дозволяють підвищити рухливість суміші, не збільшуючи водоцементне відношення, що важливо для збереження міцності. Збалансована рухливість сприяє досягненню однорідності бетону, що є особливо важливим для конструкцій зі складною геометрією або в умовах, обмеженого доступу до зон укладання суміші.

Визначення рухливості бетонної суміші зазвичай проводиться методом вимірювання осідання конуса з бетону, що є одним із найпоширеніших способів оцінки пластичності та здатності суміші до укладання. Цей метод дозволяє отримати об'єктивні дані про консистенцію бетонної суміші без необхідності застосування складного обладнання. Для проведення цього тесту використовують спеціальну конусоподібну форму, виготовлену з металу, яка має стандартні розміри: висота 300 мм, діаметр верхнього отвору 100 мм і діаметр нижнього отвору 200 мм [64].

Процес визначення осідання конуса починається з підготовки суміші, яка заповнюється у форму в три шари, кожен з яких ущільнюється за допомогою металевого стержня для досягнення однорідності. Після заповнення форми її обережно піднімають вертикально, не змінюючи положення суміші, щоб вона могла вільно осісти під власною вагою. Після осідання суміші вимірюється зміна висоти бетонного конуса, що й визначає ступінь її рухливості. Різниця між початковою і кінцевою висотою, яку називають осіданням, свідчить про здатність суміші до розтікання.

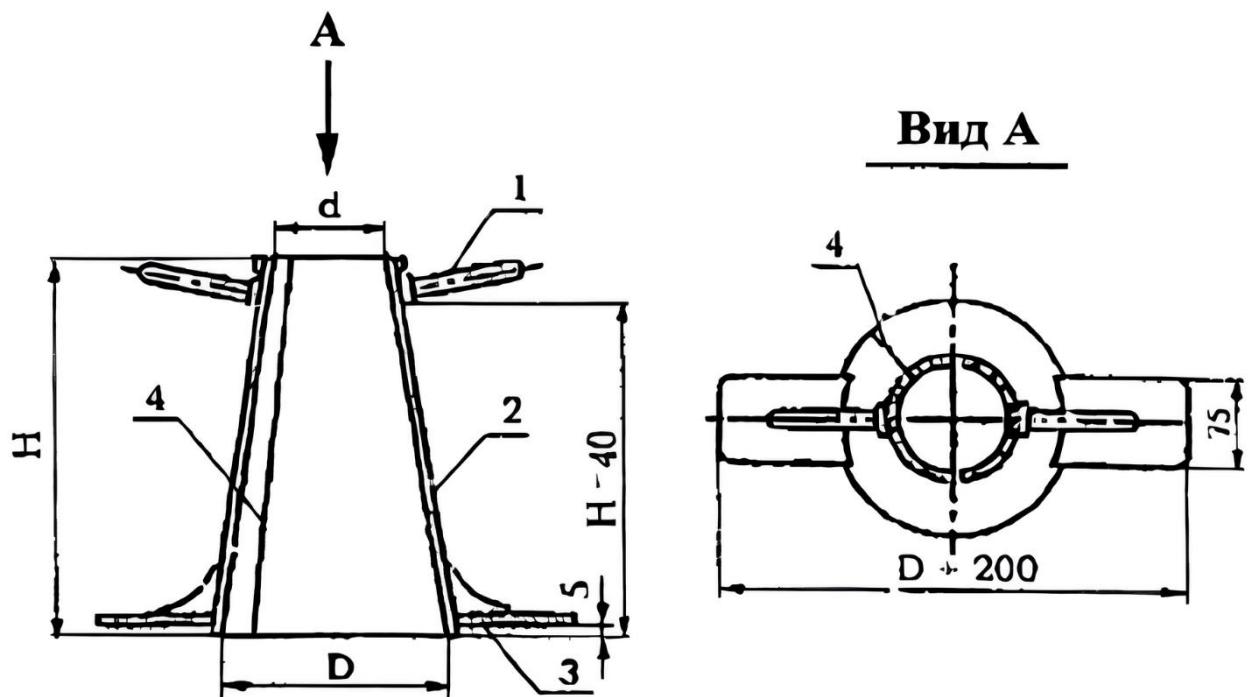


Рисунок 1.1 – Конус для визначення рухливості бетонної суміші:

1 – ручка; 2 – корпус приладу; 3 – упори; 4 – зварний шов

Значення осідання інтерпретують відповідно до типу бетонної суміші та вимог до будівництва. Наприклад, низьке осідання (до 20 мм) вказує на жорстку суміш, яка потребує додаткового ущільнення, тоді як осідання в межах 50-150 мм свідчить про середньої рухливості суміш, яка підходить для більшості конструкційних робіт. Для конструкцій зі складною геометрією чи тонкостінних елементів може бути потрібне осідання понад 150 мм, що забезпечує кращу здатність суміші заповнювати вузькі форми.

Відповідний рівень рухливості також є важливим з точки зору зручності роботи та швидкості виконання бетонних робіт. Якщо суміш недостатньо рухлива, виникає необхідність у додатковому ущільненні, що вимагає часу і витрат на спеціальне обладнання. Надмірна рухливість може призвести до розшарування, коли більш важкі частинки осідають, а легкі піднімаються на поверхню, що знижує однорідність і якість кінцевого матеріалу.

1.4 Аналіз існуючих конструкцій бетонозмішувачів та засобів транспортування бетонних сумішей

В теперішній час виготовлення бетонних сумішей і будівельних розчинів, як правило, відбувається на механізованих підприємствах, обладнаних сучасним високопродуктивним обладнанням, а також безпосередньо на будівельному майданчику [65].

Бетонні суміші і розчини потребують змішування для їх якісного приготування. Змішування являє собою процес, у якому декілька компонентів перебувають у певному співвідношенні один до одного, утворюючи однорідну суміш. У будівництві широкого застосування набули змішувачі, які, в свою чергу, є різноманітними за принципом та відрізняються за ознаками мобільності, режиму роботи та способу змішування [66].

За режимом роботи змішувачі поділяють на циклічної та безперервної дії.

Бетонозмішувачі циклічної дії є обладнанням, призначеним для приготування бетонних сумішей у порційному режимі. Це означає, що кожна

нова порція матеріалу готується окремо, після чого змішувач спорожнюється і завантажується новими компонентами. Такий режим роботи дозволяє отримувати високоякісну бетонну суміш із точною рецептурою та контролем кожної партії. Завдяки циклічному принципу приготування, ці змішувачі широко застосовуються для виробництва бетону спеціальних марок та в умовах, коли потрібна висока однорідність продукту [67].

Конструкція бетонозмішувачів циклічної дії зазвичай включає барабан або камеру для змішування, в якій розташовані лопаті або інші елементи, що забезпечують інтенсивне перемішування. Завантаження компонентів відбувається порціями, а після завершення циклу змішування готова суміш вивантажується через спеціальний отвір. Для досягнення необхідних характеристик бетону в таких змішувачах контролюють тривалість змішування, кількість обертів лопатей або барабана, а також точність дозування компонентів.

Однією з ключових переваг бетонозмішувачів циклічної дії є можливість гнучкого налаштування параметрів змішування залежно від рецептури. Наприклад, для високоякісних або складних бетонних сумішей можна збільшити час змішування або змінити швидкість обертання робочих елементів, щоб досягти оптимальної консистенції та однорідності. Завдяки цьому такі змішувачі характеризуються гнучкістю експлуатації та зручністю в умовах, де необхідно коригувати параметри суміші після декількох циклів.

Однак через періодичний режим роботи їхня продуктивність є меншою, ніж у безперервних змішувачів. Крім того, вони потребують часу для завантаження та вивантаження, що також може впливати на загальний час приготування бетону. Незважаючи на це, вони залишаються основним вибором для багатьох видів будівельних робіт, де важливі якість та контрольованість кожного циклу бетонної суміші.

Бетонозмішувачі безперервної дії призначені для безперервного приготування бетонних сумішей, що робить їх доцільними для застосувань, де потрібна велика продуктивність та постійний потік готового матеріалу. На відміну від циклічних бетонозмішувачів, у яких суміш готується окремими

порціями, змішувачі безперервної дії забезпечують постійне змішування компонентів та вивантаження готової суміші без перерв. Це досягається завдяки тому, що компоненти бетонної суміші автоматично подаються в камеру змішування, де вони перемішуються за допомогою лопатей або гвинтових механізмів і поступово виходять через вивантажувальний отвір [68].

Конструкція бетонозмішувачів безперервної дії включає дозатори для кожного компонента бетонної суміші, які забезпечують постійний потік вхідних матеріалів в камеру змішування. Процес перемішування відбувається в камері постійного об'єму, де встановлені лопаті або шнеки, що забезпечують інтенсивне перемішування. Це дозволяє досягати високої продуктивності, оскільки нові порції матеріалів постійно надходять до змішувача, а готовий бетон постійно вивантажується без затримок. Завдяки такій конструкції бетонозмішувачі безперервної дії широко використовуються на великих будівельних майданчиках, у заводському виробництві бетонних виробів і там, де необхідно забезпечити швидке та ефективне бетонування великих обсягів.

Серед переваг бетонозмішувачів безперервної дії – висока швидкість приготування бетонної суміші, зменшення часу на завантаження та вивантаження. Оскільки змішувач працює безперервно, досягається значна економія часу, що особливо важливо на об'єктах з інтенсивним будівельним графіком. Крім того, автоматизоване подання компонентів дозволяє забезпечити стабільну якість суміші.

Разом із перевагами безперервні бетонозмішувачі мають певні обмеження. Контроль якості суміші в них дещо ускладнений, оскільки параметри можна коригувати лише в процесі роботи, і це потребує чіткої синхронізації подачі компонентів. Також їх не завжди зручно використовувати для приготування спеціальних бетонів з підвищеними вимогами до однорідності, оскільки постійний режим роботи не дозволяє гнучко змінювати параметри змішування для кожної окремої партії. Однак для стандартних будівельних сумішей та великих обсягів бетону бетонозмішувачі безперервної дії є незамінним рішенням, яке поєднує високу продуктивність з економічністю.

Змішувачі за мобільністю зазвичай поділяють на пересувні і стаціонарні.

Стаціонарні бетонозмішувачі циклічної дії призначені для приготування бетонних сумішей у постійних місцях, наприклад, на заводах або на заводах із виробництва бетонних виробів. Такі змішувачі використовуються для виготовлення бетону високої якості з ретельним контролем дозування компонентів і процесу змішування. Завдяки циклічному принципу роботи кожна порція суміші готується окремо, що дозволяє досягати стабільної якості та точності складу, що особливо важливо для конструкційних бетонів і спеціальних видів бетонних сумішей [69].

Конструкція стаціонарних бетонозмішувачів циклічної дії зазвичай передбачає використання жорсткого змішувального барабана або камери з лопатями, які інтенсивно перемішують компоненти до однорідної консистенції. Після закінчення кожного циклу готова порція суміші вивантажується, і обладнання завантажується новими компонентами бетонної суміші. У стаціонарних установках використовуються автоматизовані системи дозування, які точно подають необхідні обсяги цементу, піску, щебеню та води. Це дозволяє забезпечити високу повторюваність і відповідність заданій рецептурі для кожної партії бетону.

Стаціонарні бетонозмішувачі циклічної дії забезпечують більшу продуктивність, ніж мобільні аналоги, завдяки можливості працювати без зупинок на транспортування або переміщення обладнання. Вони можуть мати різні об'єми змішувальної камери, що дозволяє вибирати змішувачі залежно від необхідної продуктивності. Застосування стаціонарних бетонозмішувачів також спрощує інтеграцію з іншими виробничими лініями, такими як лінії для формування бетонних виробів або укладання бетону на конвеєрах.

Основними перевагами стаціонарних бетонозмішувачів циклічної дії є висока точність, продуктивність і можливість налаштування параметрів змішування для кожної окремої партії. Це обладнання зазвичай використовують на об'єктах з високими вимогами до якості бетону, наприклад, у виробництві збірних залізобетонних конструкцій або для приготування спеціалізованих

бетонних сумішей з добавками. Недоліком таких змішувачів є їхня залежність від стаціонарного розташування, що обмежує їх використання лише в місцях з постійним постачанням матеріалів. Однак завдяки високій продуктивності та надійності, стаціонарні бетонозмішувачі циклічної дії залишаються ключовим елементом у промисловому виробництві бетону.

Пересувні бетонозмішувачі циклічної дії призначені для приготування бетонних сумішей безпосередньо на будівельних майданчиках або в умовах, де доступ до стаціонарних бетонозмішувальних установок обмежений. Завдяки мобільності, ці змішувачі можна легко транспортувати до місця роботи, що значно спрощує логістику будівельного процесу, зменшує витрати на доставку готового бетону та забезпечує його свіжість і якість. Вони використовуються переважно для невеликих обсягів робіт або в умовах, де є потреба у швидкому приготуванні та укладанні бетонної суміші [70].

Конструкція пересувних бетонозмішувачів циклічної дії зазвичай включає барабан з лопатями, двигун для обертання барабана, а також шасі для транспортування. Барабан виконує функцію змішувальної камери, де компоненти бетону перемішуються протягом заданого часу для досягнення необхідної консистенції. Завдяки циклічному принципу роботи, після кожного завершеного циклу барабан спорожнюється, а потім завантажується нова порція матеріалу, що дозволяє контролювати якість і дозування компонентів кожної окремої партії бетонної суміші.

Однією з основних переваг пересувних бетонозмішувачів циклічної дії є їхня варіативність застосування і незалежність від стаціонарних джерел живлення. Наявність власних двигунів внутрішнього згоряння забезпечує незалежність від електромережі та можливість експлуатації у віддалених місцях. Це робить їх ідеальними для аварійних робіт, ремонтів доріг або невеликих будівельних проектів, де потрібно забезпечити швидке та якісне приготування бетону.

Серед недоліків пересувних бетонозмішувачів циклічної дії можна відзначити обмежену продуктивність і порівняно невеликий обсяг змішувальної

камери, що робить їх менш ефективними для великих будівельних об'єктів. Крім того, через циклічний режим роботи їхня продуктивність дещо нижча, ніж у безперервних змішувачів, оскільки кожен цикл потребує часу на завантаження, змішування та вивантаження. Однак, завдяки мобільності, простоті обслуговування та можливості працювати в складних умовах, пересувні бетонозмішувачі циклічної дії залишаються популярним вибором для широкого спектру будівельних завдань.

В залежності від способу змішування змішувачі бувають гравітаційні, тобто з вільним змішуванням, або з примусовим змішуванням.

Гравітаційні бетонозмішувачі є одним із найпоширеніших типів обладнання для приготування бетонних сумішей. Основний принцип їхньої роботи полягає в тому, що компоненти бетонної суміші перемішуються під дією сили тяжіння. У цих змішувачах змішувальний барабан обертається навколо своєї осі, змушуючи матеріали підніматися вгору вздовж стінок барабана, а потім під впливом гравітації вони падають вниз. Такий процес повторюється багато разів, що забезпечує рівномірне перемішування компонентів до отримання однорідної суміші [71].

Конструкція гравітаційних бетонозмішувачів (рис. 1.2) зазвичай включає нахилений змішувальний барабан, оснащений лопатями або ребрами, які піднімають матеріал на певну висоту під час обертання барабана. Ці лопаті допомагають перемішувати компоненти ефективніше, забезпечуючи поступове осипання суміші під власною вагою. Завдяки такій конструкції гравітаційні змішувачі добре підходять для приготування легких і середньої густини бетонних сумішей, таких як бетонні розчини, штукатурні суміші або легкі бетони з пористим заповнювачем.

Однією з головних переваг гравітаційних бетонозмішувачів є простота конструкції та експлуатації. Вони потребують мінімального технічного обслуговування, а завдяки відсутності складних механізмів, таких як шнеки або зубчасті колеса, є надійними і довговічними. Ці змішувачі також споживають менше енергії порівняно з іншими типами, оскільки обертання барабана

потребує відносно малої потужності. Це робить їх економічно вигідними для невеликих будівельних майданчиків або для приватних забудовників, де потрібна невелика продуктивність та автономність роботи.

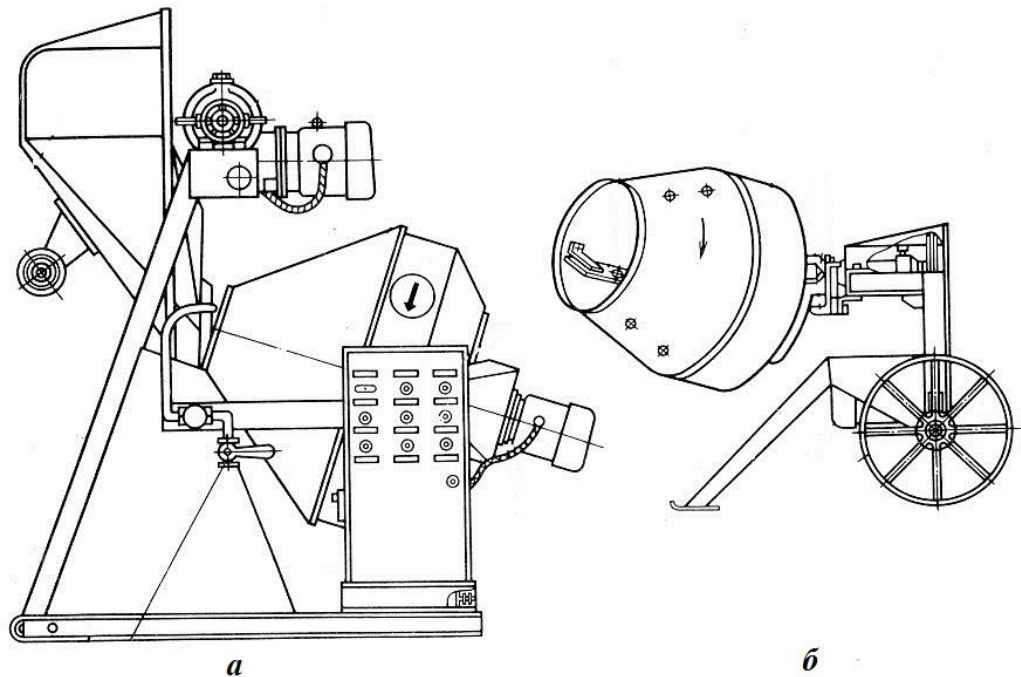


Рисунок 1.2 – Гравітаційні змішувачі циклічної дії:

a – типу СБ-16Б, *б* – типу СБ-101

Втім, гравітаційні бетонозмішувачі мають обмеження щодо типу сумішей, які можна в них приготувати. Через специфіку перемішування вони не підходять для густих або дуже жорстких бетонних сумішей, оскільки такі матеріали не здатні достатньо перемішуватися під дією лише гравітації. Крім того, у порівнянні з примусовими бетонозмішувачами, гравітаційні моделі потребують більше часу для досягнення однорідності, що може знизити продуктивність при великих обсягах робіт. Однак, для малих і середніх будівельних проектів гравітаційні бетонозмішувачі залишаються популярним і доступним рішенням завдяки їхній простоті, надійності та економічності.

Бетонозмішувачі примусової дії є обладнанням, призначеним для інтенсивного перемішування бетонних сумішей завдяки використанню механічних елементів, що примусово переміщують компоненти всередині

змішувальної камери. На відміну від гравітаційних бетонозмішувачів, де компоненти змішуються під дією сили тяжіння, в бетонозмішувачах примусової дії застосовуються лопаті, шнеки або роторні механізми, які активно переміщують матеріали, забезпечуючи швидке й однорідне перемішування. Цей тип змішувачів підходить для приготування жорстких і густих сумішей, а також для бетонів, що потребують високого ступеня однорідності [72, 73].

Конструкція бетонозмішувачів примусової дії зазвичай включає циліндричну або конічну камеру, всередині якої розташовані рухомі лопаті (рис. 1.3, а) або інші перемішувальні елементи. Вони можуть обертатися навколо власної осі або разом із валом (рис. 1.3, б), виконуючи рухи, які змушують компоненти активно перемішуватися. Це дозволяє досягти однорідності суміші за короткий проміжок часу, що особливо важливо для високоякісних бетонів із різними добавками та наповнювачами. Завдяки примусовому принципу змішування такі змішувачі забезпечують можливість отримання стабільної та якісної суміші навіть у складних умовах виробництва.

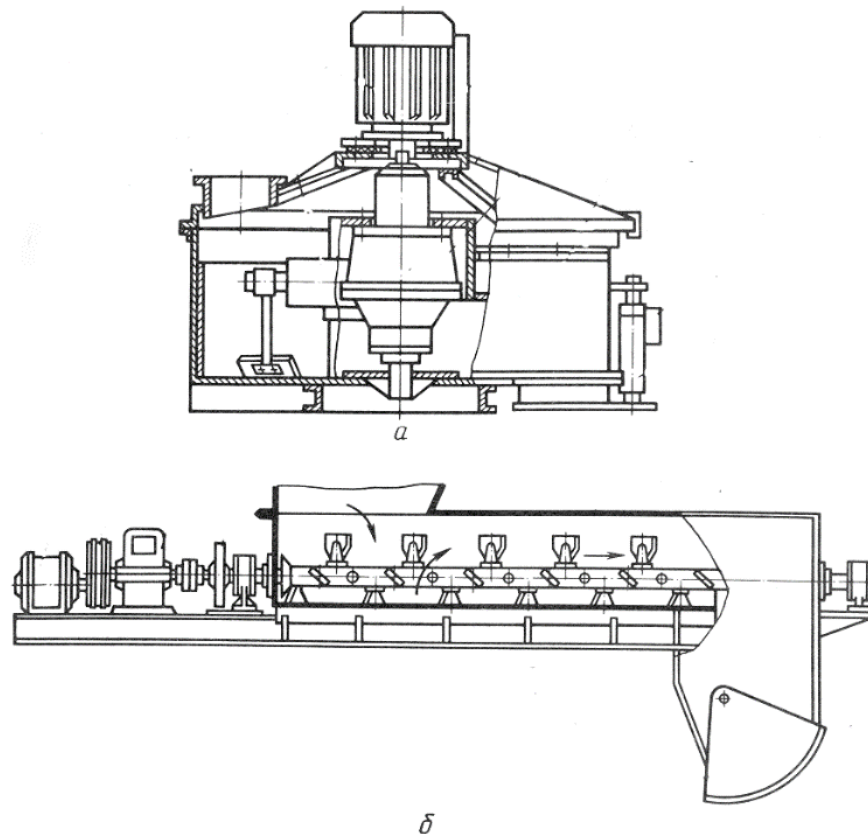


Рисунок 1.3 – Бетонозмішувачі примусової дії: а – роторні, б – лопатеві

Серед основних переваг бетонозмішувачів примусової дії – можливість отримувати якісну бетонну суміш із високою точністю. Вони забезпечують ретельне перемішування всіх компонентів незалежно від їхньої густини чи гранулометричного складу, що є особливо важливим для сумішей з добавками, які впливають на властивості бетону. Також ці змішувачі можуть працювати із широким спектром сумішей – від легких розчинів до густих бетонів, що дозволяє використовувати їх у різних галузях, таких як виробництво збірних бетонних елементів, виготовлення залізобетонних конструкцій і навіть у лабораторіях для тестування нових складів.

Проте, примусові бетонозмішувачі мають і деякі недоліки. Вони є більш складними в експлуатації, оскільки мають велику кількість рухомих частин, які потребують регулярного технічного обслуговування. Крім того, через інтенсивне перемішування вони споживають більше енергії, що може збільшувати експлуатаційні витрати. Ці змішувачі також часто мають значно вищу вартість у порівнянні з гравітаційними моделями, що може бути недоліком для невеликих будівельних компаній. Проте для об'єктів з високими вимогами до якості бетону та для виготовлення спеціалізованих бетонних виробів примусові бетонозмішувачі залишаються найкращим вибором завдяки своїй ефективності та надійності.

В свою чергу примусові змішувачі можуть бути різної конструкції та бувають декількох типів: лопатеві, лоткові, роторні, планетарно-роторні та турбулентні [74].

Лопатеві змішувачі (рис. 1.4, *a*) є спеціалізованим типом обладнання для приготування бетонних сумішей, у яких компоненти перемішуються за допомогою лопатей, що інтенсивно переміщують матеріали всередині змішувальної камери. Основною особливістю цих змішувачів є конструкція, де лопаті встановлені на обертових валах або роторах і здійснюють примусове перемішування. Це забезпечує ефективне змішування всіх компонентів суміші, незалежно від їхньої консистенції або в'язкості, що дозволяє отримувати високоякісний бетон з необхідними характеристиками міцності та однорідності.

Конструкція лопатевих бетонозмішувачів примусової дії (рис. 1.4, б) зазвичай включає одну або кілька груп лопатей, які розташовані на валах і обертаються в певному напрямку. Під час обертання лопаті активно захоплюють компоненти, примушуючи їх рухатися по всій камері та змішуватися. Такий тип змішування забезпечує інтенсивне і рівномірне перемішування всіх інгредієнтів, включаючи заповнювачі, цемент і воду. Це дозволяє досягти високої однорідності навіть при використанні важких і жорстких бетонних сумішей, що є необхідним для виробництва міцних бетонних конструкцій і виробів.

Лопатеві бетонозмішувачі примусової дії мають кілька важливих переваг, серед яких – можливість швидкого досягнення однорідності суміші та ефективна робота з широким діапазоном типів бетонів, включаючи високов'язкі та важкі суміші. Завдяки примусовому перемішуванню можна забезпечити точний контроль над параметрами суміші, що особливо важливо в умовах промислового виробництва залізобетонних конструкцій і виробів з підвищеними вимогами до якості. Такі змішувачі використовуються на великих будівельних підприємствах та заводах, де виробляють бетонні елементи, які повинні відповідати суворим стандартам.

Недоліками лопатевих бетонозмішувачів є підвищене навантаження на механічні частини, що потребує регулярного технічного обслуговування і може призводити до швидшого зношення лопатей і валів. Крім того, ці змішувачі споживають більше електроенергії, ніж гравітаційні змішувачі, що робить їх менш економічними для невеликих будівельних проєктів. Високий рівень зносу пов'язаний з інтенсивністю процесу перемішування та постійним контактом з абразивними матеріалами, такими як пісок і щебінь. Незважаючи на це, лопатеві бетонозмішувачі примусової дії залишаються одним із найефективніших рішень для отримання бетону високої якості, і вони є незамінними в умовах, де на перше місце ставляться однорідність та міцність складу бетонної суміші.

Лоткові змішувачі (рис. 1.4, в) призначені для приготування бетонних сумішей, які забезпечують інтенсивне перемішування компонентів за допомогою лопатей у спеціальній лотковій камері. Основна особливість цих

змішувачів полягає у їхній конструкції: вони мають відкриту горизонтальну лоткову камеру, де лопаті, розташовані на горизонтальному валу, здійснюють примусове перемішування. Така конструкція дозволяє досягти високої однорідності суміші за короткий час, що робить лоткові бетонозмішувачі незамінними для виробництва бетонів із підвищеними вимогами до якості та консистенції.

Під час роботи лоткових бетонозмішувачів примусової дії лопаті обертаються та активно переміщують компоненти бетонної суміші, змушуючи їх циркулювати всередині камери. Завдяки цьому компоненти інтенсивно перемішуються, а частинки наповнювача і цементу рівномірно розподіляються в об'ємі. Це дозволяє отримувати стабільний склад і високу якість суміші навіть за наявності великих частинок заповнювача або додаткових матеріалів, таких як добавки, що змінюють властивості бетону. Лоткові бетонозмішувачі особливо добре підходять для приготування жорстких і густих бетонних сумішей, що робить їх ідеальними для виробництва виробів із важких бетонів або залізобетонних конструкцій.

Лоткові змішувачі примусової дії мають переваги, пов'язані з їхньою простотою конструкції та можливістю легко контролювати процес завантаження та вивантаження матеріалу завдяки відкритій формі камери. Це сприяє зручності експлуатації та обслуговування, а також дозволяє швидко змінювати склад або дозування компонентів за необхідності. Такі змішувачі добре підходять для стаціонарного використання на заводах і великих будівельних об'єктах, де важливо забезпечити стабільне виробництво бетону високої якості.

Втім, лоткові бетонозмішувачі примусової дії мають певні обмеження, серед яких – потреба у високій потужності приводу для забезпечення ефективної роботи, що може призводити до підвищених енерговитрат. Високий рівень зносу лопатей також є типовою проблемою, особливо при роботі з абразивними компонентами. Крім того, лоткові бетонозмішувачі можуть вимагати періодичної заміни деталей, які піддаються інтенсивному навантаженню. Незважаючи на ці недоліки, лоткові бетонозмішувачі залишаються важливими у

виробництві бетону для відповідальних конструкцій, де однорідність і якість є критичними параметрами.

Роторні бетонозмішувачі (рис. 1.4, б) є високопродуктивним обладнанням для приготування бетонних сумішей, де компоненти перемішуються завдяки дії ротора, що інтенсивно обертається всередині змішувальної камери. Головна особливість роторних змішувачів полягає в конструкції ротора та розташованих на ньому лопатей, які здійснюють примусове перемішування бетонної суміші, забезпечуючи швидке і рівномірне розподілення компонентів. Це дозволяє отримувати бетон високої якості за короткий час, що є важливим для будівельних об'єктів з інтенсивним темпом робіт або на заводах, які потребують великої кількості суміші.

У процесі роботи роторні бетонозмішувачі примусової дії активно переміщують компоненти завдяки високій швидкості обертання ротора, що створює сильні турбулентні потоки всередині камери. Такий механізм забезпечує глибоке перемішування частинок різних розмірів і щільності, включаючи цемент, воду, пісок і щебінь. Це сприяє отриманню однорідного розчину та забезпечує високу міцність і стабільність майбутніх бетонних конструкцій. Завдяки цьому роторні змішувачі підходять для приготування жорстких, густих і спеціальних бетонних сумішей, які використовуються у відповідальних будівельних конструкціях.

Переваги роторних бетонозмішувачів включають їхню високу продуктивність і здатність швидко досягати однорідності суміші, що є ключовим для промислового виробництва бетону. Ці змішувачі здатні працювати з великим обсягом матеріалу, забезпечуючи при цьому високу якість суміші, яка відповідає суворим вимогам до міцності та надійності. Завдяки примусовому перемішуванню роторні змішувачі часто використовуються на заводах з виробництва залізобетонних конструкцій, де стабільність та однорідність бетону мають вирішальне значення.

Проте роторні бетонозмішувачі примусової дії мають і певні недоліки. Їхня конструкція потребує значних енерговитрат, оскільки для ефективного

перемішування необхідна велика потужність приводу, що може підвищувати витрати на експлуатацію. Окрім того, висока інтенсивність роботи призводить до зношення роторних лопатей та інших деталей, що вимагає регулярного технічного обслуговування та періодичної заміни зношених частин. Незважаючи на ці недоліки, роторні бетонозмішувачі примусової дії залишаються одними з найефективніших для виробництва бетону високої якості, особливо в умовах великомасштабного будівництва та промислового виробництва бетонних виробів.

Планетарно-роторні бетонозмішувачі (рис. 1.4, з) є сучасним обладнанням для приготування бетонних сумішей, що поєднує принципи роботи роторних та планетарних механізмів. У таких змішувачах роторні лопаті обертаються навколо своєї осі, а також рухаються за складною планетарною траєкторією всередині змішувальної камери. Це створює інтенсивні потоки, які ефективно перемішують усі компоненти бетонної суміші, забезпечуючи високу однорідність та якість готового продукту. Завдяки такій конструкції планетарно-роторні змішувачі ідеально підходять для отримання сумішей з підвищеними вимогами до якості, такими як високоміцні бетони, архітектурні бетони та бетони зі складними добавками.

Планетарно-роторні бетонозмішувачі примусової дії оснащені системою лопатей, які, здійснюючи подвійний оберт, забезпечують інтенсивне та рівномірне перемішування частинок різних розмірів та густини. Завдяки планетарному руху лопаті охоплюють усі ділянки змішувальної камери, що запобігає утворенню «мертвих зон», де б компоненти могли залишатися незмішаними. Такий процес дозволяє досягати рівномірного розподілу частинок цементу, заповнювачів та добавок, що сприяє створенню високоякісного бетону зі стабільною структурою.

Однією з головних переваг планетарно-роторних бетонозмішувачів є їхня здатність швидко досягати однорідності суміші та забезпечувати високу повторюваність у виробництві, що є надзвичайно важливим у будівельній індустрії. Ці змішувачі використовуються на заводах з виготовлення бетонних

виробів, де необхідно отримати бетон, що відповідає жорстким вимогам до міцності, стабільності та естетичних характеристик. Висока точність дозування та перемішування дозволяє використовувати планетарно-роторні змішувачі для створення спеціалізованих сумішей з домішками, які можуть впливати на структуру, колір або текстуру бетону.

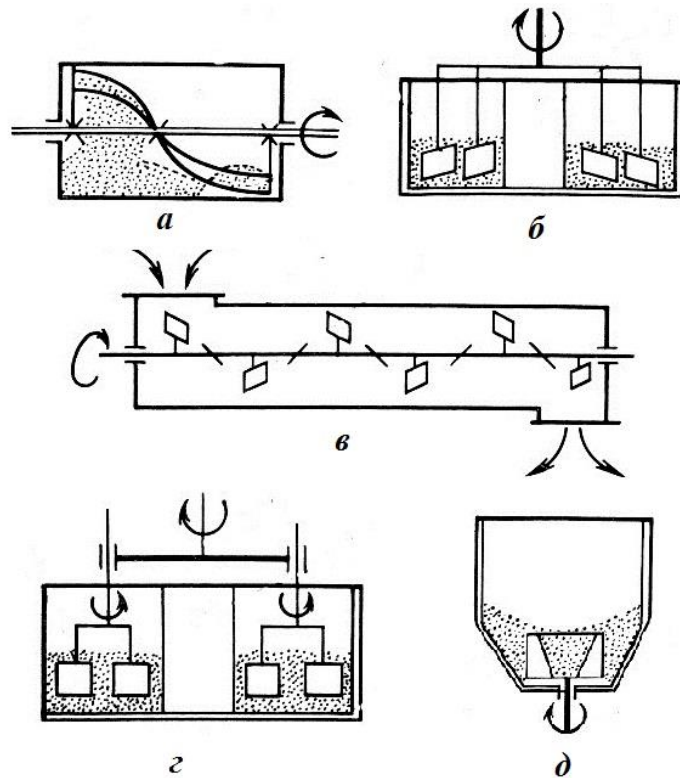


Рисунок 1.4 – Схеми змішувачів:

a – лопатеві, *б* – роторні, *в* – лоткові,
г – планетарно-роторні, *д* - турбулентні

Разом з тим, планетарно-роторні бетонозмішувачі потребують значних енерговитрат для забезпечення подвійного руху лопатей та постійного перемішування, що може підвищувати експлуатаційні витрати. Крім того, їх складна конструкція вимагає регулярного технічного обслуговування, адже високий рівень навантаження на механічні компоненти призводить до зносу лопатей і механізмів. Незважаючи на ці недоліки, планетарно-роторні бетонозмішувачі залишаються одним із найефективніших рішень для виробництва спеціалізованих бетонів, що потребують високої якості,

однорідності та стабільності на промислових об'єктах та масштабних будівельних проектах.

Турбулентні бетонозмішувачі (рис. 1.4, д) є високоефективними пристроями для приготування бетонних сумішей, де перемішування здійснюється за рахунок створення інтенсивних турбулентних потоків усередині змішувальної камери. Основна особливість цього типу бетонозмішувачів полягає у використанні лопатей або інших перемішувальних елементів, які обертаються з високою швидкістю, утворюючи сильні завихрення. Це призводить до турбулентного руху частинок, завдяки чому забезпечується швидке та рівномірне перемішування всіх компонентів суміші. Така система дозволяє отримувати бетон високої якості навіть за короткий час, що є важливим для забезпечення продуктивності на будівельних майданчиках.

У турбулентних бетонозмішувачах примусової дії обертові елементи створюють потоки, які змушують частинки суміші хаотично рухатися, стикаючись між собою та рівномірно розподіляючи цемент, заповнювачі та воду по всьому об'єму. Такий принцип роботи ефективно запобігає утворенню грудок та забезпечує високу однорідність суміші. Крім того, турбулентне перемішування сприяє швидкому зволоженню частинок цементу, що покращує зв'язувальні властивості суміші та позитивно впливає на міцність кінцевого матеріалу.

Перевагами турбулентних бетонозмішувачів є їхня здатність швидко і якісно перемішувати різноманітні види бетонних сумішей, включаючи густі та в'язкі склади, які можуть бути складними для інших типів змішувачів. Висока інтенсивність перемішування дозволяє досягти оптимальної структури суміші з мінімальними енергетичними затратами порівняно з деякими іншими видами примусових змішувачів. Турбулентні бетонозмішувачі часто використовуються для приготування бетонів із високими вимогами до однорідності та міцності, зокрема для промислового виробництва збірних залізобетонних елементів.

Серед недоліків турбулентних бетонозмішувачів слід зазначити необхідність ретельного контролю над процесом перемішування, оскільки

надмірно інтенсивне перемішування може призвести до пошкодження частинок заповнювача або перевитрати енергії. Крім того, висока швидкість обертання елементів може спричиняти зношення лопатей і стінок змішувальної камери, що потребує регулярного обслуговування та заміни зношених деталей. Незважаючи на ці особливості, турбулентні бетонозмішувачі примусової дії залишаються популярним рішенням у ситуаціях, де критичними є якість і швидкість приготування бетонної суміші, а також можливість працювати з різноманітними компонентами та добавками.

Для обслуговування невеликих об'єктів, які розміщені в декількох місцях використовують пересувні бетонорозчинні установки. Основною перевагою таких установок є їхня мобільність, яка дозволяє доставляти свіжоприготовану суміш до місця будівництва з мінімальними затратами часу, зберігаючи її якість і консистенцію. Завдяки цьому пересувні бетонорозчинні установки є надзвичайно корисними для об'єктів, розташованих на значній відстані від стаціонарних бетонних заводів або для тимчасових будівельних майданчиків, де потрібне регулярне і швидке постачання бетону.

Конструкція пересувних бетонорозчинних установок включає змішувальну камеру, систему подачі компонентів і резервуари для води та заповнювачів, а також механізми для транспортування й дозування суміші. Часто такі установки оснащені автономним приводом, що забезпечує незалежність від зовнішніх джерел енергії, що робить їх ефективними навіть у важкодоступних місцях. Можливість швидко підготувати суміш на місці дозволяє знизити витрати на транспортування та уникнути втрат властивостей бетону, які можуть виникнути під час довготривалого транспортування [75].

Пересувні бетонорозчинні установки здатні забезпечувати різні режими приготування бетонної суміші, включаючи дозування та змішування компонентів безпосередньо на місці робіт, що особливо важливо при роботі з сумішами спеціальних характеристик. Висока точність дозування компонентів і контроль за процесом змішування дозволяють отримувати бетон необхідної якості, відповідаючи жорстким вимогам до консистенції, міцності та

однорідності. Завдяки цьому пересувні установки стають незамінними на об'єктах, де важлива можливість гнучкого коригування складу бетону відповідно до потреб конкретного етапу будівництва.

Автоматизовані бетонозмішувачі оснащені системами автоматизації, що дозволяють здійснювати контроль та управління всіма етапами процесу без участі оператора. Завдяки автоматизації такі змішувачі забезпечують високу точність дозування компонентів, що є важливим для досягнення однорідності і високої якості готової бетонної суміші. Автоматичні системи контролюють не лише кількість заповнювачів, цементу та води, а й вміст спеціальних добавок, що дозволяє створювати бетони з потрібними характеристиками для складних будівельних проектів [76].

Однією з основних переваг автоматизованих бетонозмішувачів є можливість програмування параметрів змішування для отримання сумішей із різними властивостями. Це особливо важливо для великих виробництв та заводів залізобетонних конструкцій, де необхідно забезпечити високу повторюваність у виробництві бетону. Сучасні автоматизовані змішувачі можуть оснащуватися датчиками контролю температури, вологості, часу перемішування та інших параметрів, що впливають на кінцеві властивості суміші. Це дозволяє автоматично адаптувати процес під умови навколишнього середовища, забезпечуючи стабільність якості навіть при зміні зовнішніх факторів [77, 78].

Автоматизовані бетонозмішувачі також підвищують ефективність виробничих процесів, зменшуючи необхідність у ручній праці та знижуючи ймовірність людських помилок. Інтегровані системи управління дозволяють зберігати різні рецептури сумішей та швидко перемикатися між ними, що значно скорочує час на налаштування і підвищує продуктивність обладнання. Це також сприяє зниженню витрат матеріалів, оскільки система точно дозує кожен компонент, мінімізуючи можливі перевитрати. У результаті автоматизовані бетонозмішувачі не тільки підвищують якість кінцевого продукту, але й роблять процес приготування бетону економічно вигіднішим.

Класифікація змішувачів представлені на рисунку 1.5.

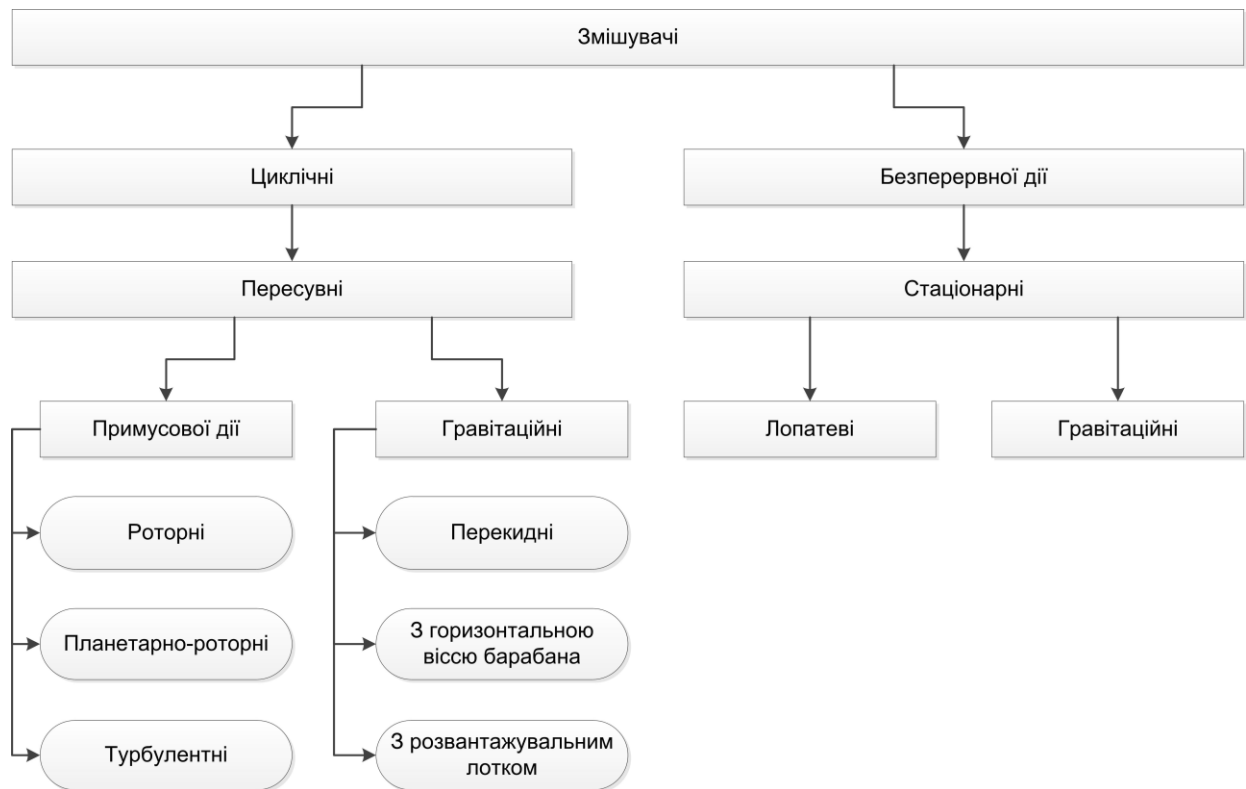


Рисунок 1.5 – Види змішувачів, які використовують для приготування бетонних сумішей та розчинів

Іноді виготовлення бетонних розчинів та сумішей на будівельних об'єктах не є можливим, тоді використовують транспортуючі машини. Головною умовою таких машин є привезення суміші до об'єкту без погіршення її якості (збереження однорідності, заданого складу, температури та без втрат будівельного розчину).

Різні умови об'єкта, що будується, інтенсивності та технології бетонування дають великий спектр застосованого транспорту, таких як автомобільний, насосний, пневматичний, залізничний, крановий, конвеєрний або плавучий. Але найчастіше використовують автобетоновози, авторозчиновози та автобетонозмішувачі для транспортування бетонних сумішей на далеку відстань.

Автобетоновози бувають із збудником (для перемішування суміші під час транспортування) і без нього (для перевезення малопластичних сумішей).

Перед транспортуванням бетонної суміші до об'єкта автобетоновози завантажують готовою сумішшю, виготовленою заздалегідь на заводі,

закривають кришкою і потім транспортують. На самому об'єкті проводять розвантаження шляхом перекидання кузова. Гідравлічні опори забезпечують стійкість від додаткових навантажень, а механізм гідроприводу надає можливість підняти передню частину ємності з поворотом навколо горизонтальної осі на 90° і вивантажити на висоті 700 або 1600 мм (залежно від типу автомобіля). Потім автобетоновоз очищують, і він повертається у початкове положення [79].

Авторозчиновози (рис. 1.6, *a*) використовують для транспортування розчинів рухливістю 5-13 см зі збудженням та видачі їх порційно. Головною умовою є використання транспорту в помірному кліматі, не нижче -5° оточуючого повітря, оскільки розчин може застигнути. Через це ємність, в якій знаходиться розчин, теплюється.

В авторозчиновозі перед виїздом на завантаження відкривають кришки цистерни, після чого починають завантажувати розчин. Під час транспортування періодично вмикають збуджувач. Це залежить від типу і рухливості розчину та міри заповнення цистерни. При розвантаженні відкривають поворотний лоток, встановлюють за допомогою гвинта необхідний кут нахилу та відкривають засув. Після вивантаження засув закривають, і лоток повертають у вихідне положення.

Автобетонозмішувачі (рис. 1.6, *б*) використовують для доставки ще не готової бетонної суміші, приготування рухомої та малорухомої бетонної суміші по дорозі до будівельного майданчика або вже після прибуття, доставки готової суміші. Порівнюючи з автобетоновозом вони є більш ефективними, але дорожчі.

Завантажувати змішувач можуть сухою сумішшю, сумішшю із змочених компонентів, частково перемішаною або готовою бетонною сумішшю. Сухі суміші завантажують на заводі, а додавання води і перемішування здійснюється по дорозі або вже на будівельному майданчику. У випадку з готовою бетонною сумішшю, змішувач використовують як автобетоновоз із збуджувачем. Після цього суміш розвантажують, промивають змішувач і розвантажувальні лотки, а транспорт повертається на завод.

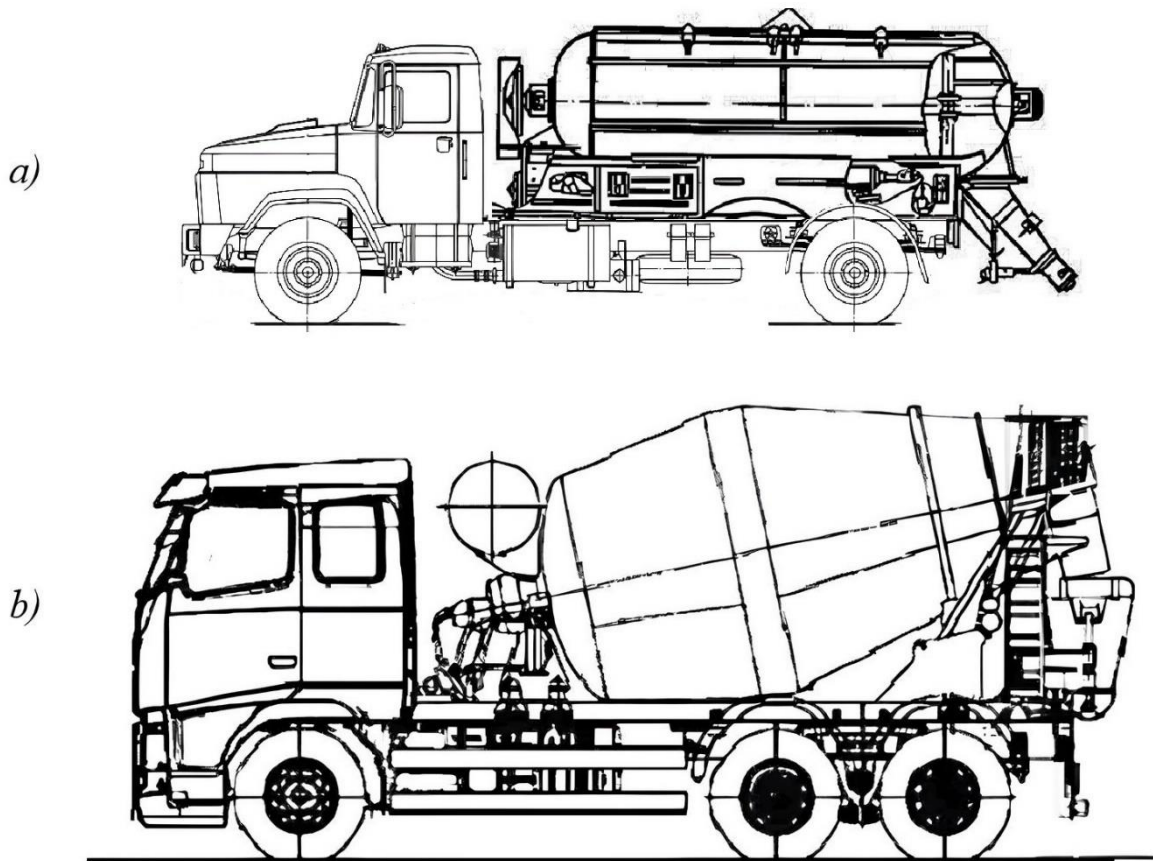


Рисунок 1.6 – Машини для транспортування бетонних сумішей і розчинів:
a – авторозчиновоз, *б* – автобетонозмішувач

Також для переміщення сумішей на незначні відстані в межах будівельного майданчику використовують бетононасоси та розчинонасоси.

Бетононасоси призначені для транспортування бетонної суміші по трубопроводу до місця заливки на будівельному майданчику. Вони використовуються для подачі бетону на висоту або в важкодоступні місця, де використання традиційних методів транспортування ускладнене або неможливе. Бетононасоси дозволяють підвищити ефективність будівельних робіт, оскільки забезпечують безперервну подачу суміші з високою точністю і на великі відстані, що особливо важливо при заливці фундаментів, колон, перекриттів або інших конструкцій на значній висоті [80].

Бетононасоси класифікують за декількома ознаками, а саме: за режимом роботи (з періодично подачею (поршневий) та неперервною подачею (шланговий) суміші), за типом приводу (механічний та гідравлічний), за

мобільністю (стаціонарні, причіпні та автобетононасоси), за кількістю бетонотранспортних циліндрів (одно- та двоциліндрові). До переваг бетононасосів відносять продуктивність, відстань і висота подачі бетонної суміші.

Розчинонасоси використовують для транспортування будівельних розчинів по гумовим рукавам або металевим трубам до місця вкладання або для безпосереднього нанесення на поверхню. Відстань подачі розчину, на яку розрахований розчинонасос, складає до 300 м по горизонталі та 80 м по вертикалі. За конструкцією їх поділяють на поршневі та безпоршневі.

У результаті проведеного аналізу існуючих конструкцій бетонозмішувачів, обладнання для приготування бетону та машин для транспортування бетонних сумішей встановлено, що сучасні змішувальні установки суттєво відрізняються за принципом дії, режимом роботи, мобільністю та конструктивним виконанням. Найбільш поширеними є змішувачі циклічної та безперервної дії, а також гравітаційні й примусові, кожен з яких має свої переваги та обмеження залежно від умов експлуатації, вимог до якості суміші та обсягів виробництва.

1.5 Напрямки підвищення ефективності обладнання Для приготування бетонних сумішей

Запровадження повної автономності обладнання створює передумови для його ефективного функціонування без постійного зовнішнього енергопостачання чи ручного втручання оператора, що, у свою чергу, може розширити можливості застосування у віддалених або важкодоступних місцях.

Автономність може бути забезпечена за рахунок інтеграції генераторів змінного струму, які здатні стабільно постачати енергію навіть у найскладніших умовах, що дозволяє підтримувати безперебійну роботу обладнання, забезпечуючи необхідний запас енергії для тривалого функціонування без залежності від зовнішніх джерел живлення [81].

Використання систем самостійного контролю та автоматичного управління технологічним процесом відкриває можливості для автоматичного визначення параметрів змішування, регулювання подачі води, цементу та наповнювачів, а також оперативного реагування на зміну характеристик матеріалів. Такі системи можуть сприяти підвищенню точності виконання процесу та мінімізації втрат ресурсів.

Автономне переміщення та швидке налаштування обладнання можуть забезпечити його мобільність і зменшують витрати часу на підготовку, а малогабаритні автономні установки, оснащені мобільними платформами з власним приводом, дають змогу оперативно змінювати розташування на будівельному майданчику та переміщуватися між об'єктами.

Використання ковша для засипання компонентів у бетонозмішувач значно підвищує ефективність процесу завантаження. Така конструктивна особливість забезпечує механізоване подавання цементу, заповнювачів та інших матеріалів, що дозволяє зменшити ручну працю та скоротити витрати часу на підготовчі операції. Завдяки ковшу оператор отримує можливість швидко й безпечно завантажувати необхідні компоненти, мінімізуючи ризик втрат матеріалів та покращуючи точність дозування.

Додатковою перевагою є підвищення зручності експлуатації обладнання. Ківш сприяє оптимізації робочого процесу, забезпечуючи більш рівномірне та контрольоване завантаження, що позитивно впливає на якість кінцевої бетонної суміші. Такий підхід відповідає сучасним вимогам до механізації будівельних процесів і може стати важливим чинником у підвищенні продуктивності та надійності обладнання для приготування бетону.

Застосування універсального обладнання відкриває перспективи виконання широкого спектра завдань у процесі приготування бетонних сумішей, що може підвищити його функціональність та економічну ефективність. Це особливо актуально для будівельних майданчиків з обмеженими ресурсами.

Універсальність обладнання проявляється у здатності адаптуватися до роботи з різними видами бетонних сумішей. Це забезпечується можливістю

регулювання технологічних параметрів процесу змішування, а саме тривалості, швидкості обертання та точності дозування компонентів. Така гнучкість дозволяє отримувати високоякісні суміші з різними фізико-хімічними властивостями. Наприклад, обладнання може ефективно працювати як з легкими бетонами, так і з важкими чи спеціальними складами, що потребують точного контролю режиму змішування [82].

До універсальності також можна віднести зможу використання різних змінних компонентів і адаптивних робочих органів. Це означає, що обладнання може бути швидко переналаштоване для роботи з різними наповнювачами та добавками. Впровадження змінних змішувальних лопатей або робочих частин, які легко замінюються, забезпечує ефективну адаптацію до вимог конкретного технологічного процесу без потреби в додаткових пристроях.

Багатофункціональність обладнання може дати можливість виконувати кілька операцій одночасно. Сучасні мобільні установки, оснащені системами для попереднього дозування компонентів, контролю якості суміші та її транспортування, здатні знизити потребу у використанні кількох окремих машин, що може скоротити витрати на обслуговування та експлуатацію.

Універсальність обладнання проявляється у здатності інтегруватися в різні технологічні процеси завдяки модульній конструкції, що дозволяє додавати або змінювати функціональні блоки залежно від потреб будівництва. Універсальне обладнання може бути легко налаштоване під конкретні умови роботи, що робить його особливо цінним для застосування в різних середовищах і при різних обсягах робіт.

Одним із визначальних чинників ефективності обладнання для приготування бетону виступає його мобільність. Завдяки мобільності обладнання можна швидко переміщувати на будівельному майданчику або між об'єктами, що значно знижує витрати часу і підвищує продуктивність. Це особливо важливо для будівельних проектів, які вимагають оперативності та гнучкості у виконанні завдань [83].

Компактна конструкція обладнання сприяє його легкому транспортуванню та використанню навіть у складних умовах. Малогабаритні установки можуть мати зручну систему переміщення, наприклад, колісні або гусеничні шасі, що дозволяють пересувати обладнання навіть по складних ландшафтах. Конструкція має забезпечувати стабільність і безпеку при транспортуванні та мінімізувати час на підготовку до роботи після переміщення [15].

Автономні системи живлення можуть надати можливість працювати незалежно від стаціонарних джерел енергії. Це забезпечує можливість використання обладнання у віддалених або важкодоступних місцях, де немає доступу до електромереж. Використання генератора змінного струму може розширити діапазон застосування та зменшити залежність від зовнішніх умов.

Мобільність обладнання передбачає його здатність інтегруватися з іншими системами на будівельному майданчику. Легке підключення до систем транспортування або бетонозмішувальних станцій дозволяє швидко організувати логістику матеріалів, забезпечуючи безперебійну роботу та зниження витрат на додаткову техніку.

Ефективність та зручність використання обладнання значною мірою забезпечуються його малогабаритністю. Компактні розміри дозволяють легко переміщувати і використовувати обладнання в обмежених просторах, що особливо актуально для будівельних майданчиків з обмеженим місцем або у важкодоступних місцях.

Раціонально спроектована конструкція малогабаритного обладнання здатна забезпечити мінімальні габарити без зниження продуктивності. Використання сучасних легких і міцних матеріалів може сприяти зменшенню маси конструкції, що полегшує транспортування і встановлення та знижує витрати на перевезення.

Здатність обладнання до швидкого монтажу та демонтажу може забезпечити скорочення часу на підготовчі операції та дати можливість оперативно розпочати виконання функцій навіть у складних умовах [84].

Малогабаритність також створює умови для ефективної роботи у внутрішніх приміщеннях, де використання великої техніки є непрактичним. Це може значно розширити сферу застосування обладнання та підвищити його ефективність на різних етапах будівельного процесу.

Враховуючи переваги ефективних способів вдосконалення обладнання слід особливий акцент зробити на пошук нових підходів до способу приготування бетонних сумішей, а саме особливостей руху робочого органу.

У зв'язку з цим пропонується вдосконалити метод змішування бетонних сумішей шляхом застосування осциляційного руху барабану змішувача, що може забезпечити більш рівномірне перемішування компонентів та скорочення часу технологічного циклу. Додатково доцільним є удосконалення конструкції обладнання, спрямоване на зменшення габаритів, підвищення мобільності та інтеграцію модульних елементів, які дозволять швидко адаптувати установки до конкретних виробничих завдань.

Таким чином, запропоновані заходи можуть стати основою для створення нового обладнання, здатного ефективно працювати в різних умовах будівельного виробництва та забезпечувати високу якість бетонних сумішей.

1.6 Висновки до розділу 1, мета і завдання дослідження

1. Встановлено, що найбільш поширені бетонозмішувачі циклічної та безперервної дії характеризуються різною ефективністю залежно від умов застосування, причому мобільні установки мають обмежену продуктивність, але забезпечують технологічну автономність і гнучкість використання на будівельному майданчику.

2. Встановлено, що якість бетонної суміші визначається сукупністю технологічних параметрів процесу змішування, серед яких вирішальними є тривалість перемішування, інтенсивність руху компонентів, точність дозування матеріалів і забезпечення необхідної рухливості суміші, що безпосередньо впливає на міцність, морозостійкість і довговічність бетону.

3. Встановлено, що існуючі пересувні бетонозмішувальні установки характеризуються недостатнім рівнем енергоефективності та універсальності, що ускладнює їх використання в умовах віддалених будівельних майданчиків і обмежених енергетичних ресурсів.

4. Виявлено, що підвищення ефективності обладнання для приготування бетонних сумішей досягається шляхом забезпечення автономності енергопостачання, автоматизації технологічних процесів змішування та оптимізації конструктивних параметрів робочих органів змішувачів.

5. За результатами проведеного аналізу встановлено доцільність розроблення автономного універсального малогабаритного обладнання для приготування бетонних сумішей, яке здатне забезпечити підвищення якості змішування при зниженні енерговитрат і розширенні технологічних можливостей використання в умовах будівельного майданчика.

Мета дослідження є підвищення ефективності приготування бетонної суміші в умовах будівельного майданчика шляхом застосування універсального мобільного малогабаритного обладнання з осциляційним рухом барабану і обґрунтування раціональних параметрів його роботи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

– Провести аналіз існуючих конструкцій обладнання для приготування бетонних сумішей та визначити основні напрямки їх удосконалення з урахуванням вимог мобільності, автономності та універсальності.

– Розробити принципову схему конструкції мобільного малогабаритного бетонозмішувального обладнання, здатного працювати в автономному режимі.

– Обґрунтувати вибір типу змішувального обладнання, джерела енергії, системи подачі компонентів та конструкції ємності для приготування бетонної суміші.

– Розробити математичну модель роботи запропонованого обладнання на основі аналізу динаміки змішування бетонних сумішей, з урахуванням впливу геометричних параметрів робочого органу, осциляційного руху барабану та властивостей компонентів бетону.

- Провести аналітичні та експериментальні дослідження процесу приготування бетонної суміші, визначити залежності між основними технологічними параметрами обладнання та показниками якості готової суміші.
- Розрахувати продуктивність та енергоефективність запропонованого обладнання.
- Визначити раціональні режими роботи автономного мобільного малогабаритного обладнання при приготуванні бетонної суміші.
- Провести випробування розробленого обладнання в умовах реального будівельного майданчика та здійснити техніко-економічне обґрунтування його ефективності у порівнянні з традиційними способами приготування бетону.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АВТОНОМНОГО УНІВЕРСАЛЬНОГО МОБІЛЬНОГО МАЛОГАБАРИТНОГО БЕТНОЗМІШУВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

2.1 Конструктивна схема та принцип дії автономного універсального мобільного малогабаритного бетонозмішувача

Традиційні бетонозмішувачі, які часто використовуються на будівельному майданчику, мають низку недоліків, серед яких залежність від електромережі, великі габарити та обмежена функціональність. Умови сучасного будівництва, особливо у віддалених або просторово обмежених ділянках, потребують автономних, малогабаритних і універсальних пристроїв, здатних забезпечити циклічне приготування бетонної суміші з мінімальними енерговитратами та високою якістю кінцевого продукту. У зв'язку з цим було запропоновано принципову схему автономного універсального мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетону, що може поєднувати процеси завантаження компонентів, їх змішування та подальшого розвантаження готової суміші у необхідному напрямку [65].

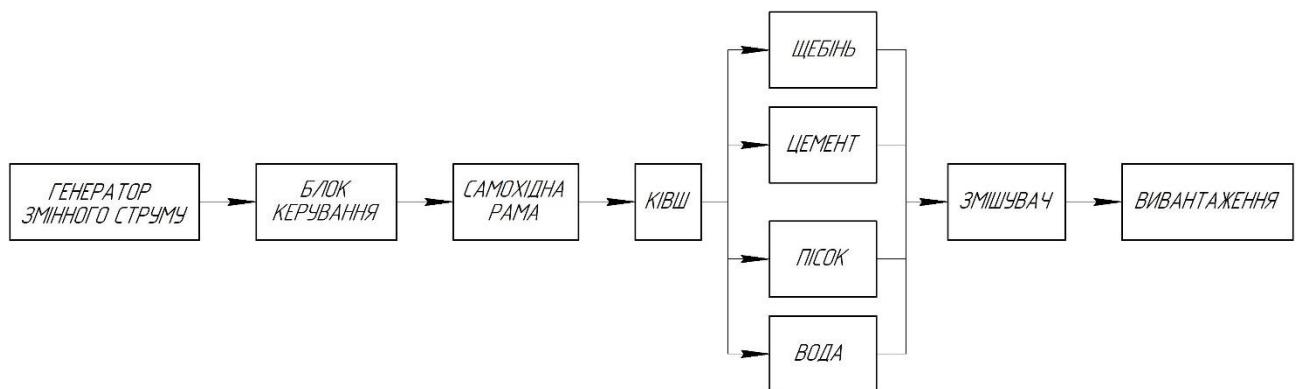


Рисунок 2.1 – Принципова схема обладнання для приготування бетону

Обладнання для приготування бетону, спроектоване згідно схеми, поєднує в собі компактність, функціональність і високу ефективність роботи. Основними елементами обладнання є рама з колісною базою, генератор змінного струму, змішувальний барабан з лопатками, ківш для самозавантаження, гідравлічна

система та блок керування. Кожен з цих елементів виконує певну функцію, забезпечуючи автономну роботу обладнання та високу якість приготування бетонної суміші. Конструктивна схема обладнання представлена на рисунку 2.2.

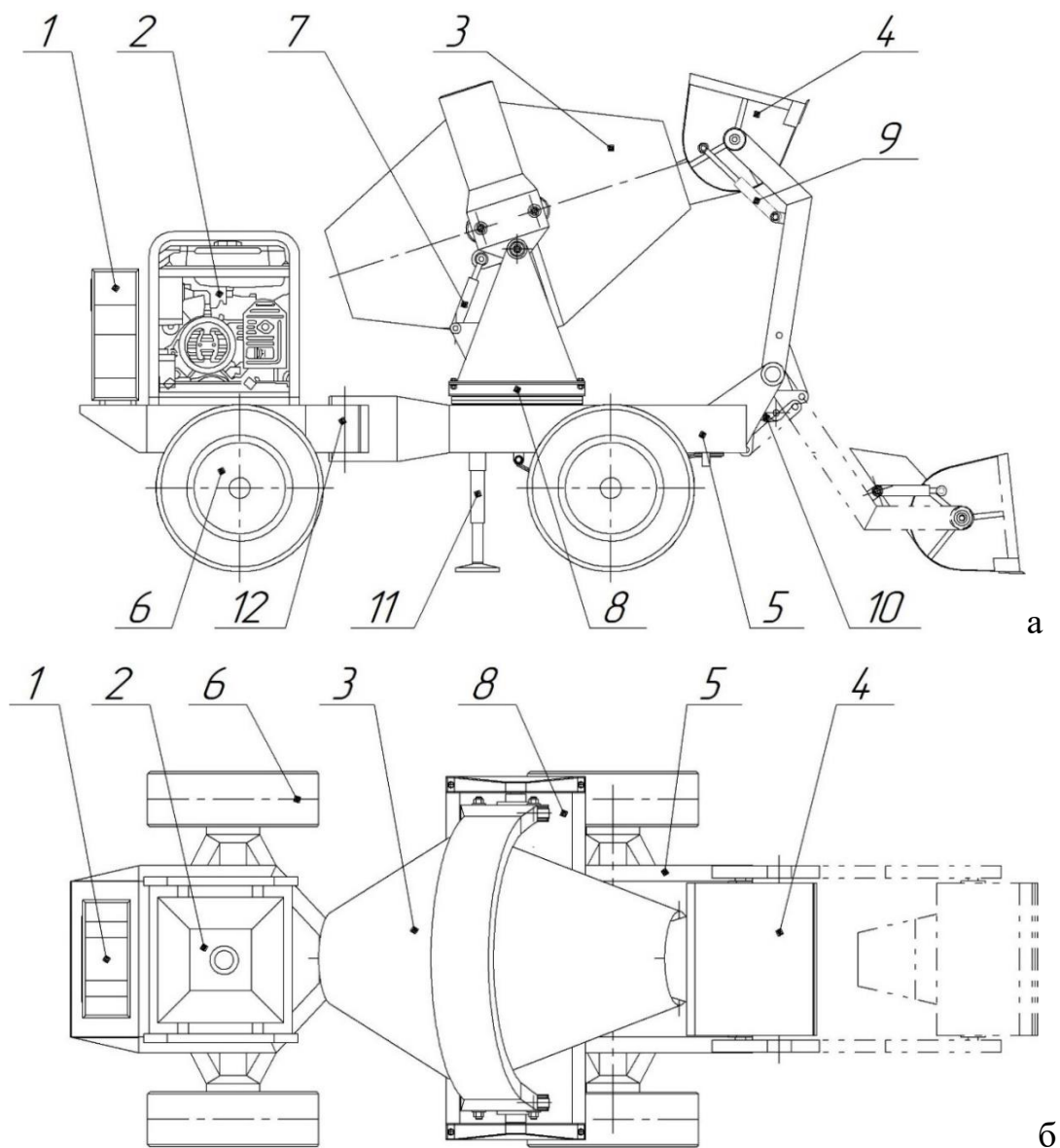


Рисунок 2.2 – Конструктивна схема автономного універсального мобільного обладнання для приготування бетону:

а – вигляд зліва; б – вигляд зверху: 1 – блок керування; 2 – генератор змінного струму; 3 – барабан змішувальний; 4 – ківш; 5 – рама; 6 – колеса; 7 – гідроциліндр нахилу барабана змішувального; 8 – платформа опорно-поворотна; 9 – гідроциліндр нахилу ковша; 10 – гідроциліндр підйому ковша; 11 – аутригер; 12 – шарнір поворотний

Основою конструкції є шарнірно-зчеплена рама, яка забезпечує міцність і стійкість всіх вузлів та агрегатів, що на ній закріплені. Для забезпечення мобільності обладнання рама оснащена колісною базою, яка дозволяє легко транспортувати бетонозмішувач як будівельним майданчиком, так і на невеликій відстані до місця виконання робіт. Колеса закріплені таким чином, щоб зберігати стійкість обладнання під час руху та забезпечувати його маневреність у вузьких або обмежених умовах. Для додаткової стійкості в процесі роботи обладнання оснащено аутригерами, які фіксують його положення на поверхні, запобігаючи зміщенням або перекиданням під час змішування та розвантаження суміші [85].

Автономність обладнання забезпечується генератором змінного струму, який закріплений на рамі та слугує джерелом електричної енергії для живлення всіх вузлів системи. Генератор дозволяє працювати в умовах відсутності електропостачання, що є важливою перевагою при використанні обладнання у віддалених районах або на будівельних майданчиках, де немає стаціонарних джерел живлення. Електроенергія від генератора подається до блока керування, який забезпечує функціонування змішувача, гідравлічних циліндрів і додаткових механізмів.

Головним робочим органом обладнання є змішувальний барабан, який призначений для інтенсивного перемішування компонентів бетонної суміші. Лопатки, закріплені на стінках барабана, розподіляють матеріал по всьому об'єму, забезпечуючи рівномірний розподіл компонентів і високу якість готової суміші. Барабан приводиться в обертання за допомогою гідромотора, що живиться від гідросистеми, а регулювання частоти його обертання здійснюється блоком керування.

Для завантаження компонентів бетонної суміші обладнання оснащено спеціальним ковшем, що працює у взаємодії з гідравлічним приводом. Ківш закріплений на рамі й може підніматися та опускатися завдяки гідравлічним циліндрам. У процесі роботи оператор керує ковшем за допомогою дистанційного пульта або блока керування, завантажуючи компоненти суміші (цемент, пісок, воду, добавки) у змішувальний барабан. Такий механізм

завантаження дозволяє скоротити час на підготовчі операції та зменшити потребу у додатковій робочій силі, підвищуючи продуктивність роботи обладнання.

Також конструкція містить поворотну платформу, яка забезпечує розвантаження готової бетонної суміші. Поворотна платформа дозволяє обертати змішувальний барабан на кут до 270 градусів (рис.2.3), що дає можливість виконувати розвантаження у різних напрямках залежно від потреб будівельного майданчика. Це значно підвищує гнучкість використання обладнання та дозволяє точно подавати бетонну суміш до місця заливки (фундаменти, опалубки тощо).

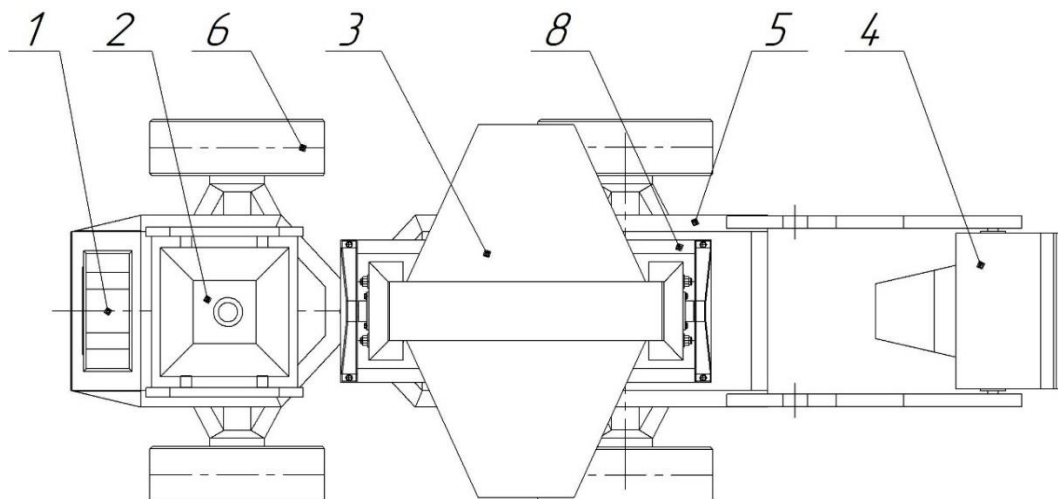


Рисунок 2.3 – Конструктивна схема бетонозмішувача в положенні вивантаження

Гідравлічна система забезпечує роботу ковша для завантаження компонентів та функціонування поворотного механізму змішувального барабана. До складу гідравлічної системи входять гідроциліндри, бак для гідравлічної рідини, розподільники та інші компоненти, які дозволяють точно контролювати рухи робочих органів. Завдяки гідравлічному приводу забезпечується плавність та надійність роботи обладнання, а також можливість регулювання інтенсивності роботи залежно від конкретних умов будівництва.

Принцип дії автономного універсального мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетону побудований на забезпеченні повного циклу робіт із приготування бетонної суміші, включаючи завантаження компонентів, їх інтенсивне перемішування та розвантаження готового продукту.

Перед початком роботи оператор запускає генератор змінного струму, який забезпечує живлення всіх систем обладнання. Електроенергія, що виробляється генератором, розподіляється блоком керування, який слугує для дистанційного моніторингу та налаштування всіх функцій обладнання та дозволяє оператору задавати необхідні параметри роботи, такі як частота обертання змішувального барабана, рух ковша та активація поворотного механізму. Дистанційне керування забезпечує зручність і безпеку експлуатації, особливо у випадках, коли обладнання працює у складних умовах.

Процес роботи починається із фази завантаження компонентів бетонної суміші. Оператор за допомогою пульта дистанційного керування активує гідравлічну систему, яка приводить у дію ківш для завантаження. Після проходу вперед ківш піднімається за допомогою гідроциліндрів, захоплюючи матеріали (пісок, щебінь) та подає їх у змішувальний барабан. Цемент додається вручну оператором, який насипає його безпосередньо у ківш перед подачею в барабан. Точний контроль руху ковша забезпечує ефективне завантаження без розсипання матеріалів, що підвищує економічність роботи.

Після завантаження компонентів у змішувальний барабан запускається процес перемішування. Змішувач приводиться в дію гідромотором, а регулювання його обертання здійснюється за допомогою блоку керування. Внутрішня конструкція барабана передбачає наявність лопаток (рис. 2.4), закріплених на його стінках. Лопатки розподіляють спрямовані потоки матеріалу, забезпечуючи інтенсивне перемішування по всьому об'єму барабана.

Під час цієї фази гідроциліндр починає змінювати кут нахилу барабана на 15-20 градусів в один бік, а потім на такий самий кут в протилежний бік. Ця дія створює додатковий вплив на компоненти бетонної суміші. Під час нахилу

барабана компоненти змушені рухатися не лише під дією обертання, а й у напрямку, що змінюється відповідно до нового положення барабана [86].

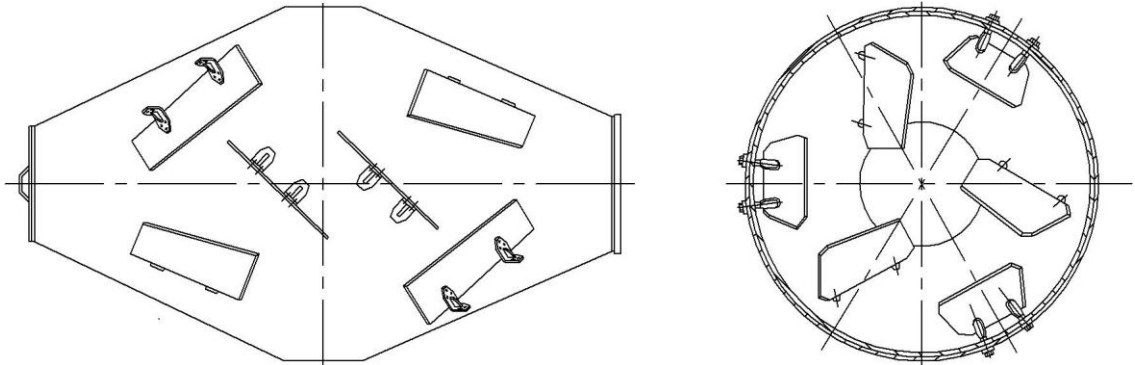


Рисунок 2.4 – Схема розміщення лопаток в змішувальному барабані

У процесі нахилу відбувається перерозподіл матеріалів по малій основі одного із зрізаних конусів барабана. При зміні кута нахилу барабана компоненти починають рухатися у зворотному напрямку, створюючи циклічний процес перерозподілу матеріалів. Вони рухаються не тільки вертикально, як при звичайному гравітаційному змішуванні, а й додатково рухаються у бік нахилу барабана. Це викликає переміщення компонентів у горизонтальній площині, що сприяє інтенсивнішому та рівномірному їх розподілу по всьому об'єму барабана.

Цей динамічний процес забезпечує більш ефективне змішування всіх компонентів, навіть тих, що могли залипнути або зосередитися на одній стороні барабана. В результаті досягається більш рівномірний розподіл всіх матеріалів у суміші, зокрема добавок або дрібнодисперсних компонентів.

Під час зміни кута нахилу барабану компоненти піддаються впливу лопаті, продовжуючи підніматися та падати вниз. Під впливом гравітації ця фаза включає повторювальне підняття і падіння матеріалів, що сприяє подальшому покращенню перемішування.

Після кількох циклів перемішування із зміною кута нахилу компонентів бетонна суміш досягає необхідної однорідності. На цьому етапі барабан повертається у початкове положення, і змішування завершується.

Після завершення процесу змішування готова бетонна суміш розвантажується через поворотний механізм. Цей механізм забезпечує поворот платформи барабана на кут до 270° , що дозволяє направити суміш у потрібну точку вивантаження. Оператор задає необхідний напрямок розвантаження за допомогою дистанційного керування, що забезпечує високу точність виконання робіт. Такий підхід є особливо зручним при заливанні бетону у фундаменти, опалубки або інші будівельні конструкції, які потребують точного дозування та подачі матеріалу.

Важливою складовою процесу роботи обладнання є забезпечення стійкості під час виконання завантажувальних, змішувальних і розвантажувальних операцій. Для цього використовуються аутригери, які фіксують положення обладнання у просторі. Вони не лише запобігають небажаним зміщенням, але й зменшують вібрації, що виникають під час роботи змішувача або гідравлічної системи.

Завершення циклу роботи передбачає вимикання змішувача та приведення обладнання у стан готовності до наступного циклу. Конструктивні особливості та автономне живлення забезпечують умови, за яких усі процеси мають виконуватися швидко й ефективно, що у свою чергу сприяє підвищенню продуктивності та зниженню енерговитрат.

2.2 Розроблення загальної моделі роботи бетонозмішувача

За новим способом приготування бетонної суміші

2.2.1 Передумови побудови математичної моделі процесу змішування

Процес створення математичної моделі роботи автономного універсального мобільного малогабаритного бетонозмішувача базується на аналізі конструкції обладнання, його функціональних характеристик та особливостей нового способу змішування бетонної суміші. Розробка загальної моделі потребує врахування кількох важливих параметрів, зокрема мінімізації

енерговитрат, забезпечення необхідної якості готової бетонної суміші та дотримання принципів оптимальної роботи всіх елементів системи.

Основним завданням при побудові моделі є визначення взаємозв'язків між джерелом енергії, робочими органами обладнання та параметрами суміші, які впливають на її якість. Для досягнення оптимальної роботи бетонозмішувача необхідно забезпечити такий режим функціонування, за якого споживана потужність буде мінімальною, але достатньою для досягнення необхідних показників якості змішування. Це передбачає ретельний аналіз усіх етапів роботи обладнання, від завантаження компонентів до розвантаження готової суміші.

Основним робочим органом є змішувальний барабан із лопатками, закріпленими на його внутрішніх стінках. Особливість нового способу змішування, що передбачає періодичну зміну кута нахилу барабана, потребує врахування динамічних характеристик руху компонентів усередині барабана. Необхідно визначити, як зміна кута нахилу впливає на рівномірність розподілу матеріалів, інтенсивність змішування та енерговитрати. Також слід врахувати, що конструкція барабана зменшує можливість налипання матеріалів на його стінки, що сприяє скороченню часу змішування та підвищенню продуктивності роботи обладнання.

При моделюванні важливо врахувати фізико-механічні та технологічні характеристики бетонної суміші, такі як в'язкість, граничне напруження зсуву та рухливість. Ці параметри безпосередньо впливають на роботу змішувального органа, адже саме вони визначають зусилля, необхідні для перемішування матеріалів. Крім того, для забезпечення надійної роботи обладнання необхідно врахувати вплив зміни швидкості обертання барабана та періодичної зміни його нахилу на енерговитрати.

У процесі побудови загальної моделі змішування необхідно визначити сумарну кількість енергії, що споживається в різних режимах роботи, і розробити механізм коригування енерговитрат відповідно до потреб кожного моменту часу.

Це дозволить мінімізувати споживану потужність, зберігаючи при цьому якість готової суміші на високому рівні.

Таким чином, побудова загальної моделі змішування у автономному універсальному мобільному малогабаритному бетонозмішувачі потребує комплексного підходу, який враховує конструктивні особливості обладнання, фізичні властивості бетонної суміші та режими роботи системи. Визначення взаємозв'язків між цими параметрами дозволить оптимізувати роботу обладнання, забезпечити його енергоефективність і підвищити якість приготування бетонної суміші.

2.2.2 Математичне моделювання процесу приготування бетонної суміші у змішувачі

Процес приготування бетонної суміші у змішувачі охоплює механічний рух компонентів, їх взаємодію та дію робочих органів обладнання. Математичне моделювання цього процесу має на меті формування узагальненої моделі, яка дозволяє оптимізувати режими роботи змішувача, досягаючи необхідної якості суміші при мінімальних енерговитратах.

У запропонованому бетонозмішувачі процес перемішування здійснюється за допомогою обертання змішувального барабана, на внутрішніх стінках якого закріплені лопатки. На відміну від традиційних конструкцій, новий спосіб передбачає періодичну зміну кута нахилу барабана під час обертання, що створює додаткову складову руху компонентів у горизонтальній площині. Це дозволяє досягти більш рівномірного розподілу частинок по всьому об'єму суміші.

Для опису процесу змішування застосовується підхід, що враховує рух компонентів як вздовж лопатки, так і по всьому об'єму змішувача.

Рух суміші вздовж лопатки відбувається на рівні окремих частинок, що взаємодіють із лопатками барабана. У результаті обертання барабана лопатки створюють локальні зони зсуву, які спричиняють зміну швидкостей частинок у

прилеглих шарах суміші. Ці зони характеризуються ненульовими значеннями роторів швидкостей, що свідчить про інтенсивність процесу перемішування на рівні частинок уздовж лопатки. Важливим параметром, який визначає ефективність руху суміші вздовж лопатки, є форма та розташування лопаток, а також швидкість обертання барабана.

Рух суміші вздовж усього барабана характеризується переміщенням значних об'ємів у робочому просторі. У запропонованому обладнанні періодична зміна кута нахилу барабана додає горизонтальну складову руху, що сприяє ефективнішому перемішуванню. Математично цей процес можна описати як «заміщення» об'ємів суміші в обмеженому просторі, де кожна частинка отримує можливість змінювати своє положення як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах.

Для побудови математичної моделі необхідно врахувати динамічну рівновагу сил, що діють на частинки суміші під час змішування. До основних сил належать:

- Гравітаційна сила, яка спричиняє вертикальний рух частинок.
- Сили інерції, що виникають під час обертання барабана.
- Контактні сили, які передаються через лопатки.
- Гідродинамічний опір, що чиниться частинками з боку рідини.

Відповідно до гідродинамічної теорії, поле швидкостей у суміші можна описати за допомогою рівнянь Нав'є-Стокса, які враховують вплив в'язкості рідини, густини суміші та швидкості руху компонентів. Під час роботи змішувача важливо враховувати, що суміш є неоднорідним середовищем, де одночасно присутні тверді частинки, рідина та повітряні включення [87].

Для спрощення розрахунків передбачається, що суміш має властивості в'язкопластичного середовища, де визначальними параметрами є граничне напруження зсуву та структурована в'язкість. Ці характеристики враховуються під час визначення сил, необхідних для подолання опору суміші при русі робочих органів.

Додатково, періодична зміна кута нахилу барабана потребує введення до моделі часової змінної, яка описує частоту та амплітуду цього руху. Математично цей рух можна подати як функцію періодичного зміщення центру мас суміші, що спричиняє зміну швидкостей частинок у горизонтальній площині.

Результатом моделювання є визначення оптимальних параметрів роботи змішувача, зокрема:

- Частоти обертання барабана, за якої забезпечується ефективний рух суміші вздовж лопатки та вздовж усього барабана.
- Амплітуди та частоти зміни кута нахилу барабана для рівномірного розподілу компонентів.
- Енерговитрат на кожному етапі змішування.

2.2.2.1 Дослідження руху бетонної суміші вздовж лопатки барабана

Рух суміші вздовж лопатки у гравітаційному бетонозмішувачі зумовлений складним переміщенням частинок по внутрішній поверхні барабана під дією гравітаційних та інерційних сил. Обертання барабана з лопатками змінює траєкторію руху суміші та сприяє її рівномірному перемішуванню [88].

Траєкторія руху частинок будівельної суміші може бути описана у циліндричній системі координат (R, φ, z) , де R – радіус барабана, φ – кут обертання, а z – вертикальна координата відносно основи барабана. Рух частинок складається з двох основних складових: обертального руху разом із барабаном та поступального зміщення під дією сили тяжіння і відцентрових сил [89].

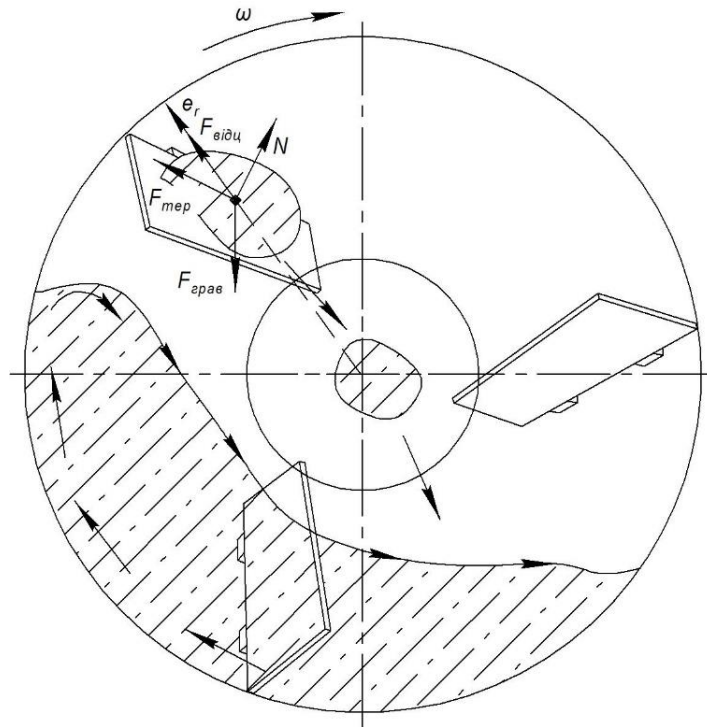


Рисунок 2.5 – Взаємодія лопатки та суміші

При обертанні барабана з кутовою швидкістю ω частинки суміші набувають обертальної швидкості

$$v_{\varphi} = \omega \cdot R, \quad (2.1)$$

де R – відстань від осі обертання до частинки, м;

ω – кутова швидкість обертання барабана, рад/с.

Однак під дією гравітації частинки рухаються вниз по поверхні барабана, утворюючи характерну траєкторію. Вертикальне переміщення можна описати як

$$z(t) = h_1 - \frac{1}{2}gt^2, \quad (2.2)$$

де h_1 – початкова висота частинки, м;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

t – час переміщення, с.

Лопатки змінюють напрямок руху частинок, забезпечуючи їх відрив від поверхні барабана та подальше переміщення. Траєкторія такого відриву може бути змодельована як крива, що описується рівнянням параболічної форми

$$z = R \tan(\beta) \cos(\varphi), \quad (2.3)$$

де β – кут нахилу лопатки, рад;

φ – кутова координата частинки, рад.

Для опису руху суміші у горизонтальній площині використовуємо кінематичні залежності між радіусом R , кутовою швидкістю ω та кутом відриву φ_0 , за якого частинка відокремлюється від поверхні барабана

$$\varphi_0 = \arcsin\left(\frac{g}{\omega^2 R}\right). \quad (2.4)$$

На основі цих параметрів формується загальне рівняння поверхні траєкторії руху частинок у барабані

$$z = R \tan(\beta) \cos(\omega t) - \frac{1}{2} g t^2. \quad (2.5)$$

Оптимальний кут нахилу лопаток β визначається таким чином, щоб забезпечити максимальний відрив частинки від поверхні барабана з подальшим рівномірним розподілом по всьому об'єму. Зазвичай для ефективного змішування кут β приймають у межах від 30° до 45° . При такому куті частинка отримує достатньо кінетичної енергії для відриву, але її траєкторія залишається контрольованою

$$\beta_{opt} = \arctan\left(\frac{g t_{відрив}^2}{2R}\right), \quad (2.6)$$

де $t_{відрив}$ – час до моменту відриву частинки від лопатки, який визначається умовою рівності відцентрової сили та сили тяжіння

$$\omega^2 R \cos(\beta) = g. \quad (2.7)$$

На рисунку 2.6 наведено залежність кута нахилу лопатки від радіуса барабана. Встановлено, що зі збільшенням відстані від осі обертання барабана раціональний кут нахилу лопатки поступово зменшується. Це пояснюється збільшенням лінійної швидкості руху частинок бетонної суміші на більших радіусах барабана, внаслідок чого необхідна інтенсивність їх переміщення може бути забезпечена при менших кутах нахилу лопаток. Запропонована геометрія робочого органа сприяє рівномірному переміщенню компонентів суміші по всьому об'єму барабана, підвищує інтенсивність перемішування та забезпечує отримання більш однорідної бетонної суміші.

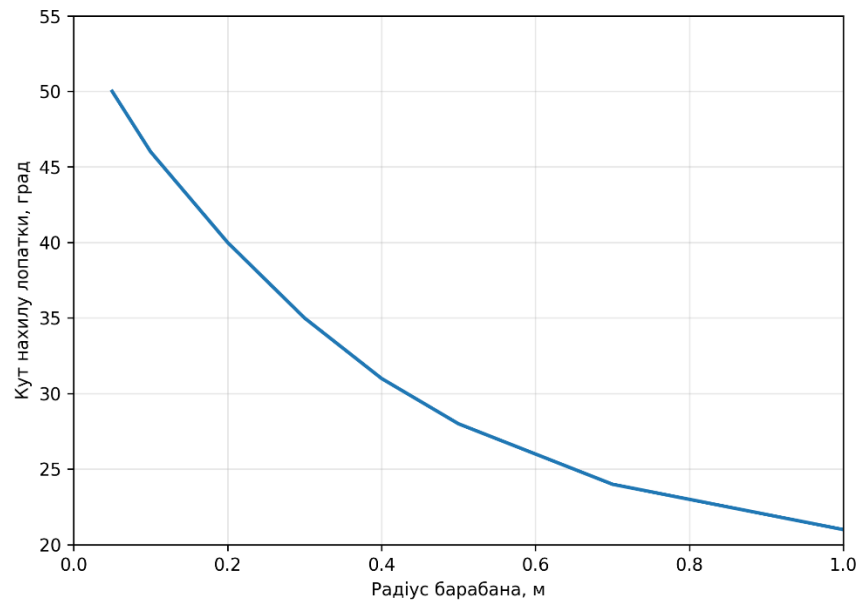


Рисунок 2.6 – Залежність оптимального кута нахилу лопатки від радіуса барабана

Звідси оптимальна кутова швидкість обертання барабана ω_{opt} дорівнює

$$\omega_{opt} = \sqrt{\frac{g}{R \cos(\beta)}}. \quad (2.8)$$

З цього рівняння видно, що час змішування зменшується зі збільшенням кутової швидкості обертання ω та при зменшенні радіуса R . Проте занадто висока швидкість обертання призводить до утворення ефекту «центрифугування», коли частинки притискаються до стінок барабана, і ефективність перемішування знижується [40]. Тому існує критичне значення $\omega_{кр}$, при якому частинки більше не відриваються від лопатки

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{g}{R}}. \quad (2.9)$$

Для забезпечення ефективного змішування кутова швидкість обертання повинна бути меншою за критичну, але достатньою для відриву частинок

$$\omega_{opt} = 0,6 \div 0,8 \omega_{кр}. \quad (2.10)$$

Залежності для визначення оптимальних значень параметрів можна представити як систему рівнянь

$$\begin{cases} \beta_{opt} = 30^\circ \div 45^\circ, \\ \omega_{opt} = 0,7\sqrt{\frac{g}{R}}, \\ R_{opt} = \text{залежить від конструктивних обмежень.} \end{cases} \quad (2.11)$$

Рішення цієї системи дозволяє визначити такі значення параметрів, які забезпечать мінімальний час змішування та максимальну ефективність процесу. Для гравітаційних бетонозмішувачів зі стандартним діаметром барабана $0,6 \text{ м} \leq D \leq 1,5 \text{ м}$ оптимальна кутова швидкість обертання знаходиться у діапазоні $2 \dots 6 \text{ рад/с}$ [89].

Час досягнення частинкою поверхні барабана, що враховує вертикальну складову руху визначається як

$$t_{en} = \sqrt{\frac{2h_1}{g}}. \quad (2.12)$$

Горизонтальний рух частинки разом із барабаном обумовлений обертанням барабана з кутовою швидкістю ω . Горизонтальна швидкість частинки визначається як

$$v_{гор} = R \cdot \omega. \quad (2.13)$$

У випадку рівномірного обертання барабана горизонтальне переміщення частинки можна виразити через кут обертання ϕ за допомогою формули

$$\phi = \omega \cdot t. \quad (2.14)$$

В такому випадку час, необхідний для досягнення певного кута обертання ϕ , визначається як

$$t_{гор} = \frac{\phi}{\omega}. \quad (2.15)$$

Для частинки, що рухається по лопатці, час переміщення залежить від кута нахилу лопатки β [92]. Рух частинки вздовж лопатки обумовлений проекцією сили тяжіння $F_{тяж,вздовж} = mg \sin \beta$. Швидкість частинки у цьому напрямку можна записати як $v = \sqrt{2gh \sin \beta}$, звідки час переміщення частинки по лопатці дорівнює

$$t_{\text{лон}} = \frac{L}{\sqrt{2gh \sin \beta}}, \quad (2.16)$$

де L – довжина траєкторії частинки вздовж лопатки, м;

h – висота, з якої частинка починає рух, м.

Об'єднавши вертикальну складову, горизонтальну складову та рух по лопатці, можна записати загальний час переміщення частинки у вигляді

$$t_{\text{заг}} = t_{\text{вн}} + t_{\text{гор}} + t_{\text{лон}}. \quad (2.17)$$

Загальне рівняння руху частинки по поверхні лопатки визначається умовами балансу сил

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}_{\text{інерції}} + \vec{F}_{\text{тяжіння}} + \vec{N}, \quad (2.18)$$

де m – маса частинки, кг;

$\vec{F}_{\text{інерції}}$ – сила інерції, що виникає внаслідок обертання барабана, Н;

$\vec{F}_{\text{тяжіння}}$ – сила тяжіння, Н;

\vec{N} – реакція опорної поверхні лопатки, Н.

Сила інерції у циліндричних координатах при обертанні барабана зі сталою кутовою швидкістю ω записується у наступному вигляді

$$\vec{F}_{\text{інерції}} = -m\omega^2 r \vec{e}_r, \quad (2.19)$$

де \vec{e}_r – одиничний вектор у напрямку радіуса r .

На рисунку 2.7 наведено залежність швидкості руху частинки бетонної суміші вздовж лопатки від кута її нахилу. Аналіз графіка показує, що зі збільшенням кута нахилу лопатки від 10° до 50° швидкість переміщення частинок зростає від 0,83 до 1,72 м/с. Найбільш інтенсивне зростання швидкості спостерігається в діапазоні кутів $10\text{--}35^\circ$, після чого приріст поступово зменшується. Це пояснюється збільшенням складової сили тяжіння, спрямованої вздовж поверхні лопатки, що сприяє активнішому переміщенню частинок суміші. Отримана залежність підтверджує суттєвий вплив геометричних параметрів лопатки на кінематику руху матеріалу та може бути використана для обґрунтування раціональних значень кута нахилу лопаток змішувача.

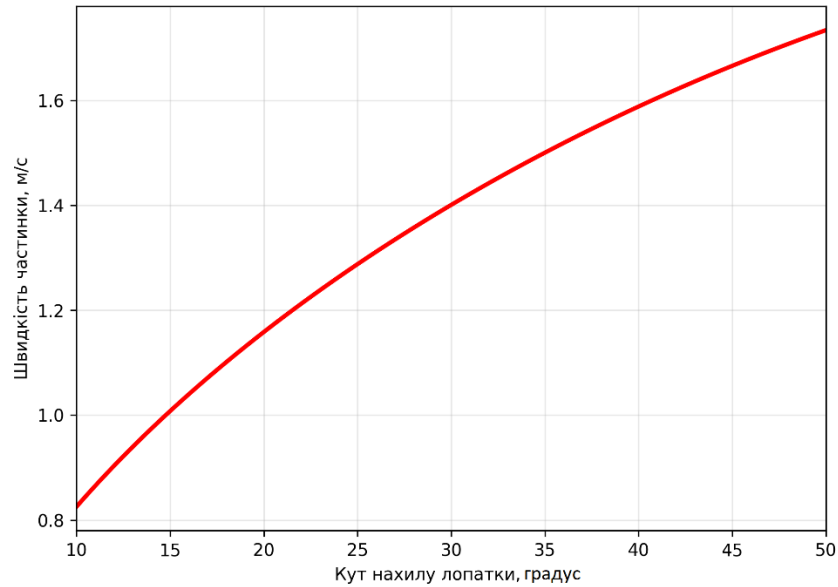


Рисунок 2.7 – Залежність швидкості руху частинки бетонної суміші вздовж лопатки від кута її нахилу

Сила тяжіння діє у вертикальному напрямку та має проекції на компоненти r та z

$$\vec{F}_{\text{тяжіння}} = -mg(\sin \beta \vec{e}_r + \cos \beta \vec{e}_z). \quad (2.20)$$

Реакція опорної поверхні N перпендикулярна до поверхні лопатки і компенсує нормальну складову сил, що діють на частинку. Проекції рівняння руху частинки на компоненти r , ϕ та z мають вигляд

$$m \frac{d^2 r}{dt^2} - mr\omega^2 = -mg \sin \beta + N_r, \quad (2.21)$$

$$mr \frac{d^2 \phi}{dt^2} = 0, \quad (2.22)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -mg \cos \beta + N_z. \quad (2.23)$$

Оскільки частинка перебуває на поверхні лопатки, її траєкторія обмежена умовою, що вона не відривається від поверхні. Це означає, що відцентрова сила інерції повинна бути меншою або дорівнювати проекції сили тяжіння на радіальний напрямок. З цієї умови випливає

$$m\omega^2 r \leq mg \sin \beta. \quad (2.24)$$

Оптимальне значення кута нахилу β забезпечує таку рівновагу, коли частинка рухається вздовж поверхні лопатки, але не відривається від неї. Критичний кут нахилу $\beta_{кр}$ можна визначити з умови рівності сил інерції та тяжіння

$$\beta_{кр} = \arcsin\left(\frac{\omega^2 r}{g}\right). \quad (2.25)$$

Траєкторія частинки на поверхні лопатки має гвинтоподібний характер і залежить від швидкості обертання барабана та геометрії лопатки. Для опису переміщення частинки вздовж лопатки введемо параметричне рівняння її траєкторії у циліндричних координатах

$$r(t) = r_0 + v_r t, \quad \phi(t) = \omega t, \quad z(t) = z_0 + v_z t, \quad (2.26)$$

де r_0 і z_0 – початкові координати частинки;

v_r і v_z – компоненти швидкості частинки у радіальному та вертикальному напрямках відповідно, м/с.

Траєкторія частинки має параболічну форму, обумовлену впливом гравітації та нахилом лопатки. У такому випадку рівняння траєкторії можна записати у вигляді

$$z(r) = z_0 - \frac{g}{2\omega^2} (r - r_0)^2 \tan \beta. \quad (2.27)$$

Ця формула враховує радіальний рух частинки з відносно постійною кутовою швидкістю та залежність траєкторії від кута нахилу лопатки.

Швидкість переміщення частинки по лопатці залежить від кута нахилу β і сили тертя між частинкою та поверхнею лопатки. Враховуючи силу тертя $F_{терт}$, отримаємо вираз для швидкості

$$v_{лон} = \sqrt{2gr(\sin \beta - \mu \cos \beta)}, \quad (2.28)$$

де μ – коефіцієнт тертя.

Для оптимізації траєкторії руху частинки необхідно забезпечити баланс між силами інерції, тяжіння та тертя. Занадто великий кут нахилу лопатки β може призвести до швидкого скочування частинки, але зниження інтенсивності перемішування. З іншого боку, малий кут нахилу збільшує час руху частинки по

лопатці, що негативно впливає на швидкість змішування. Оптимальне значення кута нахилу забезпечується з умови максимізації швидкості переміщення частинки та мінімізації втрат на тертя

$$\beta_{opt} = \arctan \left(\frac{\mu}{1 - \frac{\omega^2 r}{g}} \right). \quad (2.29)$$

Якщо частка рухається без ковзання, її траєкторія визначається виключно геометрією лопатки. У разі ковзання слід враховувати втрати енергії через тертя, що впливають на загальну ефективність змішування. Траєкторія частки у площині x - y визначається диференціальними рівняннями руху

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x, \quad m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_y, \quad (2.30)$$

де F_x та F_y – проєкції сумарної сили на відповідні осі.

Ці проєкції враховують сили інерції, тяжіння, тертя та нормального тиску. Залежно від умов, траєкторія часток може бути як плавною (у разі сталого контакту з лопаткою), так і переривчастою (у разі відриву частки від поверхні лопатки).

Висота підйому частинки h розраховується за формулою

$$h = R \sin \phi, \quad (2.31)$$

де ϕ – кут, під яким суміш піднімається вздовж лопатки, рад.

Швидкість руху частинок у пристінковому шарі поблизу поверхні лопатки зазвичай знижується через тертя. Для опису профілю швидкостей у цьому шарі можна використати рівняння ламінарного потоку

$$v_x(z) = \frac{\tau_w}{\mu} z, \quad (2.32)$$

де τ_w – дотичне напруження на поверхні лопатки, Н/м²;

μ – в'язкість матеріалу;

z – відстань від поверхні лопатки.

Середня швидкість частинок у полі дозволяє оцінити ефективність перемішування та розраховується за формулою

$$\bar{v} = \frac{1}{V} \int_V u dV, \quad (2.33)$$

де V – об'єм контрольної зони, м^3 .

Особливу увагу слід приділити зоні безпосереднього контакту частинок із лопаткою. У цій зоні відбувається передача енергії від лопатки до частинок, а поле швидкостей характеризується значними градієнтами [93]. Зокрема, градієнт швидкості у напрямку z визначається як

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_w}{\mu}. \quad (2.34)$$

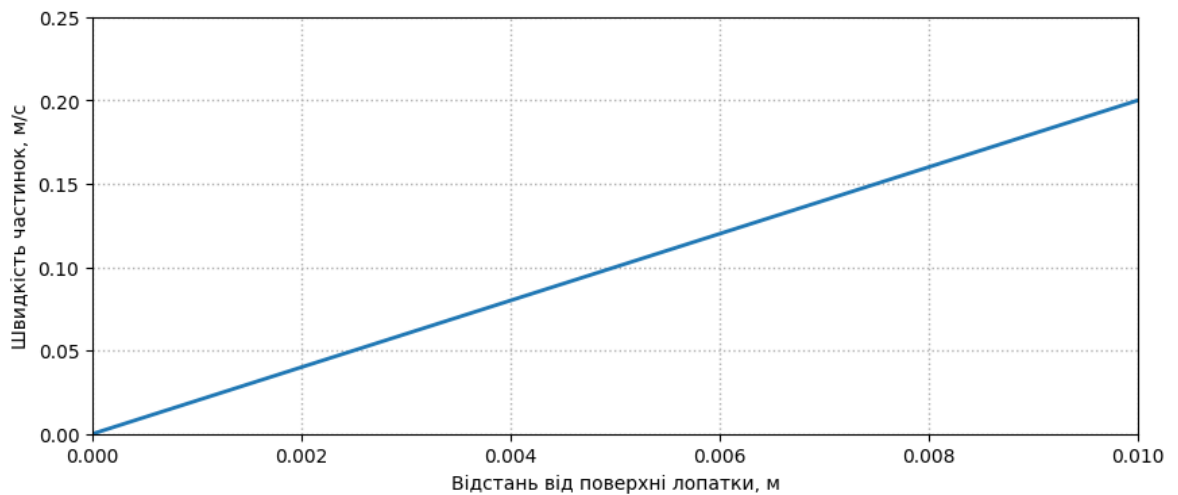


Рисунок 2.8 – Розподіл швидкості частинок по відстані лопаток

Рисунок 2.8 ілюструє розподіл швидкості частинок у пристінковому шарі поблизу лопатки. При безпосередньому контакті з поверхнею швидкість частинок наближається до нуля, однак зі збільшенням відстані вона зростає майже лінійно. Така залежність пояснюється дією в'язкого тертя та відповідає теоретичним рівнянням ламінарного потоку (2.32–2.34), що підтверджує адекватність моделі.

Проекція поля швидкостей частинок через проекцію лопатки дозволяє оцінити розподіл швидкостей частинок у просторі і врахувати вплив геометрії робочої поверхні лопатки та траєкторії їх руху [94]. Для цього використовуються координатні системи, які відображають просторову орієнтацію лопатки, та

методи проекції векторних величин. В такому випадку повна швидкість частинки задається як

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}. \quad (2.35)$$

Для визначення проекції швидкості на задану координатну площину $xу$ обчислюється величина

$$v_{xy} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \quad (2.36)$$

Ця проекція відображає динаміку частинок у площині, паралельній до поверхні лопатки.

Проекція площі лопатки на координатну площину також враховується та дозволяє враховувати вплив нахилу лопатки на розподіл швидкостей частинок у просторі

$$S_{xy} = S \cdot \cos \alpha, \quad (2.37)$$

де S – площа поверхні лопатки, m^2 ;

α – кут нахилу між лопаткою і площиною, $^\circ$.

Для візуалізації розподілу швидкостей частинок будується векторне поле, яке відображає напрямок і величину швидкостей частинок у кожній точці поверхні лопатки. Для координатної площини $xу$ векторне поле дозволяє аналізувати траєкторії руху частинок, а також визначати області концентрації максимальних швидкостей та задається наступним чином

$$\vec{v}_{xy}(x, y) = (v_x(x, y), v_y(x, y)). \quad (2.38)$$

Для оцінки рівномірності розподілу швидкостей у площині можна використати середнє значення швидкості, яке обчислюється по всій площині проекції, що дозволяє отримати глобальні характеристики поля швидкостей

$$\bar{v}_{xy} = \frac{1}{S_{xy}} \int_{S_{xy}} v_{xy} dS. \quad (2.39)$$

Зони зсуву створюють локальні області з високими градієнтами швидкості, які забезпечують інтенсивну взаємодію між частинками будівельної суміші. Ці області виникають у місцях безпосереднього контакту частинок із лопатками барабана, а також у прилеглих шарах суміші, які зазнають впливу сил зсуву.

Для опису зон зсуву важливо враховувати розподіл швидкостей у суміші. Градієнт швидкості ∇v визначає зміну швидкості в просторі і може бути представлений як тензор, що містить часткові похідні компонент швидкості

$$\nabla v = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & \frac{\partial v_x}{\partial y} & \frac{\partial v_x}{\partial z} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_z}{\partial x} & \frac{\partial v_z}{\partial y} & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

Зміна швидкості між сусідніми шарами суміші створює зони зсуву, інтенсивність яких визначається симетричною частиною тензора ∇v

$$D = \frac{1}{2}(\nabla v + (\nabla v)^T), \quad (2.41)$$

де D – тензор швидкостей зсуву.

Інтенсивність руху суміші вздовж лопатки у гравітаційному бетонозмішувачі визначається локальними обертальними рухами частинок у зонах зсуву, що характеризуються ротором швидкостей $\nabla \times v$. Цей показник відображає ступінь обертання потоку частинок навколо осі та динамічні властивості середовища [95]. Аналіз ротора швидкостей дає змогу оцінити ефективність утворення турбулентних структур у зоні взаємодії частинок із лопатками та рівномірність їх розподілу в об'ємі барабана

$$\nabla \times v = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \\ \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \\ \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

Ротор швидкості є векторним полем, кожна компонента якого визначається як різниця часткових похідних швидкостей у перпендикулярних напрямках. У циліндричній системі координат (r, ϕ, z) ротор швидкостей записується у вигляді

$$\nabla \times v = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_z}{\partial \phi} - \frac{\partial v_\phi}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} \\ \frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (rv_\phi) - \frac{\partial v_r}{\partial \phi} \right) \end{bmatrix}, \quad (2.43)$$

де v_r , v_ϕ , v_z – компоненти швидкості у радіальному, кутовому та вертикальному напрямках відповідно, м/с.

Для оцінки інтенсивності процесу використовується модуль ротора швидкостей

$$|\nabla \times v| = \sqrt{\left(\frac{1}{r} \left(\frac{\partial v_z}{\partial \phi} - \frac{\partial v_\phi}{\partial z} \right) \right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} (rv_\phi) - \frac{\partial v_r}{\partial \phi} \right) \right)^2}. \quad (2.44)$$

Цей параметр визначає загальну інтенсивність обертальних рухів у кожній точці простору. Максимальні значення модуля ротора зазвичай спостерігаються у пристінковому шарі поблизу лопаток, де створюються найбільші градієнти швидкостей.

Інтенсивність руху суміші вздовж лопатки оцінюється об'ємним інтегралом модуля ротора швидкостей, що враховує обертальні рухи частинок у робочому просторі барабана. Показник визначається як

$$I = \int_V |\nabla \times v| dV, \quad (2.45)$$

де V – об'єм суміші в барабані, м³.

У зонах зсуву ротор швидкостей пов'язаний із в'язкісними силами, які сприяють переносу енергії між шарами частинок. Для аналізу цього взаємозв'язку використовується співвідношення між ротором і втратами енергії, що визначається як

$$\varepsilon = \mu (\nabla \times v)^2, \quad (2.46)$$

де ε – інтенсивність дисипації енергії,

μ – динамічна в'язкість матеріалу.

Для турбулентного потоку профіль швидкостей стає нелінійним і характеризується більшими градієнтами швидкості. Це підвищує інтенсивність перемішування, але також може призводити до локального розшарування матеріалу через нерівномірність полів швидкостей.

У зоні дії лопатки сили зсуву сприяють руйнуванню скупчень частинок, оскільки їх величина перевищує сили когезії, що утримують частинки разом. Для оцінки цієї взаємодії може бути використаний критерій Балла–Бертонна, який визначає критичну швидкість зсуву $\dot{\gamma}$, необхідну для руйнування скупчень частинок

$$\dot{\gamma} = \frac{\sigma}{\eta}, \quad (2.47)$$

де σ – когезійна сила між частинками, Н;

η – в'язкість середовища, Па·с.

Інтенсивність руху суміші вздовж лопатки визначає рівномірність розподілу частинок та якість кінцевого продукту. Під час цього процесу частинки суміші зазнають дії сил зсуву, інерції та тертя, що змінюють їх траєкторію і забезпечують рівномірний розподіл компонентів у барабані. За недостатньої інтенсивності руху вздовж лопатки частинки можуть залишатися у локальних зонах із низькою турбулентністю, що знижує якість суміші.

Рівномірність розподілу частинок у суміші оцінюється за допомогою коефіцієнта однорідності C_u , який визначається як відношення середньоквадратичного відхилення концентрації компонентів до середньої концентрації в суміші

$$C_u = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2}}{\bar{C}}, \quad (2.48)$$

де C_i – концентрація компонента в i -й точці, %;

\bar{C} – середня концентрація, %;

N – кількість точок вимірювання.

Якість кінцевої суміші залежить від однорідності розподілу частинок, яка забезпечує стабільні механічні та фізичні властивості продукту. У бетонних

сумішах рівномірний розподіл цементу, піску та води формує однорідну міцність і тріщиностійкість готового матеріалу. Важливим параметром є водоцементне співвідношення, яке визначає щільність структури та довговічність бетону. Нерівномірність розподілу компонентів або відхилення від оптимального В/Ц може призвести до утворення зон із надлишковим чи недостатнім вмістом цементу, що негативно впливає на експлуатаційні характеристики [96].

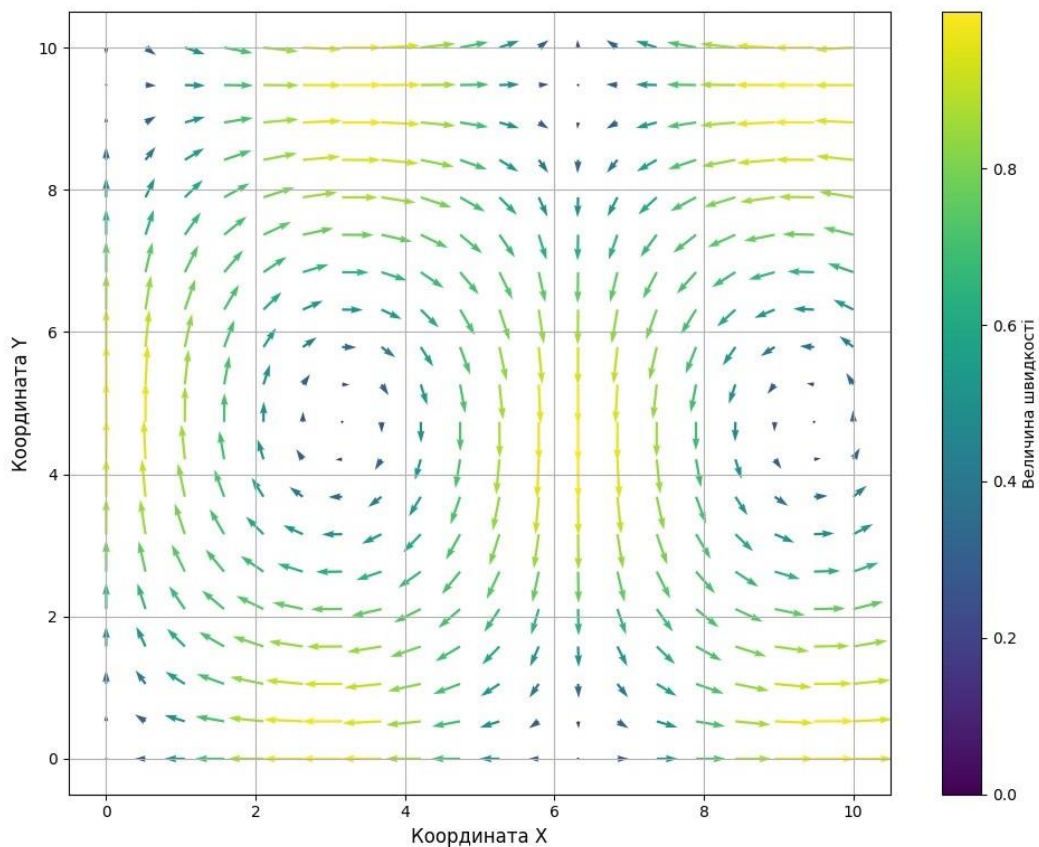


Рисунок 2.9 – Проекція поля швидкостей частинок на площину $xу$

На рисунку 2.9 наведено проекцію поля швидкостей частинок суміші на площину $xу$. Векторне поле відображає напрямки та величини швидкостей у різних точках робочої поверхні лопатки. Видно, що поблизу лопатки формуються області з підвищеними градієнтами швидкостей, які відповідають зонам зсуву та інтенсивної взаємодії частинок. Саме ці локальні області забезпечують руйнування скупчень та рівномірний розподіл компонентів у суміші.

У центральній частині поля швидкостей спостерігається більш плавний рух частинок, тоді як у пристінковому шарі поблизу лопатки швидкість знижується через вплив тертя. Така картина підтверджує описані у підрозділі закономірності: поєднання обертального руху, гравітаційної складової та впливу нахилу лопатки формує гвинтоподібні траєкторії частинок і створює умови для ефективного перемішування.

Проведений аналіз руху суміші вздовж лопатки барабана показав, що кінематика частинок у гравітаційному бетонозмішувачі визначається поєднанням обертального руху, гравітаційної складової та впливу геометрії лопатки. Розглянуті рівняння дозволяють описати траєкторії частинок у циліндричній системі координат, враховуючи умови відриву від поверхні, баланс сил інерції та тяжіння, а також вплив кута нахилу β . Оптимальні значення параметрів забезпечують рівномірний розподіл частинок у барабані та мінімальний час змішування.

Дослідження показало, що ефективність процесу значною мірою залежить від профілю швидкостей у пристінковому шарі та зон зсуву, де формуються локальні області інтенсивної взаємодії частинок. Векторні поля швидкостей і криві руху підтверджують, що збільшення кута нахилу лопатки прискорює переміщення частинок, проте надмірні значення можуть знижувати рівномірність змішування.

2.2.2.2 Дослідження руху бетонної суміші вздовж барабана змішувача

Ефективність перемішування визначається траєкторіями руху частинок, рівномірністю розподілу компонентів, динамічними властивостями суміші та конструктивними параметрами обладнання. Траєкторію окремої частинки при цьому можна подати у вигляді рівняння

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \int_0^t \vec{v}(t) dt, \quad (2.49)$$

де \vec{r}_0 – початкове положення частинки, м;

$\vec{v}(t)$ – її швидкість у момент часу, м/с.

Швидкість $\vec{v}(t)$ є похідною від радіус-вектора

$$\vec{v}(t) = \frac{d\vec{r}(t)}{dt}. \quad (2.50)$$

Швидкість частинки у барабані визначається сумарним впливом гравітації, відцентрових сил, тертя та осциляційного руху барабана. Загальний вираз швидкості має форму

$$\vec{v}(t) = \vec{v}_{\text{грав}}(t) + \vec{v}_{\text{відц}}(t) + \vec{v}_{\text{осц}}(t) + \vec{v}_{\text{тер}}(t). \quad (2.51)$$

Гравітаційна складова швидкості враховує вертикальний рух частинки під дією сили тяжіння. Якщо початкова швидкість частинки у вертикальному напрямку дорівнює нулю, то її швидкість визначається рівнянням

$$\vec{v}_{\text{грав}}(t) = \int \vec{g} dt = \vec{g}t. \quad (2.52)$$

Відцентрова складова виникає через обертання барабана навколо своєї осі. Для частинки, розташованої на відстані R від осі обертання, відцентрова сила задається виразом [97]

$$\vec{F}_{\text{відцентрова}} = m\omega^2 R \cos \theta \vec{e}_r, \quad (2.53)$$

де θ – кут нахилу барабана, рад;

\vec{e}_r – одиничний радіальний вектор.

Відповідна швидкість визначається інтегруванням рівняння руху

$$\vec{v}_{\text{відц}}(t) = \int \frac{\vec{F}_{\text{відц}}}{m} dt = \omega^2 R t \vec{e}_r. \quad (2.54)$$

Тертя між частинками та внутрішньою поверхнею барабана враховується через силу тертя, яка пропорційна нормальній силі

$$\vec{F}_{\text{тер}} = -\mu N \vec{v}_{\text{відносна}}, \quad (2.55)$$

де μ – коефіцієнт тертя;

N – нормальна сила, Н;

$\vec{v}_{\text{відносна}}$ – відносна швидкість частинки, м/с. Внесок цієї сили в загальну швидкість визначається рівнянням

$$\vec{v}_{мер}(t) = \int \frac{\vec{F}_{мер}}{m} dt. \quad (2.56)$$

Результуюча траєкторія частинки у просторі обчислюється інтегруванням усіх складових

$$\vec{r}(t) = \int_0^t (\vec{v}_{прав}(\tau) + \vec{v}_{відц}(\tau) + \vec{v}_{осц}(\tau) + \vec{v}_{мер}(\tau)) d\tau. \quad (2.57)$$

Кінематичний аналіз дозволяє визначити середній час перебування частинки у зоні змішування, який розраховується за формулою

$$t_{зм} = \frac{L}{\bar{v}}, \quad (2.58)$$

де L – середня довжина траєкторії частинки за один цикл змішування, м;
 \bar{v} – середня швидкість частинки, м/с.

Для оцінки \bar{v} використовується інтегрування поля швидкостей

$$\bar{v} = \frac{1}{V} \int_V \|\vec{v}(x, y, z)\| dV, \quad (2.59)$$

де V – об'єм барабана, м³.

Аналіз активних і пасивних зон у робочому просторі барабана бетонозмішувача дає змогу оптимізувати його конструкцію, зменшити енергетичні витрати та підвищити якість кінцевої суміші. Активні зони характеризуються інтенсивним переміщенням частинок та їх взаємодією між собою і з лопатками барабана. Пасивні зони, навпаки, відзначаються низькою інтенсивністю руху або стаціонарністю частинок, що формує «мертві зони» та знижує ефективність процесу перемішування.

Головним критерієм для визначення активних і пасивних зон є швидкість частинок у робочому просторі барабана. Розподіл швидкостей описується полем $\vec{v}(x, y, z)$. Для кількісної оцінки вводиться градієнт швидкості

$$\dot{\gamma} = \nabla \vec{v} = \left(\frac{\partial v_x}{\partial x}, \frac{\partial v_y}{\partial y}, \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \quad (2.60)$$

де v_x, v_y, v_z – компоненти швидкості у відповідних напрямках, м/с. Великі значення $\dot{\gamma}$ свідчать про активні зони, тоді як низькі – про пасивні.

Активні зони змішування формуються переважно поблизу лопаток барабана, де частинки зазнають зсувних деформацій через контакти з поверхнею. У цих зонах відбувається інтенсивна взаємодія між частинками, що сприяє рівномірному розподілу компонентів [98]. Для опису поведінки бетонної суміші застосовується модель Бінгама

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma}, \quad (2.61)$$

де τ – зсувна напруга, Па;

τ_0 – гранична напруга зсуву, Па;

μ – динамічна в'язкість, Па·с;

$\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву 1/с.

Динамічна в'язкість бетонної суміші залежить від концентрації твердих частинок у рідкій фазі. Для якісного опису цього явища може бути використане рівняння Ейнштейна для суспензій, яке адекватно відображає тенденцію зростання в'язкості зі збільшенням концентрації, хоча для концентрованих систем, таких як бетон, воно має наближений характер

$$\mu_{ef} = \mu_0(1 + 2,5\phi), \quad (2.62)$$

де μ_{ef} – ефективна в'язкість суміші, Па·с;

μ_0 – в'язкість рідкої фази, Па·с;

ϕ – об'ємна концентрація твердих частинок.

Пасивні зони найчастіше розташовуються в центральній частині барабана, подалі від лопаток, а також у верхній частині, де частинки перебувають у стані близькому до статичного. У таких зонах градієнт швидкості та зсувна напруга є мінімальними [99]. Вплив гравітації та тертя на рух частинок у цих областях можна описати рівнянням

$$\vec{F}_{grav} + \vec{F}_{тер} = 0. \quad (2.63)$$

Одним із способів інтенсифікації активних зон у бетонозмішувачі є періодична зміна кута нахилу барабана, що розглядається як удосконалений підхід до організації руху суміші вздовж усього барабана. Осциляційний компонент руху сприяє переміщенню частинок із пасивних зон у активні та формує додатковий горизонтальний рух, забезпечуючи рівномірний розподіл

суміші. Динаміка руху частинок у цьому випадку ускладнюється, але водночас забезпечує більш ефективне перемішування та підвищення однорідності суміші.

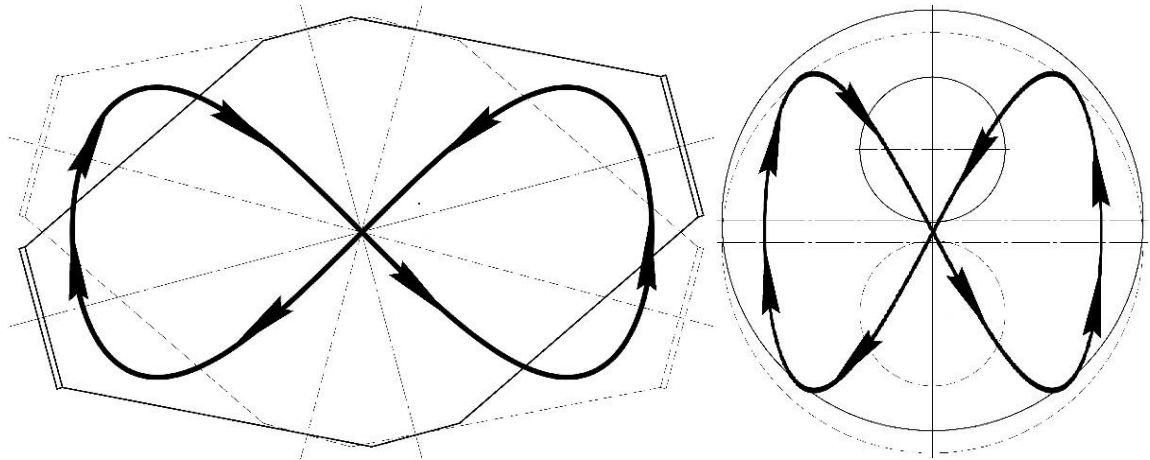


Рисунок 2.10 – Траєкторія руху суміші у змішувальному барабані під час дії запропонованого способу змішування

Осциляційний режим роботи барабана визначається кутом його нахилу $\theta(t)$, що змінюється за гармонійним законом

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega_{\text{осц}} t), \quad (2.64)$$

де θ_0 – максимальний кут нахилу, рад;

$\omega_{\text{осц}}$ – частота осциляцій, хв^{-1} .

Зміна кута нахилу призводить до появи додаткової складової швидкості в горизонтальній площині, яка описується рівнянням

$$v_{\text{осц},x}(t) = R\omega_{\text{осц}} \cos(\omega_{\text{осц}} t), \quad (2.65)$$

де R – радіус барабана, м.

При малих значеннях кута нахилу суміш переміщується повільно, що збільшує час досягнення однорідності. Зі зростанням кута нахилу до оптимального діапазону час змішування скорочується завдяки інтенсифікації руху частинок та зменшенню пасивних зон. Подальше збільшення кута понад оптимальні значення може призводити до надмірного скочування частинок, що не забезпечує додаткового покращення якості процесу. Залежність часу змішування від кута нахилу барабана наведено на рисунку 2.11.

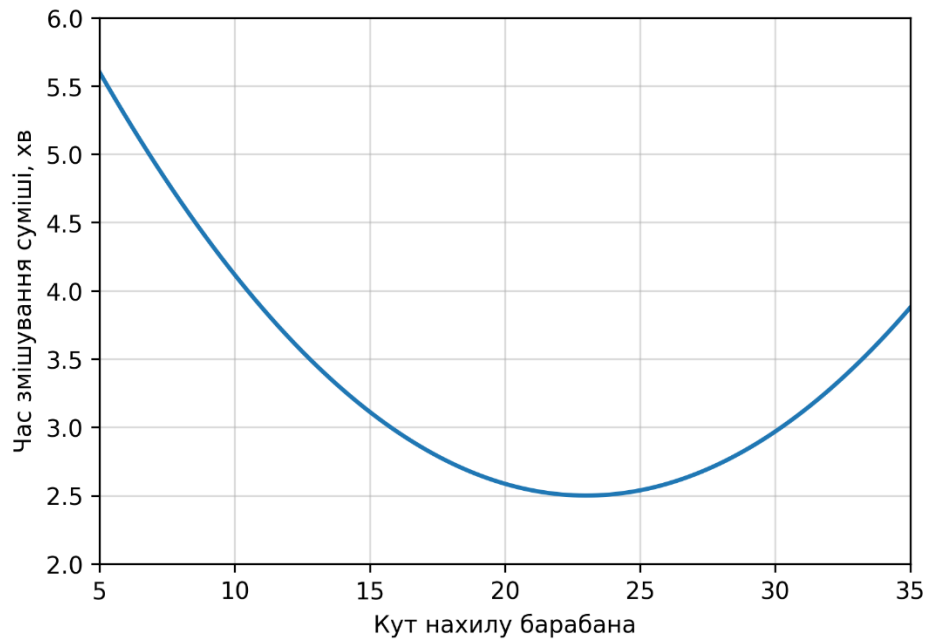


Рисунок 2.11 – Залежність часу змішування суміші від кута нахилу барабана

Загальний рух частинки в горизонтальній площині (xy) з урахуванням осциляцій описується рівняннями

$$x(t) = R \sin(\theta(t)) \cos(\omega t), \quad y(t) = R \sin(\theta(t)) \sin(\omega t). \quad (2.66)$$

Вертикальний рух частинок z визначається сумарним впливом гравітації та осциляційних коливань барабана, тому відповідна швидкість описується рівнянням

$$v_{\text{осц},z}(t) = -gt + \omega_{\text{осц}} R \sin(\omega_{\text{осц}} t). \quad (2.67)$$

Сили, які виникають під час осциляційного руху, можна розділити на кілька компонентів. У горизонтальній площині ці сили описуються рівняннями

$$F_x = mR \frac{d^2 \sin(\theta(t))}{dt^2}, \quad F_y = mR \frac{d^2 \cos(\theta(t))}{dt^2}. \quad (2.68)$$

У вертикальному напрямку z основним фактором залишається сила тяжіння, доповнена відцентровими силами

$$F_z = -mg + m\omega^2 R \sin(\theta(t)). \quad (2.69)$$

Для оцінки ефективності осциляцій вводиться коефіцієнт інтенсифікації змішування κ , який визначає, наскільки осциляції покращують рух частинок порівняно з відсутністю осциляцій:

$$\kappa = \frac{v_{осц}}{v_{без осц}}, \quad (2.70)$$

$$\kappa = \frac{\int_V \|\vec{v}_{осц}(x, y, z)\| dV}{\int_V \|\vec{v}(x, y, z)\| dV}. \quad (2.71)$$

де $\vec{v}_{осц}$ – швидкість частинок з урахуванням осциляцій, м/с;

\vec{v} – швидкість частинок без осциляцій, м/с.

Значення коефіцієнта інтенсифікації $\kappa > 1$ свідчить про підвищення ефективності процесу перемішування завдяки осциляційному руху барабана. Згідно з графічною залежністю 2.12, зі збільшенням частоти осциляцій до 8–16 хв^{-1} та амплітуди зміни кута нахилу барабана до 25–40° значення коефіцієнта інтенсифікації κ зростає до 1,4–1,5, що свідчить про суттєве підвищення інтенсивності перемішування бетонної суміші.

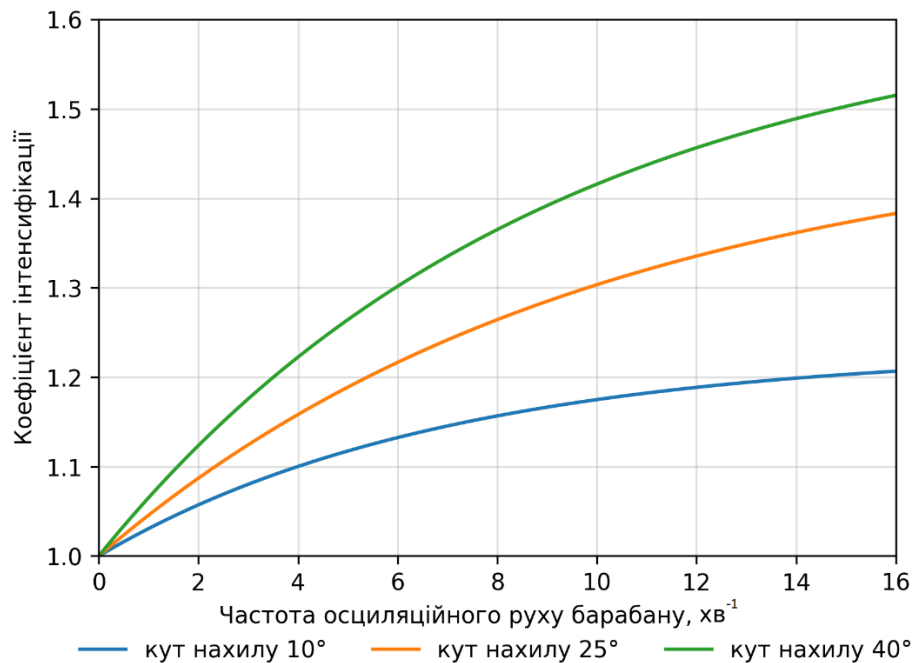


Рисунок 2.12 – Залежність коефіцієнта інтенсифікації змішування від частоти осциляційного руху барабана

Динаміка осциляційного руху також впливає на траєкторії частинок, які під час переміщення перетинають різні шари суміші, що сприяє більш ефективному розподілу компонентів суміші у просторі. Для опису таких траєкторій у тривимірному просторі (x, y, z) використовують рівняння

$$\vec{r}(t) = (R \sin(\theta(t)) \cos(\omega t), R \sin(\theta(t)) \sin(\omega t), z_0 + v_{\text{осц},z}(t)t), \quad (2.72)$$

де z_0 – початкова висота частинки, м.

Під час зміни кута нахилу виникають додаткові сили, які активують частинки, що раніше перебували у статичних зонах. Ці сили описуються як сума відцентрової, гравітаційної та осциляційної складових

$$\vec{F}_{\text{осц}} = m\omega_{\text{осц}}^2 R \sin(\omega_{\text{осц}} t) \vec{e}_\theta, \quad (2.73)$$

$$\vec{F}_{\text{осц}} = mR \frac{d^2 \sin(\theta(t))}{dt^2} \vec{e}_x + mR \frac{d^2 \cos(\theta(t))}{dt^2} \vec{e}_y. \quad (2.74)$$

Основним математичним інструментом для опису тривимірної динаміки є рівняння руху частинок, яке базується на другому законі Ньютона

$$m \frac{d^2 \vec{r}(t)}{dt^2} = \vec{F}_{\text{зовн}}, \quad (2.75)$$

де $\vec{r}(t)$ – радіус-вектор положення частинки, м;

$\vec{F}_{\text{зовн}}$ – сумарна зовнішня сила, що діє на частинку, Н.

Ця сила є сумою гравітаційної, відцентрової, тертя та осциляційної складових

$$\vec{F}_{\text{зовн}} = \vec{F}_{\text{грав}} + \vec{F}_{\text{відц}} + \vec{F}_{\text{тер}} + \vec{F}_{\text{осц}}. \quad (2.76)$$

Гравітаційна складова описується як

$$\vec{F}_{\text{гравітації}} = -mg \vec{e}_z, \quad (2.77)$$

де $\vec{g} = (0, 0, -g)$ – прискорення вільного падіння,

\vec{e}_z – одиничний вектор у напрямку осі z .

Траєкторія руху частинки визначається інтегруванням рівняння руху для кожної координати x, y, z

$$x(t) = x_0 + \int_0^t v_x(\tau) d\tau, \quad y(t) = y_0 + \int_0^t v_y(\tau) d\tau, \quad z(t) = z_0 + \int_0^t v_z(\tau) d\tau, \quad (2.78)$$

де v_x, v_y, v_z – швидкості частинки у відповідних напрямках, які є результатом дії всіх сил, м/с.

Вертикальний рух частинок визначається гравітаційною силою та опором середовища

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -mg + \mu \frac{dz}{dt}. \quad (2.79)$$

Для рівноважного стану вертикальна швидкість визначається як

$$v_z = \frac{mg}{\mu}. \quad (2.80)$$

Для опису руху суміші у барабані формулюється повна система рівнянь. Кожна частинка описується вектором положення $\vec{r}(t) = (x(t), y(t), z(t))$, який задовольняє рівняння

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -m\omega^2 R \cos(\omega t) + mR \frac{d^2 \sin(\theta(t))}{dt^2}, \quad (2.81)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = m\omega^2 R \sin(\omega t) + mR \frac{d^2 \cos(\theta(t))}{dt^2}, \quad (2.82)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -mg - \mu \frac{dz}{dt}. \quad (2.83)$$

Для меж барабана формулюються граничні умови, які забезпечують утримання частинок у його внутрішньому просторі, що формально описується обмеженням радіус-вектора

$$x^2 + y^2 \leq R^2. \quad (2.84)$$

Крім того, рух частинок обмежується геометрією лопаток, що враховується через локальні граничні умови.

У процесі змішування важливим є розподіл швидкостей у робочому об'ємі барабана. Для моделювання швидкісного поля застосовують рівняння дифузії

$$\frac{\partial v}{\partial t} = D \nabla^2 v, \quad (2.85)$$

де c – концентрація компонентів у точці (x, y, z) , кг/м³;

D – коефіцієнт дифузії, що залежить від в'язкості суміші, розміру частинок і швидкості перемішування, $\text{м}^2/\text{с}$;

∇^2 – оператор Лапласа, який визначає просторову зміну концентрації, $1/\text{м}^2$.

Граничні умови для рівняння дифузії встановлюються на межах робочого об'єму барабана. Частинки повинні залишатися всередині барабана, тому концентрація на поверхнях барабана може вважатися постійною

$$c|_{\text{поверхня}} = c_0, \quad (2.86)$$

де c_0 – середнє значення концентрації, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для аналізу однорідності суміші у різних зонах барабана вводиться коефіцієнт варіації концентрації

$$\eta_{\text{рівн}} = 1 - \frac{\sigma}{c_0}, \quad (2.87)$$

де σ – стандартне відхилення концентрації компонентів у вибірці.

$$\eta = 1 - \frac{\int_V (c - c_0)^2 dV}{c_0^2 V}. \quad (2.88)$$

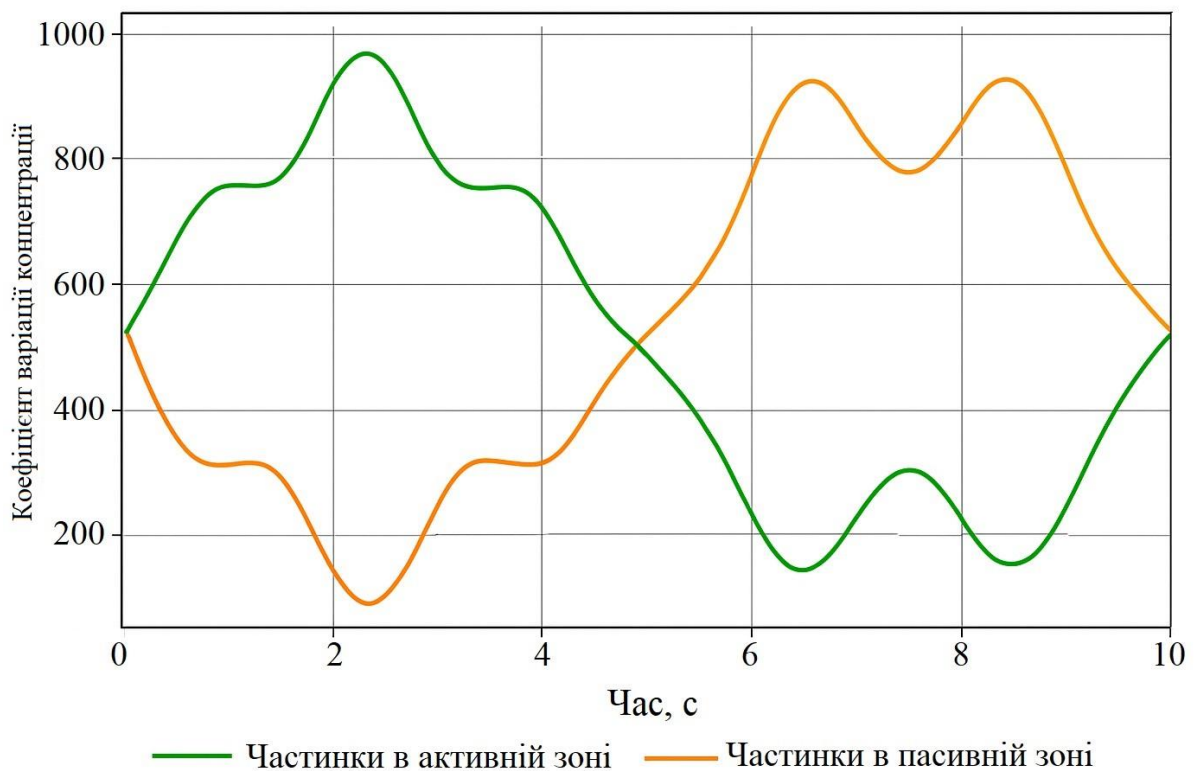


Рисунок 2.13 – Розподіл по активній і пасивній фазі

На рисунку 2.13 показано зміну коефіцієнта варіації концентрації частинок у часі для активних та пасивних зон барабана. Спостерігається, що зростання коефіцієнта в активній зоні супроводжується його зменшенням у пасивній, що відображає періодичний обмін між зонами. Загальний рівень концентрації залишається сталим, при цьому коефіцієнт варіації в активній зоні коливається в межах 600-800, а в пасивній – 200-400. Характерний період коливань становить близько 5 секунд, що узгоджується з рівнянням дифузії (2.86) та граничними умовами (2.87), які описують перерозподіл компонентів у робочому об'ємі барабана. Така динаміка сприяє інтенсифікації процесу змішування, запобігає утворенню «мертвих зон» та забезпечує більш рівномірний розподіл компонентів у суміші.

Поле концентрацій змінюється під впливом руху частинок, який визначається відцентровими силами, осциляціями та гравітацією. Траєкторія частинки $(x(t), y(t), z(t))$ впливає на локальну зміну концентрації в окремих точках [100]. У тривимірному просторі поле концентрацій моделюється рівнянням

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla c = D \nabla^2 c, \quad (2.89)$$

де \vec{v} – швидкість потоку, яка залежить від геометрії барабана, частоти обертання та фізико-механічних властивостей суміші, м/с.

Для практичного аналізу поля концентрацій у барабані можна розділити об'єм на комірки $(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$ та визначити середню концентрацію в кожній комірці

$$c_{\text{ком}} = \frac{1}{V_{\text{ком}}} \int_{\text{ком}} c(x, y, z) dV, \quad (2.90)$$

де $V_{\text{ком}}$ – об'єм комірки, м³.

Середня швидкість частинки у барабані під час дії відцентровим і осциляційним силам, що дозволяє забезпечити багатошарове перемішування, визначається як

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt, \quad (2.91)$$

де T – період обертання барабана, с;

$v(t)$ – миттєва швидкість частинки, м/с.

Для опису локального руху частинки в зоні контакту з лопаткою враховується її відносна швидкість $v_{лок}$

$$v_{лок} = \omega R \cos \beta. \quad (2.92)$$

У цій зоні інтенсивне перемішування забезпечується зсувними деформаціями, які характеризуються градієнтом швидкості

$$\dot{\gamma} = \frac{\partial v_{лок}}{\partial z}. \quad (2.93)$$

Для оцінки ефективності інтенсифікації змішування вводиться показник об'ємної ефективності $\eta_{об'єм}$, який визначає частку об'єму барабана, задіяного у процесі активного змішування

$$\eta_{об'єм} = \frac{V_{зміш}}{V_{барабан}}, \quad (2.94)$$

де $V_{зміш}$ – об'єм активної зони змішування, м³;

$V_{барабан}$ – загальний об'єм барабана, м³.

Для осциляційного руху $\eta_{об'єм}$ зростає на 15–20% порівняно з традиційними методами змішування.

Турбулентний потік, викликаний осциляціями, значно покращує перемішування, оскільки створює додаткові точки контакту між частинками. Для оцінки турбулентності використовується число Рейнольдса [100], яке характеризує відношення інерційних сил до в'язких, можна розрахувати як

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu}, \quad (2.95)$$

де ρ – густина суміші, кг/м³;

v – середня швидкість частинок, м/с;

L – характерний розмір барабана, м.

Лопатки, розташовані під кутом до радіального напрямку, сприяють додатковим зсувним деформаціям у суміші, що описуються градієнтом швидкості

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta v}{\Delta h}, \quad (2.96)$$

де Δv – різниця швидкостей частинок у шарах, м/с;

Δh – відстань між шарами, м.

Для опису течії суміші у барабані використовують рівняння Нав'є-Стокса з урахуванням реологічних властивостей

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho \vec{g}, \quad (2.97)$$

де p – тиск, Па;

τ – тензор в'язких напружень, Па.

Рухливість суміші визначає її здатність переміщуватися під дією зовнішніх сил. Для оцінки рухливості використовується критерій

$$M = \frac{1}{\tau_0 + \mu \dot{\gamma}}, \quad (2.98)$$

де M – показник рухливості.

Залежно від співвідношення компонентів середня густина ρ може бути розрахована як

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i V_i}{\sum_{i=1}^n V_i}, \quad (2.99)$$

де ρ_i – густина i -го компонента, кг/м³;

V_i – об'єм i -го компонента, м³.

Узагальнена математична модель описує динаміку руху частинки у барабані з урахуванням її траєкторії, швидкісних характеристик та впливу зовнішніх сил. Кінематичний аналіз при цьому повинен враховувати не лише гравітаційну та відцентрову складові, але й ефекти тертя та взаємодії між частинками. Оскільки процес змішування має багатофакторний характер, застосування рівнянь Лагранжа забезпечує формалізацію моделі та дає змогу отримати кількісні параметри руху частинок у змішувачі. Для комплексного

опису їхньої поведінки у робочому просторі використовується наступне рівняння

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}_{\text{грав}} + \vec{F}_{\text{відц}} + \vec{F}_{\text{осц}} + \vec{F}_{\text{тер}} + \nabla p + D \nabla^2 c, \quad (2.100)$$

Рівняння (2.100) узагальнює динаміку руху частинок у змішувальному просторі з урахуванням усіх зовнішніх сил, що діють на систему. Підставлення відповідних складових у вихідне рівняння забезпечує отримання розширеної форми, яка відображає кінематичні та динамічні характеристики процесу змішування з більшою точністю.

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -mg \vec{e}_z + m\omega^2 R \cos \theta \vec{e}_r - \mu N \vec{v}_{\text{відносна}} + \\ + mR \frac{d^2 \sin(\theta(t))}{dt^2} \vec{e}_x + mR \frac{d^2 \cos(\theta(t))}{dt^2} \vec{e}_y + \nabla p + D \nabla^2 c. \quad (2.101)$$

Для кількісного аналізу впливу окремих силових складових на рух частинок було проведено розрахунок їхніх значень у вибрані моменти часу. Отримані дані подано у таблиці 2.1, що слугує основою для подальшого побудування графічних залежностей.

Таблиця 2.1 – Розрахункові дані для побудови графічних залежностей

Час, с	F _{тер} , Н	F _{осц} , Н	F _{відцентр} , Н	F _{грав} , Н	F _{заг} , Н
1	701,40	1119,94	839,08	1144,26	3804,68
2	539,28	1014,47	684,42	1144,26	3382,43
3	777,41	794,53	1461,92	1144,26	4178,12
4	642,59	680,06	1021,50	1144,26	3488,42
5	572,57	785,53	581,09	1144,26	3083,46
6	794,70	1005,47	1358,58	1144,26	4303,02
7	587,73	1119,94	1203,93	1144,26	4055,86
8	623,69	1014,47	544,80	1144,26	3327,22
9	785,82	794,53	1203,93	1144,26	3928,54
10	547,69	680,06	1358,58	1144,26	3730,59

Динаміка руху частинок у змішувальному просторі формується під дією сукупності факторів, до яких належать маса частинки, конструктивні параметри барабана та характеристики осциляційного руху. Узагальнений вплив цих

чинників відображається у рівнянні (2.101), що дозволяє визначити результуючу траєкторію частинок у середовищі [101].

Осциляційні параметри мають визначальний вплив на формування динаміки через амплітуду та частоту коливань, що створюють періодичні варіації руху, що сприяють зменшенню пасивних зон і забезпечують більш рівномірний розподіл частинок у барабані. Взаємодія цих параметрів із відцентровими та гравітаційними силами визначає інтенсивність процесу перемішування.

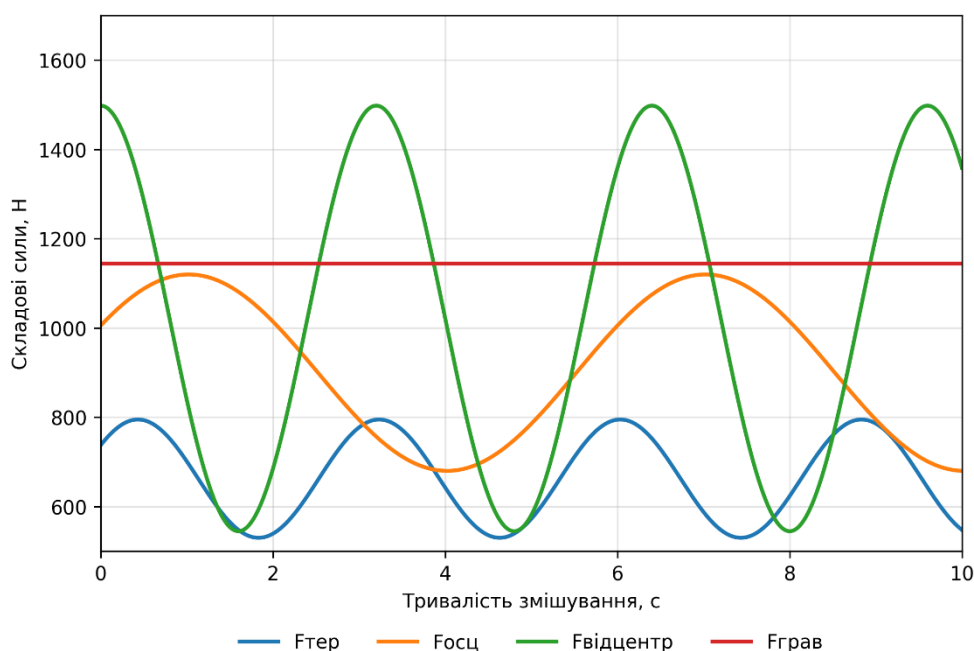


Рисунок 2.14 – Залежність впливу сил від часу у змішувальному барабані

Аналіз окремих складових (рисунок 2.14) показує, що жодна з розглянутих сил не діє самотійно, а їхній сумарний ефект визначає характер руху частинок у барабані. Відцентрова, осциляційна, гравітаційна сили та сили тертя мають різну амплітуду й фазу коливань, що зумовлює змінність навантаження у часі. Такий розподіл окремих складових створює передумови для формування інтегральної сили, яка визначає загальну динаміку процесу змішування.

На рисунку 2.15 наведено графічну залежність загальної сили від часу, яка відображає інтегральну дію всіх силових складових. Отримана крива демонструє

змінний характер навантаження, що виникає внаслідок поєднання відцентрової, осциляційної, гравітаційної сил та сил тертя. Така залежність дозволяє оцінити загальну картину процесу змішування, визначити періодичність коливань та інтенсивність дії сил на частинки суміші.

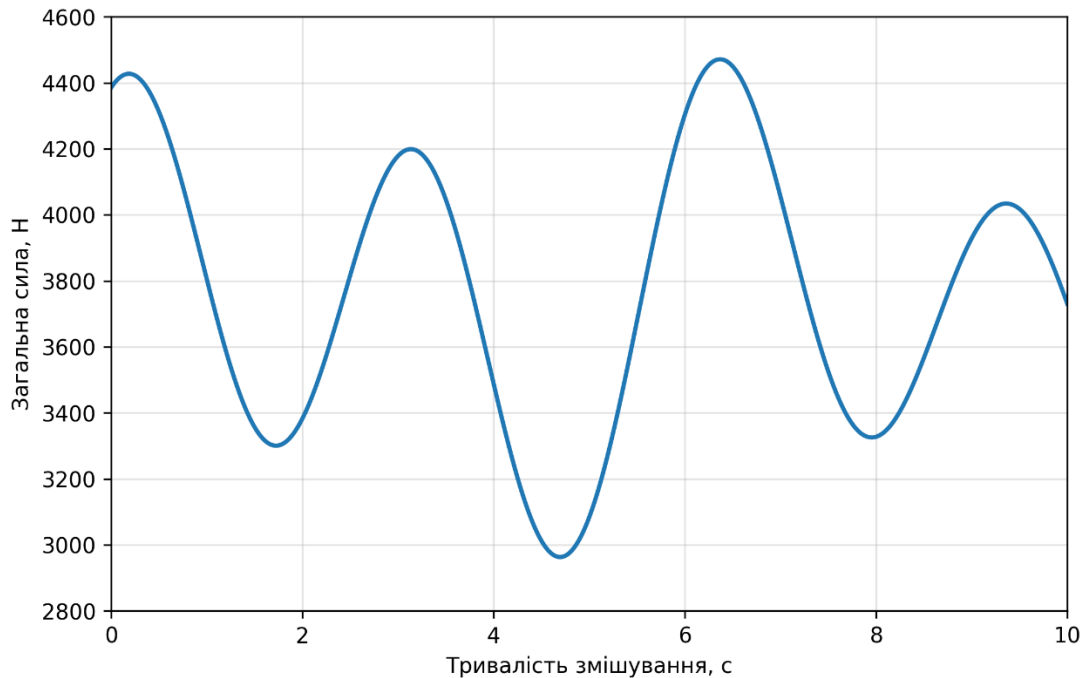


Рисунок 2.15 – Залежність загальної сили від часу у змішувальному барабані

На основі графічних залежностей та аналізу отриманих результатів були визначені раціональні параметри роботи змішувального барабана. Узагальнені рекомендовані значення наведено у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Рекомендовані значення за результатами графічного аналізу

№	Параметри	Визначення
1	Маса, m	275 кг
2	Радіус, R	0,5 м
3	Частота обертів, ω	30 об/хв
4	Амплітуда зміни кута нахилу, A	25°
5	Частота осциляцій, n	10 хв ⁻¹
6	Коефіцієнт тертя ковзання, μ	0,3

Наступним етапом дослідження є оцінка енергетичної складової процесу. Енерговитрати формуються як сукупна робота, необхідна для подолання гравітаційних, відцентрових, осциляційних та сил тертя. Оптимізація енерговитрат дозволяє досягти високої ефективності змішування за мінімального споживання енергії [102].

Загальна енерговитрата на процес змішування може бути представлена як сукупність окремих складових, кожна з яких відповідає певному фізичному механізму

$$E_{\text{заг}} = E_{\text{грав}} + E_{\text{тер}} + E_{\text{інерц}} + E_{\text{осц}}, \quad (2.102)$$

де $E_{\text{грав}}$ – енергія, витрачена на подолання сили тяжіння, Дж;

$E_{\text{тер}}$ – енергія на подолання тертя, Дж;

$E_{\text{інерц}}$ – енергія інерційних сил, Дж;

$E_{\text{осц}}$ – енергія осциляційного руху, Дж.

Сила тяжіння при переміщенні суміші у барабані виконує роботу, яка позначається як $E_{\text{грав}}$. Її величина залежить від маси суміші, висоти підйому частинок та кута нахилу барабана

$$E_{\text{грав}} = \int_0^T mgh(t) dt, \quad (2.103)$$

де $h(t)$ – висота підйому частинки в час t , м.

Для періодичної зміни кута нахилу $\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega_{\text{осц}} t)$ висота підйому визначається як

$$h(t) = R \sin(\theta(t)). \quad (2.104)$$

Для подолання сил тертя між частинками та поверхнею лопатки здійснюється робота, що визначається як $E_{\text{тер}}$. У випадку окремої частинки ця складова може бути розрахована за наступним співвідношенням

$$E_{\text{тер}} = \int_0^T \mu N v_{\text{відносна}} dt. \quad (2.105)$$

Нормальна сила для частинки враховує гравітацію та відцентрову складову

$$N = mg \cos \theta + m\omega^2 R \sin \theta. \quad (2.106)$$

При обертанні барабана виникають інерційні сили, на подолання яких витрачається $E_{\text{інерц}}$. Ця складова враховує зміну швидкості руху частинок і визначається за формулою

$$E_{\text{інерц}} = \int_0^T \frac{1}{2} I \omega^2 dt, \quad (2.107)$$

де I – момент інерції барабана, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Для осциляційного руху барабана момент інерції змінюється залежно від кута нахилу.

Підтримання осциляційного режиму барабана потребує додаткових витрат, які описуються величиною $E_{\text{осц}}$. Робота осциляційного руху виражається через зміну кута нахилу $\theta(t)$

$$E_{\text{осц}} = \int_0^T M_{\text{осц}} \frac{\partial \theta(t)}{\partial t} dt, \quad (2.108)$$

де $M_{\text{осц}}$ – момент сили, що забезпечує осциляції, Нм .

Для гармонійних осциляцій момент визначається як

$$M_{\text{осц}} = I \frac{\partial^2 \theta(t)}{\partial t^2}. \quad (2.109)$$

На рисунку 2.16 наведено часові залежності окремих складових енерговитрат, що формують загальну енергетичну характеристику процесу змішування в барабані з осциляційним рухом. Усі представлені залежності мають накопичувальний характер і відображають зміну витрат енергії впродовж робочого циклу. Гравітаційна складова енергії характеризується нерівномірним зростанням і досягає наприкінці досліджуваного інтервалу значення близько 2,0 кДж. Така поведінка обумовлена циклічним підніманням частинок суміші під час обертання барабана та подальшим їх переміщенням під дією сили тяжіння. Енергія, що витрачається на подолання сил тертя, демонструє найбільш інтенсивне зростання та досягає приблизно 3,5 кДж, що пояснюється безперервною взаємодією частинок між собою та з робочими поверхнями змішувального обладнання. Осциляційна складова енергії зростає нерівномірно і наприкінці процесу становить близько 2,8 кДж. Наявність характерних

перегинів кривої пояснюється періодичною зміною напрямку руху барабана та перерозподілом маси суміші в його робочому об'ємі. Інерційна складова швидко зростає на початковому етапі роботи та виходить на усталене значення близько 0,7 кДж, що відповідає завершенню процесу розгону системи до заданого режиму.

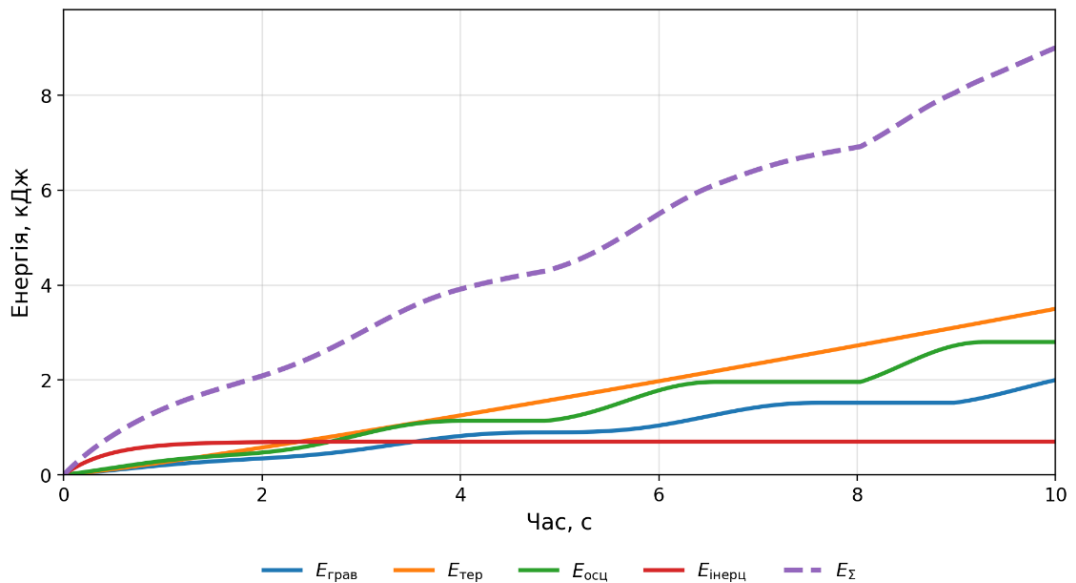


Рисунок 2.16 – Залежність енерговитрат від тривалості змішування бетонної суміші

Сумарна енергія процесу змішування має плавний нелінійний характер зростання і досягає наприкінці інтервалу близько 9 кДж. Отримана залежність свідчить про складну взаємодію окремих механізмів енергоспоживання, пов'язаних із підніманням суміші, подоланням сил тертя, осциляційним рухом та інерційними явищами. Для побудови залежностей використано такі параметри процесу: маса суміші 275 кг, радіус барабана 0,5 м, амплітуда зміни кута нахилу 25° , частота осциляцій 10 хв^{-1} та частота обертання барабана 30 об/хв. Отримані результати дають можливість оцінити структуру енерговитрат у процесі змішування та визначити складові, які найбільше впливають на загальну енергоємність роботи змішувача, що є важливим під час обґрунтування його раціональних конструктивних і кінематичних параметрів.

2.2.2.3 Аналіз розподілу частинок бетонної суміші в об'ємі барабана змішувача

Для дослідження характеру переміщення компонентів бетонної суміші в робочому об'ємі барабана виконано комп'ютерне моделювання процесу змішування. Отримані результати дали змогу проаналізувати розподіл швидкостей руху частинок суміші в різних зонах барабана та встановити вплив конструктивних параметрів і режимів роботи на інтенсивність перемішування. Моделювання здійснювалося із застосуванням методу кінцевих елементів, що дозволило отримати графічні залежності та виконати якісний аналіз процесу змішування [103].

Моделювання виконувалося за різних умов, що включають частоту осциляцій барабана, амплітуду зміни кута його нахилу та фізико-механічні властивості бетонної суміші. Граничні умови для комп'ютерного аналізу задавалися відповідно до параметрів роботи обладнання: частота осциляцій змінювалася від 2 до 14 хв^{-1} , а амплітуда кута нахилу барабана варіювалася в межах від 10° до 40° . Аналіз проводився як для найменш інтенсивних режимів роботи, так і для режимів із середніми та максимальними значеннями параметрів.

За результатами моделювання (рис. 2.17) були побудовані поля швидкостей для різних зон барабана, що відображають траєкторії руху часток суміші. Поля швидкостей дозволяють ідентифікувати зони «мертвих зон» та області з підвищеною активністю частинок. Для умов із мінімальною інтенсивністю осциляційного руху (амплітуда кута нахилу 10° , частота осциляцій 2 хв^{-1}) траєкторії часток демонструють значне зменшення активності, особливо у периферійних зонах барабана, де швидкість часток становить лише $0,2\text{--}1 \text{ м/с}$. Це свідчить про недостатню ефективність процесу змішування за таких параметрів.

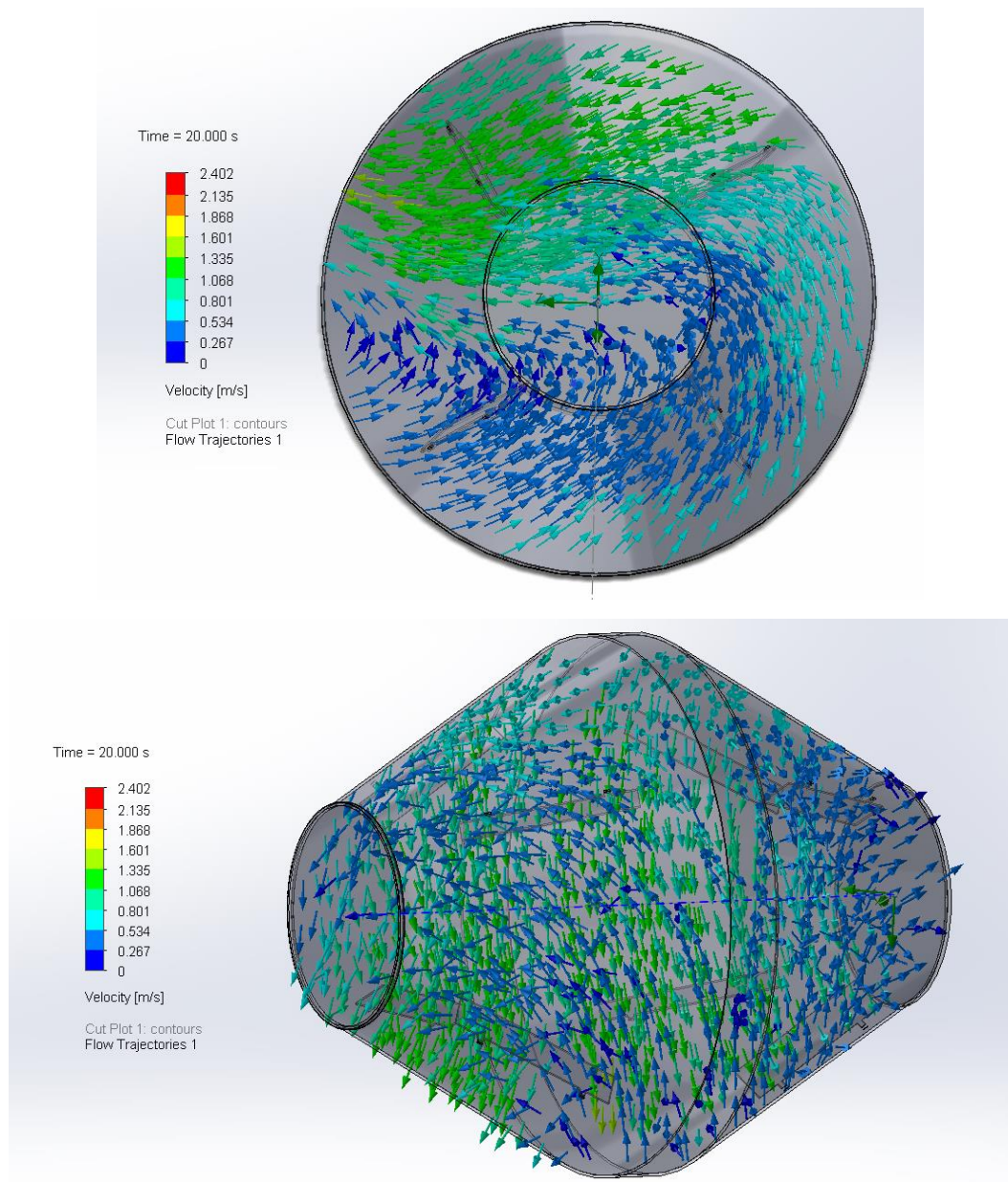


Рисунок 2.17 – Поля швидкостей та траєкторії руху часток бетонної суміші в барабані при частоті осциляцій 2 хв^{-1} та амплітуді кута нахилу 10°

Аналіз (рис. 2.18) за умов максимальної інтенсивності осциляційного руху (амплітуда кута нахилу 40° , частота осциляцій 14 хв^{-1}) показав значне збільшення активності часток по всьому об'єму барабана. Швидкість у найбільш активних зонах становить від 2 до 4 м/с, однак у деяких областях спостерігається надмірна концентрація траєкторій руху. Такий розподіл свідчить про високу інтенсивність перемішування, яка може супроводжуватися збільшенням енерговитрат процесу.

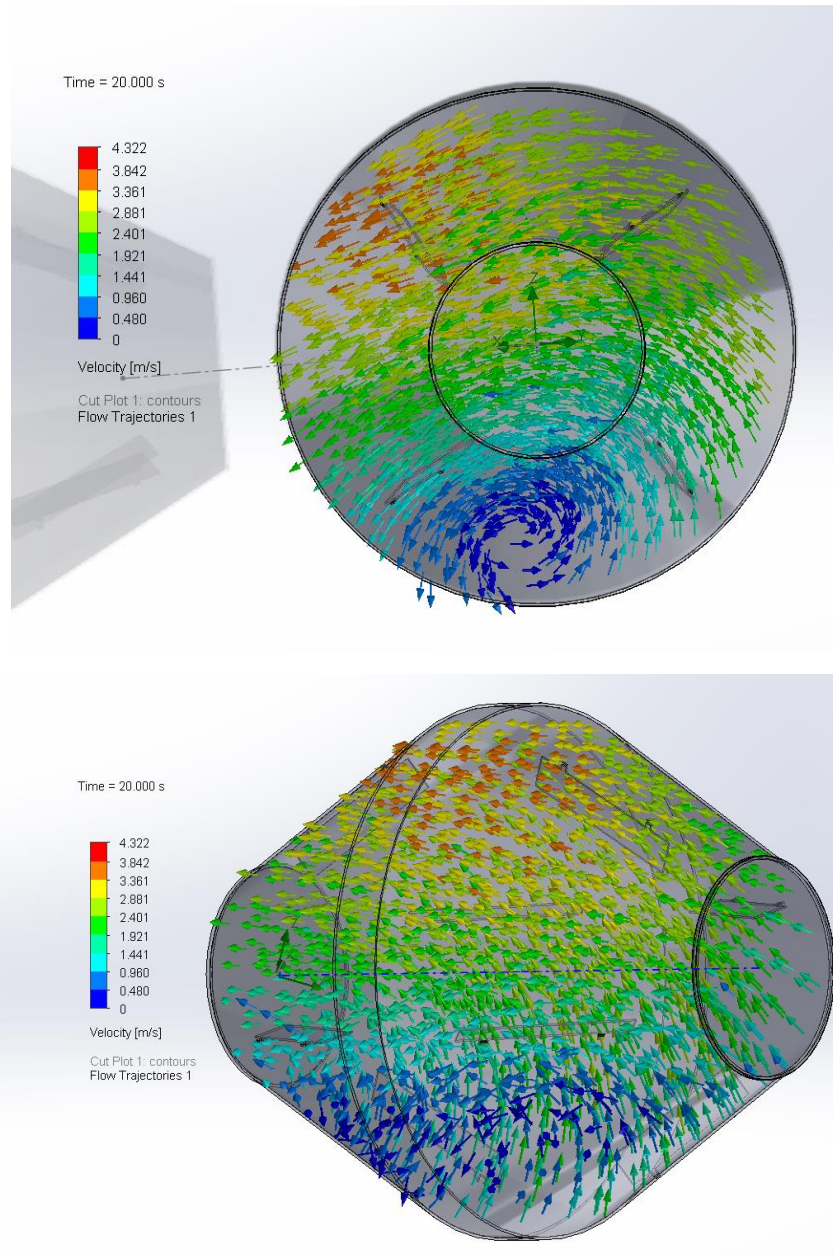


Рисунок 2.18 – Поля швидкостей та траєкторії руху часток бетонної суміші в барабані при частоті осциляцій 14 хв^{-1} та амплітуді кута нахилу 40°

Оптимальні результати (рис. 2.19) отримані за проміжних умов (амплітуда кута нахилу 25° , частота осциляцій 8 хв^{-1}). У цьому випадку графічні залежності показують рівномірний розподіл швидкостей у всьому об'ємі барабана, де траєкторії часток є складними кривими з частими змінами напрямку руху. Швидкість часток у цьому випадку змінюється в межах $1\text{--}3 \text{ м/с}$, що вказує на ефективне перемішування.

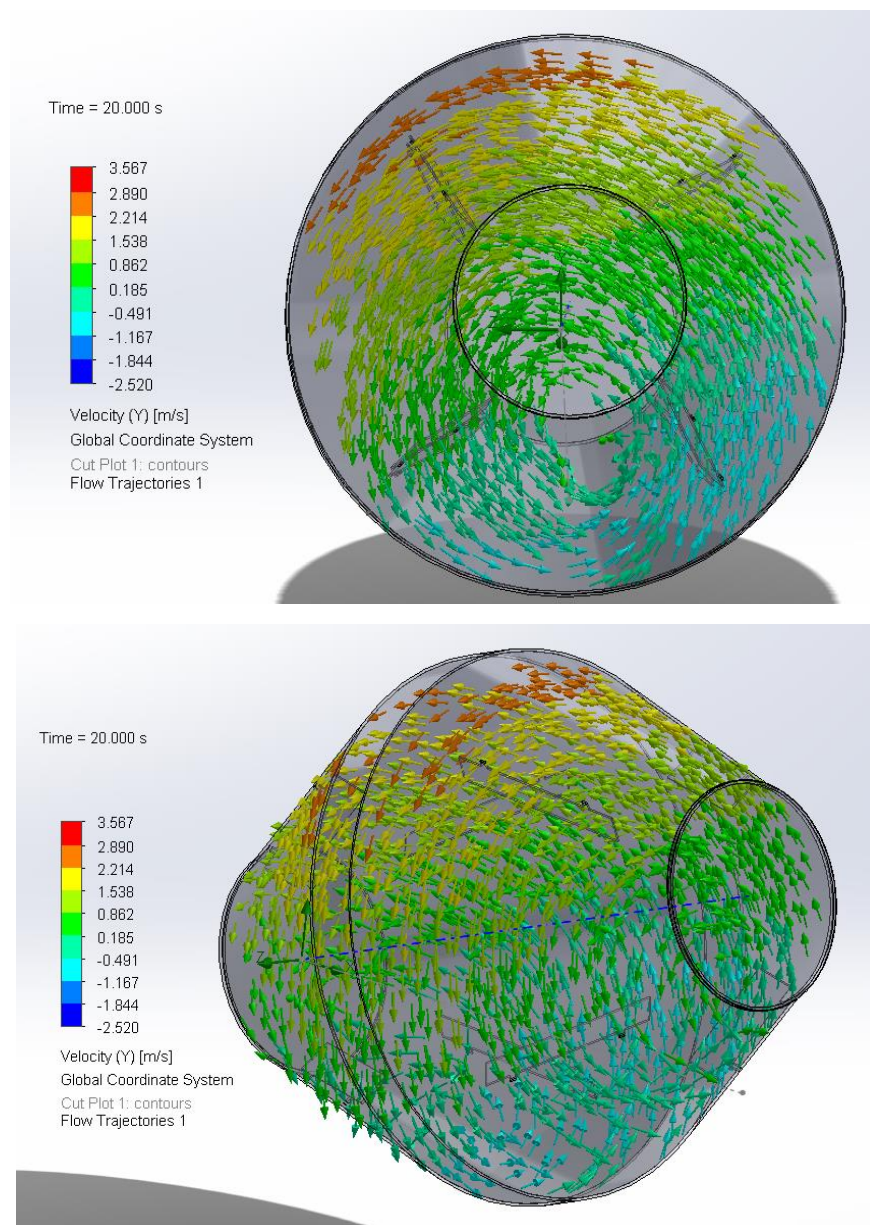


Рисунок 2.19 – Поля швидкостей та траєкторії руху часток бетонної суміші в барабані при частоті осциляцій 8 хв^{-1} та амплітуді кута нахилу 25°

Аналіз підтвердив, що осциляційний рух барабана сприяє виникненню додаткових полів збудженості, які руйнують «мертві зони». При оптимальних умовах роботи барабана ці поля забезпечують рівномірний рух часток по всьому об'єму, що є підтвердженням ефективності запропонованої конструкції.

Таким чином, результати комп'ютерного моделювання дозволяють визначити діапазон оптимальних параметрів роботи обладнання (частота осциляцій близько 8 хв^{-1} , амплітуда кута нахилу барабана близько 25°) та

підтверджують ефективність нового способу змішування для забезпечення рівномірного розподілу компонентів бетонної суміші.

2.3 Визначення основних показників роботи Бетонозмішувального обладнання

2.3.1 Визначення технічної продуктивності

Технічна продуктивність обладнання визначається на основі розрахункової продуктивності змішувача з урахуванням конструктивних особливостей барабана, режиму змішування та геометрії лопаток, що впливають на ефективність перемішування.

Продуктивність змішувача розраховується за формулою

$$P = \frac{V_{\text{зам}} \cdot k_{\text{нов}} \cdot k_{\text{лоп}} \cdot k_{\text{еф}}}{t_{\text{ц}}}, \quad (2.110)$$

де $V_{\text{зам}}$ – робочий об'єм змішувача, м³;

$k_{\text{нов}}$ – коефіцієнт, що враховує вплив нового способу змішування;

$k_{\text{лоп}}$ – коефіцієнт, що враховує вплив лопаток на ефективність перемішування;

$k_{\text{еф}}$ – коефіцієнт ефективності змішування, що враховує геометрію барабана та режим роботи;

$t_{\text{ц}}$ – тривалість робочого циклу, год.

Робочий об'єм змішувача $V_{\text{зам}}$ розраховується за геометричними параметрами барабана

$$V_{\text{зам}} = \pi R^2 H \cdot k_{\text{геом}}, \quad (2.111)$$

де H – висота робочого простору барабана, м;

$k_{\text{геом}}$ – коефіцієнт геометричної форми барабана.

Вплив осциляційного режиму змішування відображається у параметрі $k_{\text{нов}}$, який характеризує формування складних траєкторій руху частинок та інтенсифікацію процесу. Зі збільшенням частоти осциляцій якість

перемішування покращується, що проявляється у зростанні цього показника. Розрахунок здійснюється за формулою

$$k_{нов} = 1 + \frac{\omega_{осц}}{\omega}, \quad (2.112)$$

де $\omega_{осц}$ – частота осциляційного руху, рад/с;

ω – частота основного обертання барабана, рад/с.

Вплив конструкції лопаток у процес перемішування описується величиною $k_{лоп}$. Форма, орієнтація та площа їхнього контакту із сумішшю забезпечують додаткове перемішування, особливо в зоні зсувних деформацій.

Значення показника визначається як

$$k_{лоп} = 1 + \frac{A_{лоп}}{A_{б} \cdot k_{лоп,еф}}, \quad (2.113)$$

де $A_{лоп}$ – сумарна площа лопаток, м²;

$A_{б}$ – площа внутрішньої поверхні барабана, м²;

$k_{лоп,еф}$ – коефіцієнт ефективності форми лопаток.

Ефективність змішування за заданих умов роботи узагальнюється коефіцієнтом $k_{еф}$, який залежить від геометричних параметрів барабана та фізичних властивостей суміші, зокрема її густини. Його величина розраховується за співвідношенням

$$k_{еф} = 1 - \frac{\rho}{\rho_{макс}}, \quad (2.114)$$

де ρ – густина суміші, кг/м³;

$\rho_{макс}$ – максимальна допустима густина для ефективного перемішування, кг/м³.

Тривалість робочого циклу $t_{ц}$ визначається як

$$t_{ц} = t_{зм} + t_{роз} + t_{обс}, \quad (2.115)$$

де $t_{зм}$ – час змішування, с;

$t_{роз}$ – час вивантаження, с;

$t_{обс}$ – час на обслуговування, с.

Підставляючи всі показники в першу формулу отримаємо повну технічну продуктивність змішувача з урахуванням всіх параметрів

$$\Pi = \frac{\pi R^2 H \cdot k_{геом} \cdot \left(1 + \frac{\omega_{осц}}{\omega}\right) \cdot \left(1 + \frac{A_{лон}}{A_{\sigma} \cdot k_{лон,еф}}\right) \cdot \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{макс}}\right)}{t_{зм} + t_{роз} + t_{обс}} \quad (2.116)$$

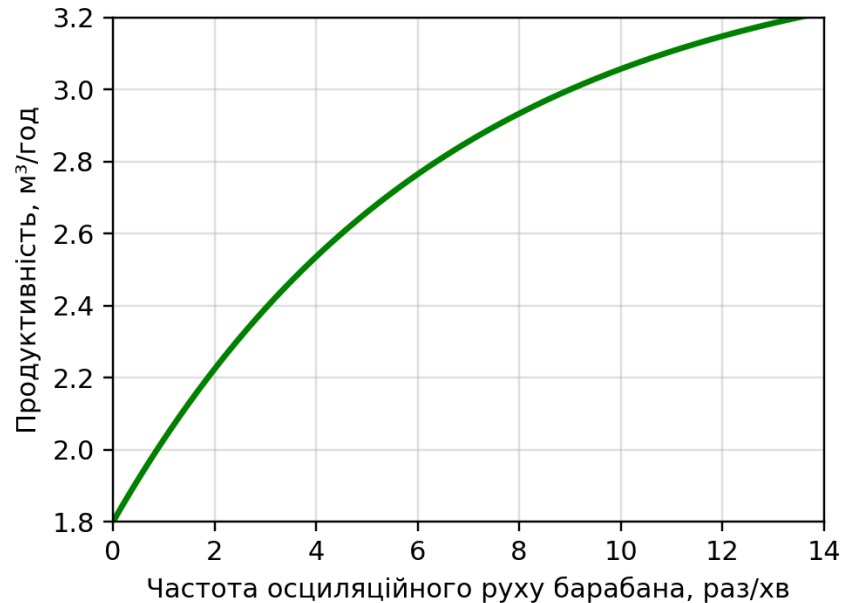


Рисунок 2.20 – Розрахункова залежність технічної продуктивності змішувача від частоти осциляційного руху барабана

На основі отриманих аналітичних залежностей побудовано розрахункову криву зміни технічної продуктивності змішувача залежно від частоти осциляційного руху барабана (рис. 2.20). Аналіз графіка показує, що зі зростанням частоти осциляцій від 0 до 4 хв⁻¹ технічна продуктивність зростає інтенсивно – приблизно з 1,75 до 2,6 м³/год, що відповідає приросту близько 0,85 м³/год. Подальше збільшення частоти осциляцій до 8 хв⁻¹ приводить до зростання продуктивності до 3,0 м³/год, однак темп її приросту зменшується. За частот осциляцій понад 10-14 хв⁻¹ приріст продуктивності стає незначним і наближається до граничного значення близько 3,2 м³/год, що свідчить про насичення ефекту інтенсифікації перемішування та обмеженість впливу подальшого підвищення інтенсивності осциляцій.

2.3.2 Визначення необхідної потужності приводу бетонозмішувача

Енергоспоживання під час приготування бетонної суміші є результатом взаємодії багатьох параметрів, зокрема: обертання барабана, осциляційного руху, тертя між компонентами суміші та конструктивними елементами змішувача [104].

Обертання барабана є основним джерелом енергоспоживання, так як для підтримання стабільного обертання необхідно долати інерцію суміші та забезпечувати достатню швидкість руху частинок у барабані. Потужність, потрібна для обертання барабана, розраховується наступним чином

$$P_{обр} = M_{обр} \cdot \omega, \quad (2.117)$$

де $P_{обр}$ – потужність обертання, Вт;

$M_{обр}$ – крутний момент, Н·м.

Крутний момент $M_{обр}$ є ключовим параметром, знаходиться як

$$M_{обр} = \int_0^R m_{сум}(r) \cdot g \cdot r \cdot \sin \theta dr + \int_0^R m_{сум}(r) \cdot \omega^2 \cdot r^2 dr, \quad (2.118)$$

де $m_{сум}(r)$ – маса частинки суміші на радіусі r , кг;

$\omega^2 \cdot r^2$ – відцентрова складова моменту.

Маса частинки суміші розраховується наступним чином

$$m_{сум}(r) = \rho \cdot A(r) \cdot dr \quad (2.119)$$

Для спрощення обчислень і врахування рівномірного розподілу маси суміші в барабані крутний момент можна записати у вигляді

$$M_{обр} = \rho \cdot V_{зам} \cdot g \cdot R_{ср} \cdot \sin \theta + \rho \cdot V_{зам} \cdot \omega^2 \cdot R_{ср}^2, \quad (2.120)$$

де $R_{ср}$ – середній радіус, який враховує ефективну площу барабана;

$V_{зам}$ – об'єм суміші у барабані, м³.

Враховуючи ці залежності, потужність для обертання барабана розраховується як

$$P_{обр} = \omega \cdot \left(\rho \cdot V_{зам} \cdot g \cdot R_{ср} \cdot \sin \theta + \rho \cdot V_{зам} \cdot \omega^2 \cdot R_{ср}^2 \right). \quad (2.121)$$

Осциляційний рух сприяє додатковому перемішуванню частинок суміші, що підвищує рівномірність розподілу компонентів. Проте це також вимагає додаткових енергетичних витрат, які залежать від моменту інерції барабана, частоти та амплітуди осциляцій.

Потужність осциляційного руху розраховується як

$$P_{осц} = M_{осц} \cdot \omega_{осц}, \quad (2.122)$$

де $P_{осц}$ – потужність осциляційного руху, Вт;

$M_{осц}$ – момент сил для забезпечення осциляцій, Н·м;

$\omega_{осц}$ – кутова швидкість осциляційного руху, рад/с.

Момент сил $M_{осц}$ визначається як

$$M_{осц} = I_{\delta} \cdot \frac{d^2\theta(t)}{dt^2}, \quad (2.123)$$

де I_{δ} – момент інерції барабана, кг·м²;

$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2}$ – кутове прискорення, рад/с².

Момент інерції барабана залежить від його геометричних параметрів і маси

$$I_{\delta} = \frac{1}{2} m_{\delta} R^2, \quad (2.124)$$

де m_{δ} – маса барабана, кг.

Маса барабана m_{δ} враховує матеріал виготовлення та його конструктивні параметри

$$m_{\delta} = \rho_{мат} \cdot V_{\delta}, \quad (2.125)$$

де $\rho_{мат}$ – густина матеріалу барабана, кг/м³;

V_{δ} – об'єм матеріалу барабана, м³.

Для циліндричного барабана з товщиною стінок l

$$V_{\delta} = 2\pi R H t + 2\pi R^2 l, \quad (2.126)$$

де H – висота барабана, м;

l – товщина стінок, м.

Робота, необхідна для створення осциляцій, визначається як інтеграл потужності, витраченої протягом циклу осциляцій

$$A_{осц} = \int_0^T P_{осц} dt, \quad (2.127)$$

де T – тривалість одного циклу осциляцій, с.

Підставляючи значення моменту сил (2.124) та вираз для гармонійного осциляційного руху $\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega_{осц} t)$, отримаємо

$$A_{осц} = \int_0^T \left(\frac{1}{2} m_{\sigma} R^2 \cdot \omega_{осц}^3 \cdot \theta_0 \sin(\omega_{осц} t) \right) dt. \quad (2.128)$$

Оскільки інтеграл гармонійної функції за один період дорівнює нулю, середня робота протягом кількох циклів обчислюється як

$$A_{осц,серед} = \frac{1}{2} m_{\sigma} R^2 \cdot \omega_{осц}^2 \cdot \theta_0^2. \quad (2.129)$$

Розрахунок роботи осциляцій також включає врахування втрат енергії на тертя. Для динамічного осциляційного руху це можуть бути втрати в підшипниках, взаємодії з опорними поверхнями та гідравлічних системах

$$A_{тер} = \mu_{опор} \cdot F_{норм} \cdot \omega_{осц} \cdot T. \quad (2.130)$$

Кутове прискорення осциляцій можна визначити через гармонійний закон зміни кута нахилу

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega_{осц} t), \quad (2.131)$$

де θ_0 – амплітуда осциляційного руху, рад.

У такому випадку кутове прискорення виглядає наступним чином

$$\frac{d^2\theta(t)}{dt^2} = -\theta_0 \omega_{осц}^2 \sin(\omega_{осц} t). \quad (2.132)$$

Підставивши ці залежності, можна отримати загальний вираз для потужності осциляційного руху

$$P_{осц} = \frac{1}{2} m_{\sigma} R^2 \cdot \theta_0 \omega_{осц}^3 \sin(\omega_{осц} t). \quad (2.133)$$

Додаткові енергетичні витрати також залежать від в'язкості суміші, яка створює опір руху та може бути записана як

$$P_{в'язкість} = \mu_{динам} \cdot A_{конт} \cdot v_{осц}^2, \quad (2.134)$$

де $\mu_{динам}$ – динамічна в'язкість суміші, Па·с;

$A_{конт}$ – площа контакту суміші з лопатками або стінками барабана, м²;

$v_{осц}$ – швидкість осциляційного руху частинок, м/с.

Швидкість осциляційного руху частинок визначається як

$$v_{осц} = \omega_{осц} \cdot R \cdot \sin(\omega_{осц} t). \quad (2.135)$$

Сумарна потужність для забезпечення осциляційного руху враховує обидві складові

$$P_{осц, заг} = P_{осц} + P_{в'язк}. \quad (2.136)$$

Тертя виникає у трьох основних точках: між частинками суміші, між сумішшю та поверхнею барабана, а також між сумішшю і лопатками. Для точного визначення втрат необхідно врахувати коефіцієнт тертя, нормальну силу, а також динаміку взаємодії частинок.

Потужність, витрачена на подолання сил тертя, розраховується за формулою

$$P_{тер} = \int_0^T \mu \cdot N \cdot v_{відносна} dt, \quad (2.137)$$

де $P_{тер}$ – потужність тертя, Вт;

μ – коефіцієнт тертя між сумішшю та поверхнями взаємодії;

N – нормальна сила, яка діє на поверхню, Н;

$v_{відносна}$ – відносна швидкість частинок у точці контакту, м/с;

T – тривалість робочого циклу, с.

Нормальна сила включає в себе компоненти гравітаційної та відцентрової сил

$$N = m_{сум} \cdot g \cdot \cos \theta + m_{сум} \cdot \omega^2 \cdot R, \quad (2.138)$$

де $m_{сум}$ – маса суміші, кг.

Маса суміші визначається як

$$m_{сум} = \rho \cdot V_{зам}. \quad (2.139)$$

Відносна швидкість між частинками суміші та поверхнею лопатки залежить від швидкості обертання барабана та геометрії лопаток

$$v_{\text{відносна}} = v_{\text{лоб}} - v_{\text{лон}}, \quad (2.140)$$

де $v_{\text{лоб}}$ – швидкість частинки на радіусі r , м/с;

$v_{\text{лон}}$ – швидкість лопатки, м/с.

Швидкість частинки на радіуси визначається як

$$v_{\text{лоб}} = \omega \cdot r. \quad (2.141)$$

Швидкість лопатки розраховується наступним чином

$$v_{\text{лон}} = \omega_{\text{б}} \cdot R_{\text{лон}}, \quad (2.142)$$

де $R_{\text{лон}}$ – радіус від осі обертання до кінця лопатки, м.

Завантаження компонентів та вивантаження готової бетонної суміші впливають на загальну потужність обладнання, особливо при використанні механізмів для автоматизованого завантаження і вивантаження. Завантаження здійснюється за допомогою ковша, встановленого на рамі, а вивантаження – шляхом нахилу барабана [105].

Потужність для завантаження компонентів розраховується з урахуванням маси матеріалів, висоти підйому та швидкості руху ковша. Формула для визначення потужності виглядає так

$$P_{\text{завантаж}} = \frac{m_{\text{завантаж}} \cdot g \cdot h_{\text{підйом}}}{t_{\text{завантаж}}}, \quad (2.143)$$

де $P_{\text{завантаж}}$ – потужність завантаження, Вт;

$m_{\text{завантаж}}$ – маса компонентів, що завантажуються за один цикл, кг;

$h_{\text{підйом}}$ – висота підйому ковша, м;

$t_{\text{завантаж}}$ – час завантаження компонентів, с.

Привід ковша, що забезпечує завантаження компонентів, виконує роботу, спрямовану на підйом маси матеріалів, а також на подолання тертя у направляючих і гідравлічній системі. Загальна потужність, необхідна для приводу ковша, визначається як

$$P_{\text{привід}} = P_{\text{підйом}} + P_{\text{тертя}}, \quad (2.144)$$

де $P_{\text{привід}}$ – сумарна потужність приводу ковша, Вт;

$P_{\text{підйом}}$ – потужність для підйому ковша разом із завантажуваними компонентами;

$P_{\text{тертя}}$ – потужність, витрачена на подолання тертя в направляючих і системі.

Потужність підйому визначається масою ковша і завантажуваних компонентів, а також висотою підйому

$$P_{\text{підйом}} = \frac{(m_{\text{ковш}} + m_{\text{завантаж}}) \cdot g \cdot h_{\text{підйом}}}{t_{\text{завантаж}}}, \quad (2.145)$$

де, $m_{\text{ковш}}$ – маса ковша, кг;

$m_{\text{завантаж}}$ – маса завантажуваних компонентів за один цикл, кг;

$h_{\text{підйом}}$ – висота підйому ковша, м;

$t_{\text{завантаж}}$ – час підйому ковша, с.

Втрати на тертя виникають у направляючих, через які рухається ківш, і в гідравлічній системі підйому. Вони враховуються за формулою

$$P_{\text{тертя}} = \mu_{\text{напр}} \cdot F_{\text{норм}} \cdot v_{\text{ковш}}, \quad (2.146)$$

де, $\mu_{\text{напр}}$ – коефіцієнт тертя у направляючих ковша;

$F_{\text{норм}}$ – нормальна сила на направляючі, Н;

$v_{\text{ковш}}$ – швидкість руху ковша, м/с.

Нормальна сила на направляючі розраховується, як

$$F_{\text{норм}} = (m_{\text{ковш}} + m_{\text{завантаж}}) \cdot g. \quad (2.147)$$

Швидкість руху ковша визначається наступним чином

$$v_{\text{ковш}} = \frac{h_{\text{підйом}}}{t_{\text{завантаж}}}. \quad (2.148)$$

Підставивши складові, отримаємо

$$P_{\text{привід}} = \frac{(m_{\text{ковш}} + m_{\text{завантаж}}) \cdot g \cdot h_{\text{підйом}}}{t_{\text{завантаж}}} + \mu_{\text{напр}} \cdot (m_{\text{ковш}} + m_{\text{завантаж}}) \cdot g \cdot \frac{h_{\text{підйом}}}{t_{\text{завантаж}}}. \quad (2.149)$$

Після спрощення

$$P_{\text{привід}} = (m_{\text{ковш}} + m_{\text{завантаж}}) \cdot g \cdot h_{\text{підйом}} \cdot \left(\frac{1 + \mu_{\text{напр}}}{t_{\text{завантаж}}} \right). \quad (2.150)$$

Вивантаження бетонної суміші здійснюється через нахил барабана. Потужність для цього розраховується за формулою

$$P_{\text{вивантаж}} = \frac{m_{\text{вивантаж}} \cdot g \cdot h_{\text{нахил}}}{t_{\text{вивантаж}}}, \quad (2.151)$$

де $P_{\text{вивантаж}}$ – потужність вивантаження, Вт;

$m_{\text{вивантаж}}$ – маса готової суміші, кг;

$h_{\text{нахил}}$ – висота підйому, зумовлена нахилом барабана, м;

$t_{\text{вивантаж}}$ – час нахилу барабана, с.

Потужність приводу нахилу барабана залежить від маси суміші та кута нахилу. Для розрахунку моменту, необхідного для нахилу барабана, використовується рівняння

$$M_{\text{нахил}} = m_{\text{вантаж}} \cdot g \cdot R_{\text{нахил}} \cdot \sin \theta, \quad (2.152)$$

де $R_{\text{нахил}}$ – радіус осі обертання барабана, м.

Підставляючи всі компоненти у формулу сумарної потужності, отримаємо

$$\begin{aligned} P_{\text{заг}} = & \omega \cdot (\rho \cdot V_{\text{заг}} \cdot g \cdot R_{\text{ср}} \cdot \sin \theta + \rho \cdot V_{\text{заг}} \cdot \omega^2 \cdot R_{\text{ср}}^2) + \frac{1}{2} m_{\text{б}} R^2 \cdot \theta_0 \cdot \omega_{\text{сум}}^3 + \\ & + \mu \cdot (m_{\text{сум}} \cdot g \cdot \cos \theta + m_{\text{сум}} \cdot \omega^2 \cdot R) \cdot v_{\text{відносна}} + \\ & + \frac{(m_{\text{ковш}} + m_{\text{завантаж}}) \cdot g \cdot h_{\text{підйом}} \cdot (1 + \mu_{\text{напр}})}{t_{\text{навантаж}}} + \frac{m_{\text{вивантаж}} \cdot g \cdot h_{\text{нахил}}}{t_{\text{вивантаж}}}. \end{aligned} \quad (2.153)$$

На основі отриманих аналітичних залежностей побудовано розрахункову криву зміни загальної потужності обладнання залежно від частоти осциляційного руху барабана в діапазоні 0–14 хв⁻¹ (рис. 2.21). Аналіз графіка показує, що за відсутності осциляцій загальна потужність обладнання становить близько 0,8 кВт. Із підвищенням частоти осциляцій спостерігається поступове зростання потужності, що обумовлено збільшенням енергетичних витрат на реалізацію осциляційного руху барабана та інтенсифікацію процесу перемішування бетонної суміші.

У діапазоні частот осциляцій 6–8 хв^{-1} загальна потужність досягає 1,2–1,4 кВт, а при подальшому збільшенні частоти до 12–14 хв^{-1} зростає до 1,8–2,0 кВт. Отримана залежність свідчить про суттєвий вплив осциляційного руху на енергетичні показники обладнання та необхідність обґрунтування раціональної частоти осциляцій з урахуванням співвідношення між інтенсивністю змішування та витратами енергії.

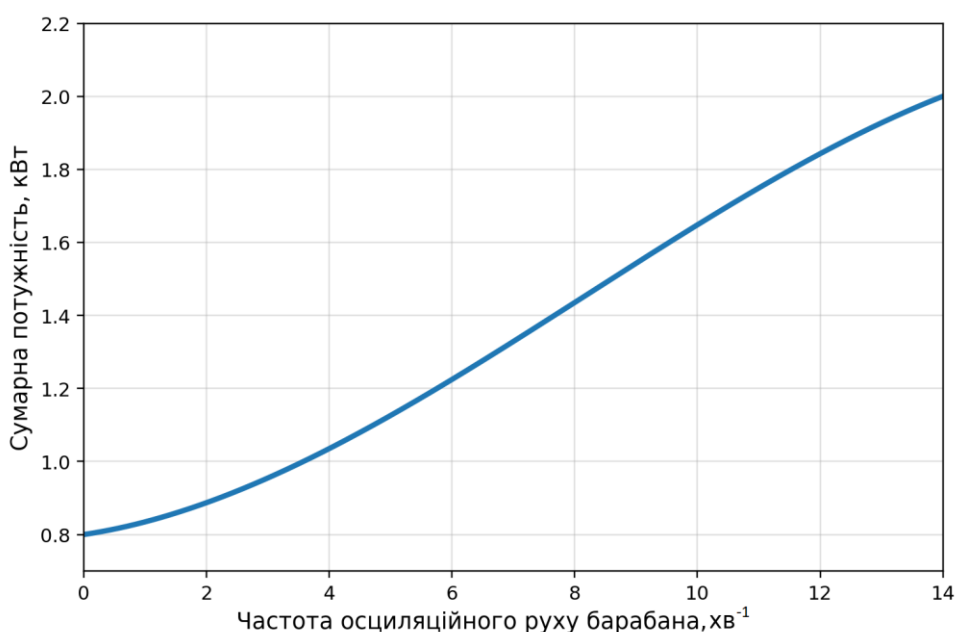


Рисунок 2.21 – Розрахункова залежність сумарної потужності бетонозмішувача від частоти осциляційного руху барабана

2.4 Висновки до розділу 2

1. Розроблено принципову та конструктивну схему автономного універсального мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетонних сумішей, яка забезпечує виконання повного технологічного циклу, що включає завантаження компонентів, змішування та вивантаження готової суміші в умовах будівельного майданчика.

2. Запропоновано математичну модель процесу змішування бетонної суміші в барабані з осциляційним рухом, яка враховує динаміку переміщення

компонентів при періодичній зміні кута нахилу барабана та дозволяє оцінювати вплив режимних і конструктивних параметрів на інтенсивність перемішування.

3. Теоретичний аналіз показав, що введення осциляційного руху барабана сприяє підвищенню однорідності бетонної суміші за рахунок інтенсивнішого перерозподілу компонентів між активними та пасивними зонами змішування.

4. На основі аналітичних залежностей визначено технічну продуктивність змішувача та встановлено, що зі зростанням частоти осциляційного руху барабана до 14 хв^{-1} продуктивність збільшується приблизно до $3,2 \text{ м}^3/\text{год}$.

5. Розроблено методику розрахунку сумарної потужності обладнання з урахуванням витрат енергії на обертання барабана, осциляційний рух, подолання сил тертя, а також процеси завантаження та вивантаження бетонної суміші.

6. Встановлено, що зі збільшенням частоти осциляційного руху барабана сумарна потужність обладнання зростає від приблизно $0,8$ до $2,0 \text{ кВт}$ при зміні частоти осциляцій від 0 до 14 хв^{-1} . При цьому характер залежності є нелінійним, що обумовлено впливом інерційних складових та додаткових витрат енергії на реалізацію осциляційного руху.

7. Проведений аналіз співвідношення продуктивності та енергоспоживання показав, що збільшення продуктивності відбувається швидше, ніж зростання енерговитрат, що підтверджує доцільність використання осциляційного руху барабана для підвищення енергоефективності процесу приготування бетонних сумішей.

РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ БЕТОНОЗМІШУВАЧА З ОСЦИЛЯЦІЙНИМ РУХОМ БАРАБАНА

3.1 Програма експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження спрямовані на визначення основних параметрів роботи обладнання з осциляційним рухом барабана для змішування бетону. Головною метою є встановлення раціональних режимів роботи змішувача, які забезпечують високу однорідність бетонної суміші та оптимальні показники міцності затверділого бетону.

У ході досліджень передбачається проведення чотирьохфакторного експерименту для визначення коефіцієнта однорідності бетонної суміші, що дозволить оцінити вплив основних параметрів змішування, зокрема частоти осциляційного руху барабана, часу перемішування, частоти обертання барабана та амплітуди зміни кута нахилу. Аналіз отриманих результатів дасть змогу визначити раціональні поєднання режимів роботи обладнання, що забезпечують рівномірний розподіл компонентів у бетонній суміші.

Подальші експериментальні дослідження полягають у визначенні фізико-механічних властивостей бетону, отриманих за допомогою розробленої моделі обладнання. Основний акцент зроблено на дослідженні міцності бетону шляхом випробувань зразків-кубів на стискання під пресом, що дозволить встановити взаємозв'язок між параметрами процесу змішування та кінцевими характеристиками затверділого бетону.

Експерименти проводитимуться у лабораторних умовах із дотриманням чинних стандартів та методик. У процесі досліджень застосовуватимуться сучасні вимірювальні прилади та методи аналізу, що забезпечать достовірність результатів і дадуть змогу обґрунтувати ефективність роботи обладнання.

Завершальним етапом досліджень є аналіз та узагальнення отриманих даних, що включає оцінку точності отриманих результатів, порівняння з

теоретичними дослідженнями, визначення раціональних режимів роботи обладнання, а також розробку рекомендацій щодо його подальшого вдосконалення. Очікується, що результати досліджень сприятимуть підвищенню ефективності роботи бетонозмішувача з осциляційним рухом барабану, що, у свою чергу, позитивно вплине на якість та однорідність бетонної суміші, а також на техніко-економічні показники процесу приготування бетону.

3.2 Характеристика обладнання та матеріалів для проведення досліджень

3.2.1 Експериментальне обладнання

Експериментальні дослідження проводилися на гравітаційному бетонозмішувачі, який був використаний як базовий експериментальний стенд для дослідження впливу режимів змішування на якість бетонної суміші (рис.3.1). У процесі досліджень бетонозмішувач було дообладнано механізмом забезпечення осциляційного руху барабана, що дало змогу моделювати умови роботи перспективного універсального малогабаритного мобільного обладнання для приготування бетону.

Застосування осциляційного руху барабана забезпечувало періодичну зміну його просторового положення під час роботи, що призводило до утворення додаткових векторів переміщення компонентів бетонної суміші. Такий режим сприяв інтенсифікації процесу перемішування, покращенню рівномірності розподілу складових та підвищенню однорідності бетонної суміші порівняно з традиційним гравітаційним змішуванням.

Використання гравітаційного бетонозмішувача як експериментальної установки дозволило дослідити вплив частоти обертання барабана, частоти та амплітуди осциляцій, а також тривалості змішування на показники однорідності суміші та міцність затверділого бетону. Отримані експериментальні результати були використані для обґрунтування параметрів роботи та доцільності

впровадження осциляційного руху барабана в конструкцію автономного універсального мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетону.



Рисунок 3.1 – Стенд гравітаційного бетонозмішувача з осциляційним рухом барабана

3.2.2 Матеріали для приготування бетонної суміші

Для проведення експериментальних досліджень було використано такі основні компоненти бетонної суміші:

1. Цемент

В якості в'язучого матеріалу застосовано портландцемент класу міцності СЕМ І 42.5R відповідно до ДСТУ Б EN 197-1:2015 «Цемент. Частина 1. Склад, технічні вимоги та критерії відповідності для звичайних цементів» [106]. Цей цемент характеризується швидким набором міцності та забезпечує необхідні показники довговічності бетону.

2. Дрібний заповнювач

Використано природний річковий пісок фракції 0.125–5 мм, що відповідає вимогам ДСТУ Б EN 12620:2013 «Заповнювачі для бетону» [107]. Пісок попередньо просіювали для видалення домішок та забезпечення необхідної крупності.

3. Крупний заповнювач

Як крупний заповнювач застосовано гранітний щебінь фракції 5–20 мм згідно з ДСТУ Б EN 12620:2013. Щебінь характеризується високою міцністю та низьким вмістом пилоподібних і глинистих часток.

4. Вода для замішування

Для приготування бетонної суміші використано воду, що відповідає вимогам ДСТУ EN 1008:2022 «Вода для замішування бетону. Технічні умови для відбирання проб, тестування та оцінювання придатності води, охоплюючи воду, відновлену під час виробництва бетону, як воду для змішування бетону» [108]. Вода не містить домішок, які можуть негативно вплинути на процес гідратації цементу та якість бетону.

5. Хімічні добавки

Для покращення технологічних та експлуатаційних властивостей бетонної суміші застосовано суперпластифікатор на основі полікарбоксилатів, що відповідає ДСТУ EN 934-2:2019 "Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Частина 2. Добавки для бетонів" [109]. Добавка дозволяє знизити водоцементне відношення, підвищити рухливість суміші та покращити міцнісні характеристики затверділого бетону.

Всі матеріали перед використанням проходили вхідний контроль якості, що включав перевірку відповідності сертифікатам, визначення фізико-механічних характеристик. Це забезпечувало стабільність властивостей бетонної суміші та достовірність отриманих результатів експериментальних досліджень.

3.2.3 Вимірювальні прилади та лабораторне обладнання

Для проведення експериментальних досліджень використовувався комплекс вимірювальних інструментів і приладів, які забезпечують контроль основних параметрів бетонної суміші та затверділого бетону відповідно до вимог чинних стандартів.

Зважування компонентів бетонної суміші здійснювалося на електронних вагах ТВЕ-50-1-ВР, які мають клас точності II згідно з ДСТУ EN 45501:2021 «Метрологія. Ваги неавтоматичної дії. Вимоги та методи випробування» [110].

Для оцінки гранулометричного складу заповнювачів застосовувався набір лабораторних сит відповідно до ДСТУ EN 933-1:2021 «Тести на зерновий склад. Частина 1. Методи визначення розміру зерен» [111]. До складу набору входили сита з розмірами отворів 0,125 мм, 0,25 мм, 0,5 мм, 1 мм, 2 мм, 5 мм, 10 мм.

Формування контрольних зразків для випробувань на міцність здійснювалося у стандартних формах розміром 100×100×100 мм згідно з ДСТУ Б В.2.7-214:2009 "Бетони. Методи випробувань за контрольними зразками" [59].

Випробування зразків на міцність проводилися на гідравлічному пресі ИП-100, що використовується у випробувальній лабораторії Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Прес забезпечує точне визначення межі міцності на стискання, що відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-233:2010 "Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками" [112].

Оцінка рухливості бетонної суміші проводилася за допомогою стандартного конуса Абрамса згідно з ДСТУ EN 12350-2:2022. «Випробування бетонної суміші. Частина 2. Визначення консистенції. Випробування на осадку конуса».

Додатково для вимірювання та реєстрації параметрів використовувалися:

- Секундомір механічний СОСпр-2б-2 для вимірювання часу змішування;
- Лінійка металева 1 м (ISO 9001) з ціною поділки 0,5 мм для вимірювання розмірів зразків та параметрів суміші.

Усі вимірювальні прилади пройшли метрологічну повірку та відповідають вимогам сертифікації. Отримані дані використовувалися для оцінки однорідності бетонної суміші, визначення впливу осциляційного руху барабана на якість перемішування та оцінки кінцевих фізико-механічних характеристик бетону.

3.3 Методика проведення експериментальних досліджень та обробки результатів

Процес приготування бетонної суміші здійснювався відповідно до вимог ДСТУ EN 206:2022 «Бетон. Специфікація, продуктивність, виробництво та відповідність» та включав кілька ключових етапів. Спочатку проводилася підготовка компонентів, які входять до складу бетонної суміші. Портландцемент СЕМ І 42.5R перевірявся на відповідність ДСТУ Б EN 197-1:2015, зокрема щодо терміну придатності та відсутності злежувань. Дрібний (пісок) та крупний (щебінь) заповнювачі просіювалися через відповідні сита згідно з ДСТУ EN 933-1:2021, що дозволяло видалити сторонні домішки та забезпечити необхідний гранулометричний склад. Вода, що використовувалася для замішування, відповідала вимогам ДСТУ EN 1008:2022 і не містила домішок, здатних негативно вплинути на процес гідратації цементу. Хімічні добавки, зокрема суперпластифікатор на основі полікарбоксилатів, додавалися відповідно до рекомендацій виробника та вимог ДСТУ EN 934-2:2019.

Дозування компонентів здійснювалося відповідно до розрахункового складу бетонної суміші, розробленого згідно з ДСТУ EN 206:2022, із забезпеченням необхідного водоцементного співвідношення. Всі компоненти зважувалися на електронних вагах з точністю до 0,1 кг. Завантаження у бетонозмішувач проводилося у стандартній послідовності, що забезпечувала отримання однорідної маси без грудок і сухих включень.

Після завершення процесу змішування проводилася перевірка якості бетонної суміші відповідно до вимог ДСТУ EN 206:2022. Визначалися її основні

характеристики, такі як рухливість та середня густина. Рухливість оцінювали за допомогою стандартного конуса згідно з ДСТУ EN 12350-2:2022, що дозволяло визначити осадку бетонної суміші та її відповідність необхідному класу за консистенцією. Середня густина встановлювалася методом зважування та вимірювання об'єму контрольних проб. У разі невідповідності отриманих значень нормативним показникам склад бетонної суміші коригувався шляхом зміни водоцементного відношення або дозування добавок.

Дотримання встановлених технологічних вимог та контроль якості на кожному етапі приготування забезпечували отримання бетонної суміші з високими фізико-механічними характеристиками, необхідними для подальших експериментальних досліджень.

Для оцінки якості змішування бетонної суміші проводилося визначення її однорідності відповідно до чинних нормативних документів. Оскільки процес змішування відбувається у гравітаційному бетонозмішувачі, відбір проб безпосередньо з барабана є неможливим. Тому після завершення процесу змішування готова суміш висипалася у спеціальний бункер, звідки вже здійснювався відбір проб у визначених контрольних точках (рис. 3.2).

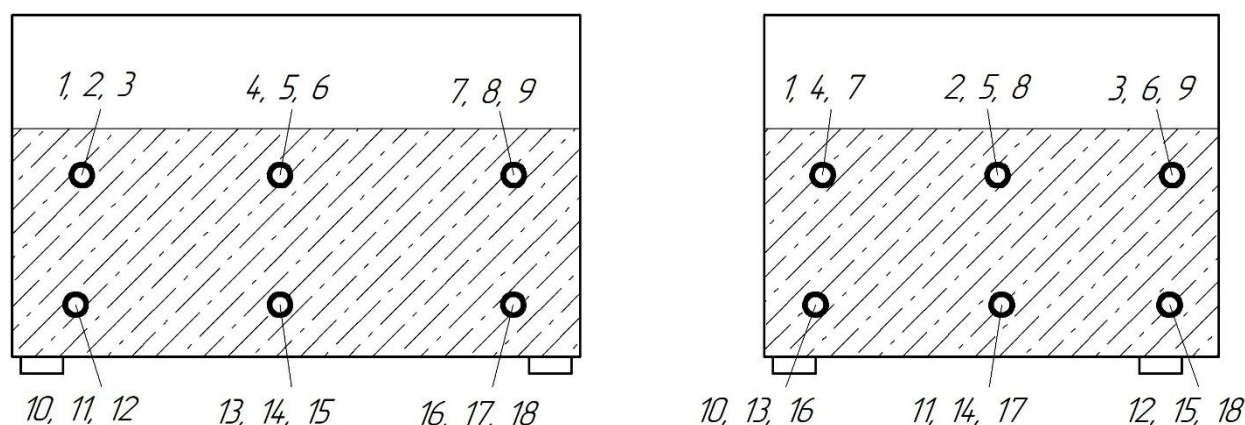


Рисунок 3.2 – Схема розміщення контрольних точок для відбору проб бетонної суміші з спеціального бункера

Для аналізу однорідності бетонної суміші використовувалися методи визначення відхилень вмісту основних компонентів: води з цементом, піску та

щебеню. Відбір проб здійснювався у вісімнадцяти контрольних точках бункера для отримання репрезентативних результатів. Кожна проба мала масу до 3 кг, з яких по 0,2 кг використовували для аналізу розподілу складових суміші.

Рівномірність розподілу компонентів оцінювалася шляхом визначення середнього відхилення вмісту кожного з них у відібраних пробах. Для цього застосовувалася формула

$$\delta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |C_i - C_{cp}|, \quad (3.1)$$

де δ – середнє значення відхилень вмісту компонента в пробах,

C_i – вміст досліджуваного компонента в окремій пробі,

C_{cp} – середнє значення вмісту компонента у всіх пробах,

n – кількість проб.

Середнє значення вмісту компонентів у відібраних пробах визначалося за формулою

$$C_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i. \quad (3.2)$$

Масову кількість компонентів у кожній пробі визначали шляхом зважування у воді та на повітрі, використовуючи методику, що базується на законі Архімеда

$$m_c = \frac{m_a \cdot \rho_w}{\rho_c}, \quad (3.3)$$

де m_c – маса компонента у пробі, кг;

m_a – маса компонента на повітрі, кг;

ρ_w – густина води, кг/м³;

ρ_c – густина матеріалу, кг/м³.

Згідно з ДСТУ EN 206:2022, бетонна суміш вважається однорідною, якщо абсолютні відхилення вмісту компонентів у пробах не перевищують встановлених допустимих значень: для піску – 3%, для цементу – 2%, для води – 1% та щебню – 3%.

Для оцінки фізико-механічних характеристик затверділого бетону проводилися випробування зразків на стискання. Контрольні куби виготовлялися з тих самих проб бетонної суміші, які використовувалися для визначення однорідності, що дозволяло встановити взаємозв'язок між якістю перемішування та кінцевими характеристиками бетону. Формування зразків здійснювалося у стандартних формах розміром 100×100×100 мм згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-233:2010.

Після виготовлення зразки витримувалися у вологих умовах протягом 28 діб відповідно до ДСТУ Б В.2.7-233:2010. Під час тверднення зразки зберігали у камері нормального тверднення з температурою $(20\pm 2)^\circ\text{C}$ і відносною вологістю не менше 95%. Перед проведенням випробувань вони проходили візуальний огляд на наявність дефектів, що могли б вплинути на результати експерименту.

Випробування на стискання виконувалися на гідравлічному пресі ИП-100, який забезпечував навантаження зі сталою швидкістю відповідно до ДСТУ Б В.2.7-233:2010 "Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками". Процес випробувань полягав у поступовому прикладанні осьового навантаження до зразка до моменту його руйнування. Фіксувалося максимальне значення навантаження, при якому відбувався руйнування куба, після чого розраховувалася межа міцності на стискання за формулою

$$R = \frac{P}{A}, \quad (3.4)$$

де R – міцність бетону на стискання, МПа;

P – максимальне навантаження, Н;

A – площа поперечного перерізу зразка, мм^2 .

Для забезпечення достовірності результатів випробування проводилися на серії зразків, після чого визначалося середнє значення міцності. Отримані дані аналізувалися з урахуванням впливу режимів змішування на кінцеві характеристики бетону.

3.4 Визначення параметрів процесу змішування бетонної суміші в бетонозмішувачі з осциляційним рухом барабана

Під час експерименту проводилося приготування бетонної суміші із забезпеченням необхідного водоцементного співвідношення. Змінювалися частота обертання барабана змішувача, частота осциляцій робочого органу, час змішування та кут нахилу барабану. Відібрані проби аналізувалися на рівномірність розподілу компонентів, а також виготовлялися контрольні кубизразки для випробування на міцність.

Для дослідження було реалізовано чотирьохфакторний експеримент. В якості вихідної характеристики Y прийнято коефіцієнт якості змішування ε . Вхідними факторами були: X_1 – амплітуда зміни кута нахилу барабану, θ , градус, X_2 – частота обертання барабана, ω , об/хв, X_3 – частота осциляцій n , хв^{-1} , X_4 – тривалість змішування t , хв.

Діапазони варіювання факторів наведено в таблиці 3.1, а матрицю планування експериментів – у таблиці 3.2.

Таблиця 3.1 – Діапазони варіювання змінними експерименту

Характеристика	Кодове позначення фактора	Амплітуда зміни кута нахилу барабану	Частота обертання барабана	Частота осциляції	Тривалість змішування
		градус	об/хв	хв^{-1}	хв
Верхній рівень	1	40	60	14	6
Нульовий рівень	0	25	35	8	4
Нижній рівень	-1	10	10	2	2

Матриця планування експерименту представлена у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Матриця планування експерименту

	X ₁	Зн.	X ₂	Зн.	X ₃	Зн.	X ₄	Зн.	ε
№	Код	Амплітуда зміни кута нахилу барабану	Код	Частота обертання барабана	Код	Частота осциляції	Код	Тривалість змішування	Коеф. якості змішування
1	+	40	+	60	+	14	+	6	0,812
2	-	10	+	60	+	14	+	6	0,765
3	+	40	-	10	+	14	+	6	0,698
4	-	10	-	10	+	14	+	6	0,632
5	+	40	+	60	-	2	+	6	0,745
6	-	10	+	60	-	2	+	6	0,687
7	+	40	-	10	-	2	+	6	0,654
8	-	10	-	10	-	2	+	6	0,589
9	+	40	+	60	+	14	-	2	0,723
10	-	10	+	60	+	14	-	2	0,678
11	+	40	-	10	+	14	-	2	0,645
12	-	10	-	10	+	14	-	2	0,579
13	+	40	+	60	-	2	-	2	0,612
14	-	10	+	60	-	2	-	2	0,554
15	+	40	-	10	-	2	-	2	0,543
16	-	10	-	10	-	2	-	2	0,487
17	+	40	0	35	0	8	0	4	0,789
18	-	10	0	35	0	8	0	4	0,621
19	0	25	+	60	0	8	0	4	0,754
20	0	25	-	10	0	8	0	4	0,598
21	0	25	0	35	+	14	0	4	0,832
22	0	25	0	35	-	2	0	4	0,567
23	0	25	0	35	0	8	+	6	0,712
24	0	25	0	35	0	8	-	2	0,521
25	0	25	0	35	0	8	0	4	0,701
26	0	25	0	35	0	8	0	4	0,689
27	0	25	0	35	0	8	0	4	0,704
28	0	25	0	35	0	8	0	4	0,698

У результаті обробки експериментальних даних отримано рівняння регресії в кодованому вигляді

$$Y = 0,735 + 0,048X_1 + 0,065X_2 + 0,082X_3 + 0,041X_4 - 0,038X_1^2 - 0,025X_2^2 + 0,047X_3^2 - 0,018X_4^2 + 0,022X_1X_2 - 0,012X_1X_3 - 0,035X_2X_3 \quad (3.5)$$

Перевірку адекватності отриманої функціональної залежності фактичним результатам, отриманим на основі експериментів, зроблено на основі розрахунку критерію Фішера F_p і порівняння його з рекомендованим значенням $[F_p]$.

Рівняння вважається придатним при $F_p < [F_p]$ [113].

Гранична величина $[F_p]$ -критерію визначена, як $[F_p] = 3,13$.

Розрахункове значення F_p -критерію Фішера визначено за формулою

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_{\bar{y}}^2}, \quad (3.6)$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності (остаточна дисперсія);

$S_{\bar{y}}^2$ – дисперсія у нульовій точці. При чотири-разових вимірюваннях для поточного експерименту $S_{\bar{y}}^2 = 0,00006$.

Згідно розрахунків, $S_{ad}^2 = 0,00015$.

Розрахункове значення критерію Фішера

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_{\bar{y}}^2} = \frac{0,00015}{0,00006} = 2,5 < 3,13.$$

Оскільки розрахункове значення F_p -критерію менше, ніж граничне, то можна стверджувати, що розроблена на основі багатофакторного аналізу функціональна залежність (3.5) адекватно описує процес впливу конструктивних параметрів та режимів роботи гравітаційного бетонозмішувача з осциляційним рухом на коефіцієнт якості перемішування.

На рис. 3.3 показано графічні залежності коефіцієнта якості змішування від амплітуди зміни кута нахилу барабану.

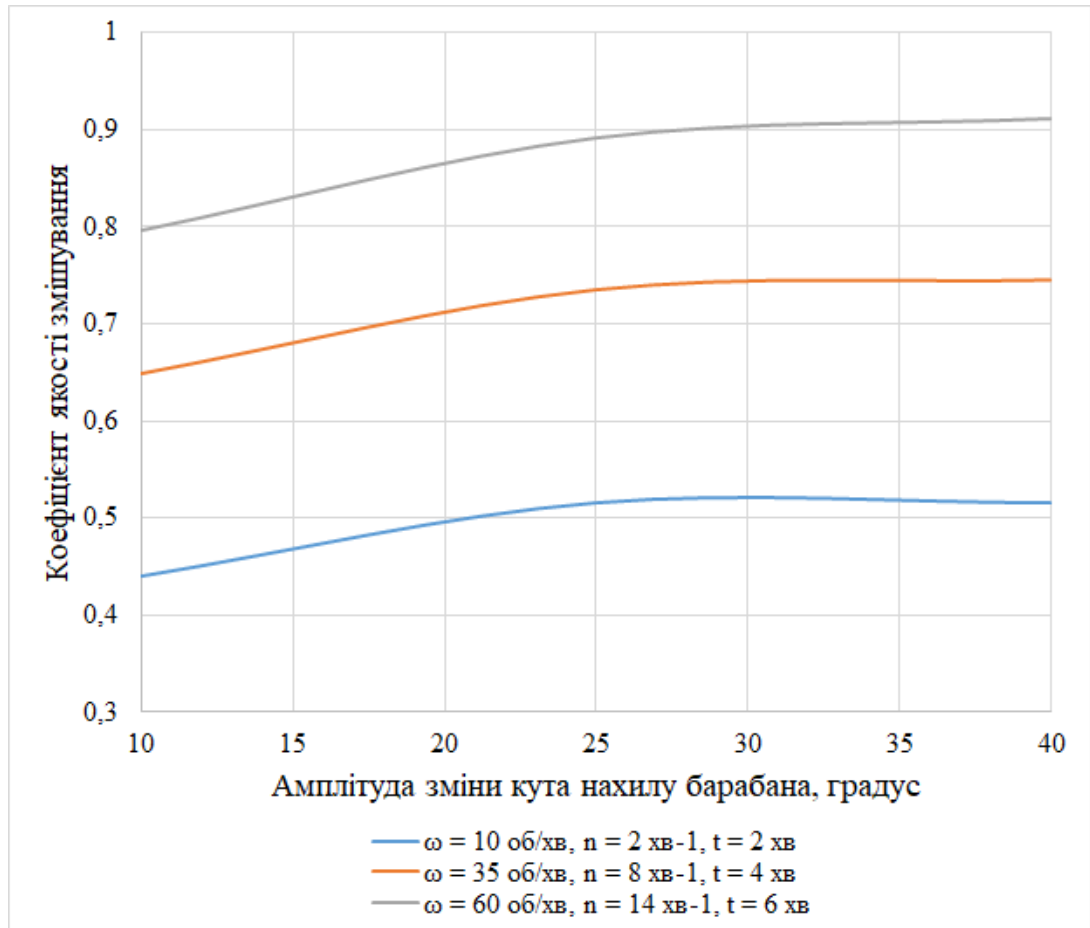


Рисунок 3.3 – Залежності коефіцієнта якості змішування від амплітуди зміни кута нахилу барабану

Характер залежності, наведеної на рисунку 3.3, демонструє зростання коефіцієнта якості змішування зі збільшенням амплітуди зміни кута нахилу барабану від 10 до 40 градусів. Найвищі значення коефіцієнта досягаються при частоті обертання 60 об/хв, що свідчить про доцільність використання кутів нахилу в межах 20–25° для забезпечення ефективного змішування будівельних сумішей.

На рис. 3.4 показано графічні залежності коефіцієнта якості змішування від частоти обертання барабану.

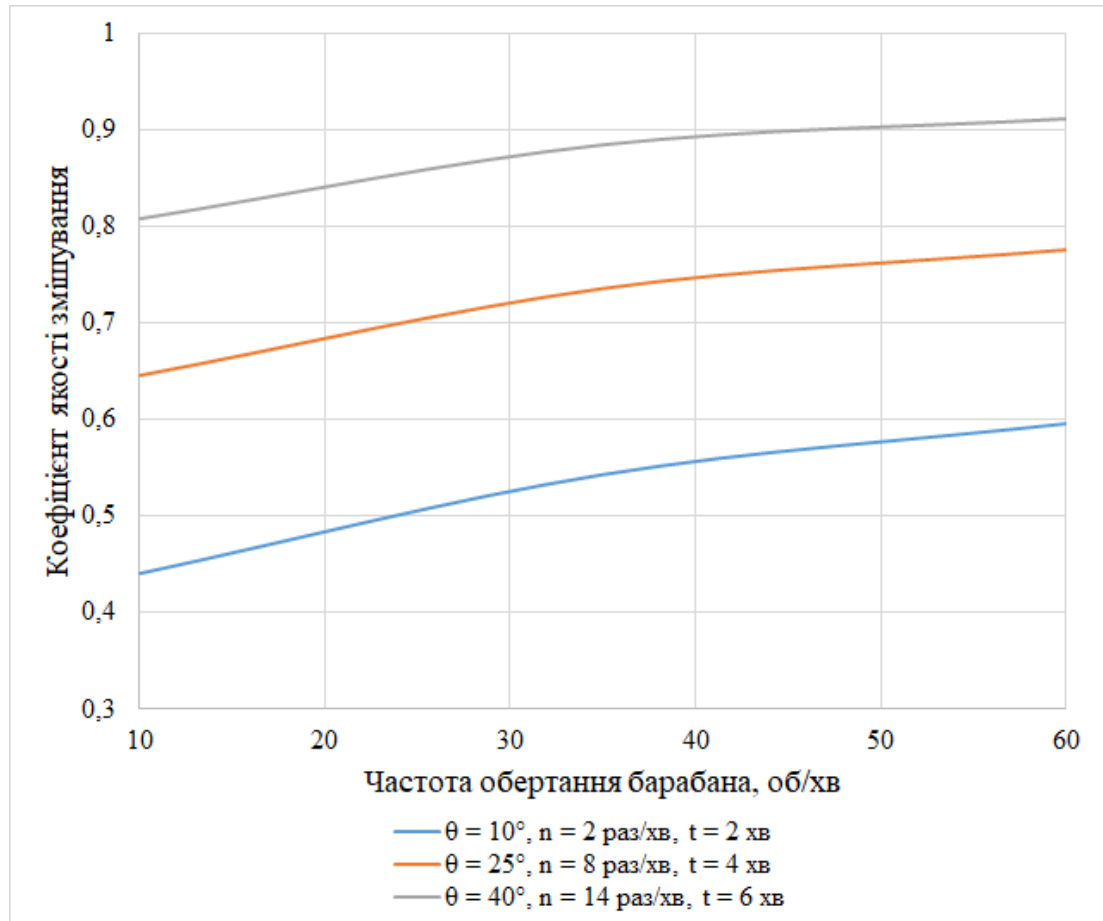


Рисунок 3.4 – Залежності коефіцієнта якості змішування від частоти обертання барабана

Характер залежності, наведеної на рисунку 3.4, демонструє зростання коефіцієнта якості змішування зі збільшенням частоти обертання барабана з 10 до 60 об/хв. Найвищі значення якості досягаються при максимальній частоті обертання, що свідчить про доцільність вибору діапазону частоти в межах 35–45 об/хв для забезпечення оптимального змішування.

На рис. 3.5 показано графічні залежності коефіцієнта якості змішування від частоти осциляцій.

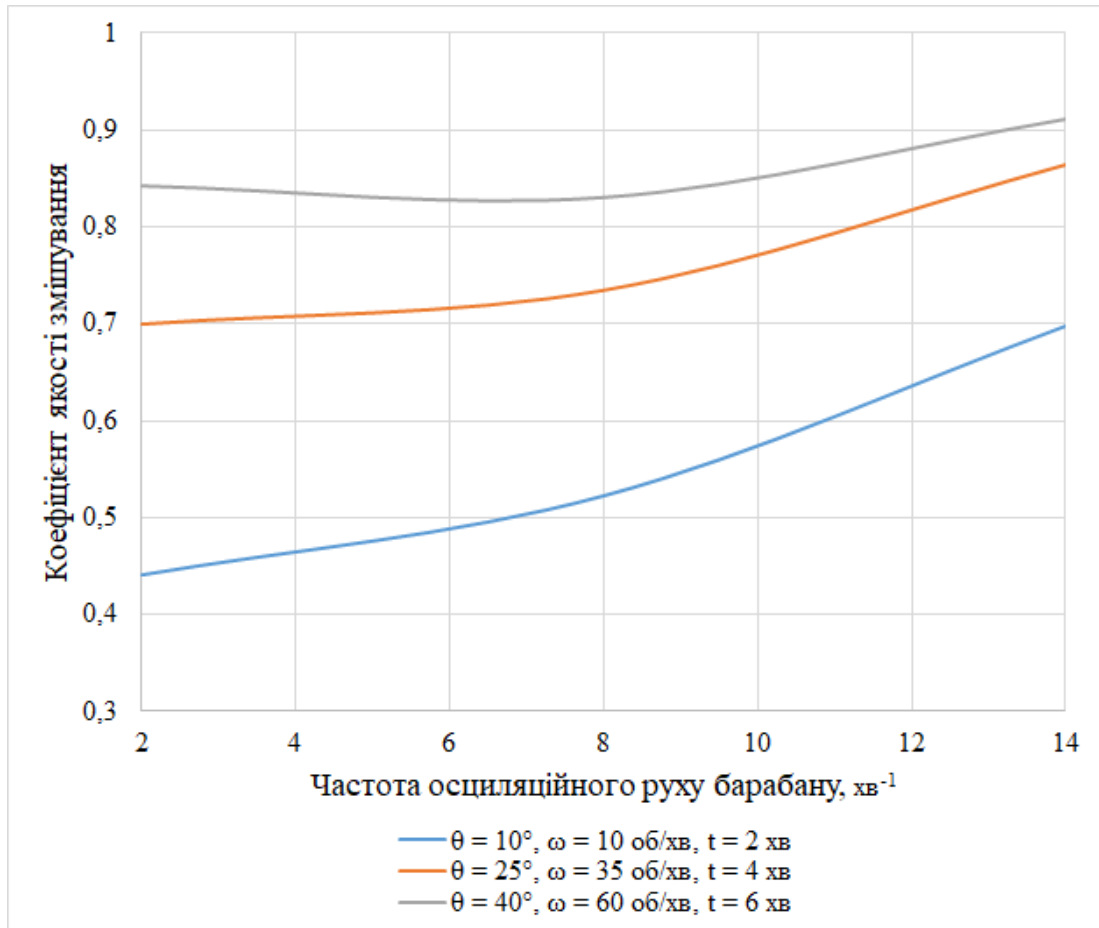


Рисунок 3.5 – Залежності коефіцієнта якості змішування від частоти осциляцій барабану

Характер залежності, наведеної на рисунку 3.5, демонструє поступове зростання значення коефіцієнта якості змішування із збільшенням частоти осциляцій з 2 до 14 хв⁻¹. Найвищі значення якості досягаються при максимальній частоті осциляцій, що вказує на доцільність вибору діапазону частоти в межах 10–12 хв⁻¹ для забезпечення оптимального змішування.

На рис. 3.6 показано графічні залежності коефіцієнта якості змішування від часу тривалості змішування.

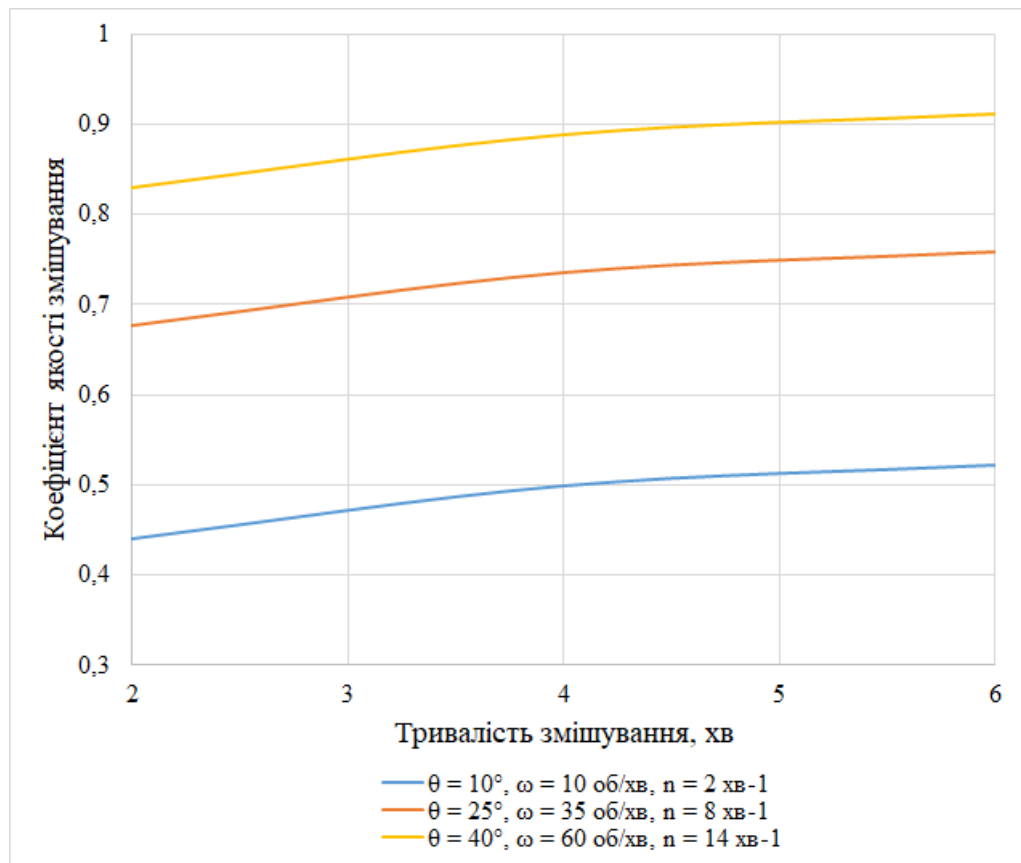


Рисунок 3.6 – Залежності коефіцієнта якості змішування від тривалості змішування

Характер графічних залежностей, наведених на рисунку 3.6, свідчить про поступове зростання коефіцієнта якості змішування зі збільшенням тривалості змішування від 2 до 6 хвилин. Це вказує на позитивний вплив тривалості змішування на показник якості. Доцільним діапазоном часу змішування можна вважати інтервал 3-4 хвилин, оскільки коефіцієнт наближається до максимальних значень.

У результаті проведених експериментальних досліджень визначено оптимальні діапазони параметрів, що забезпечують ефективний процес змішування бетонної суміші в гравітаційному бетонозмішувачі з осциляційним рухом барабана:

Частота обертання барабана – $\omega = 35-45$ об/хв,

Частота осциляцій робочого органу – $n = 10-12$ хв⁻¹,

Амплітуда зміни кута нахилу барабану – $\theta = 20-25^\circ$.

Тривалість змішування – $t = 3-4$ хв.

Рис. 3.7-3.8, представлені нижче, ілюструють залежність коефіцієнта якості змішування від частоти обертання барабана та частоти осциляцій, а також залежність коефіцієнта якості змішування від тривалості змішування та частоти осциляцій барабана.

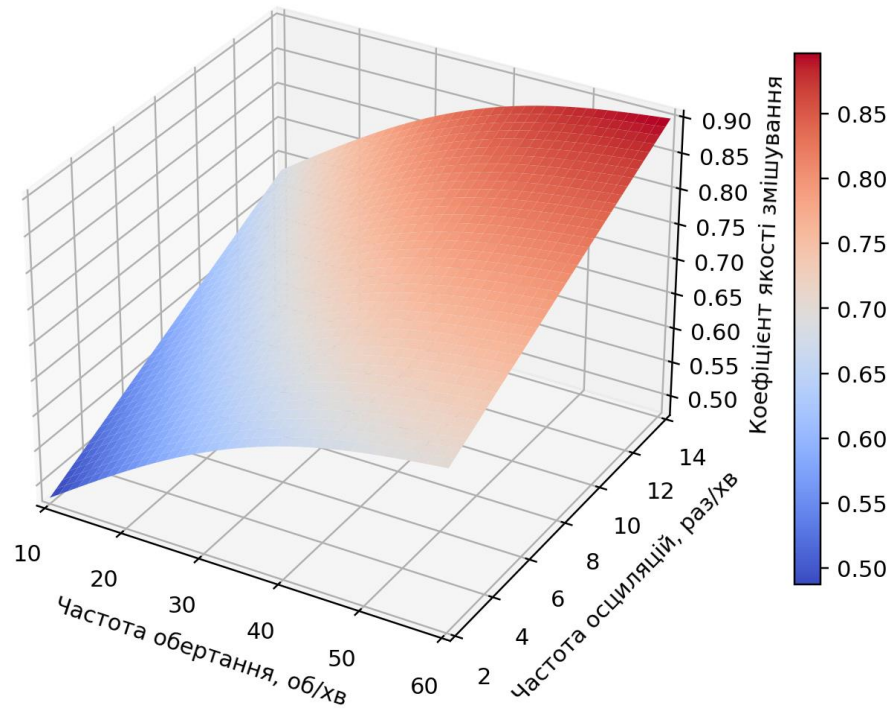


Рисунок 3.7 – Залежності коефіцієнта якості змішування від частоти обертання та осциляційного руху барабану

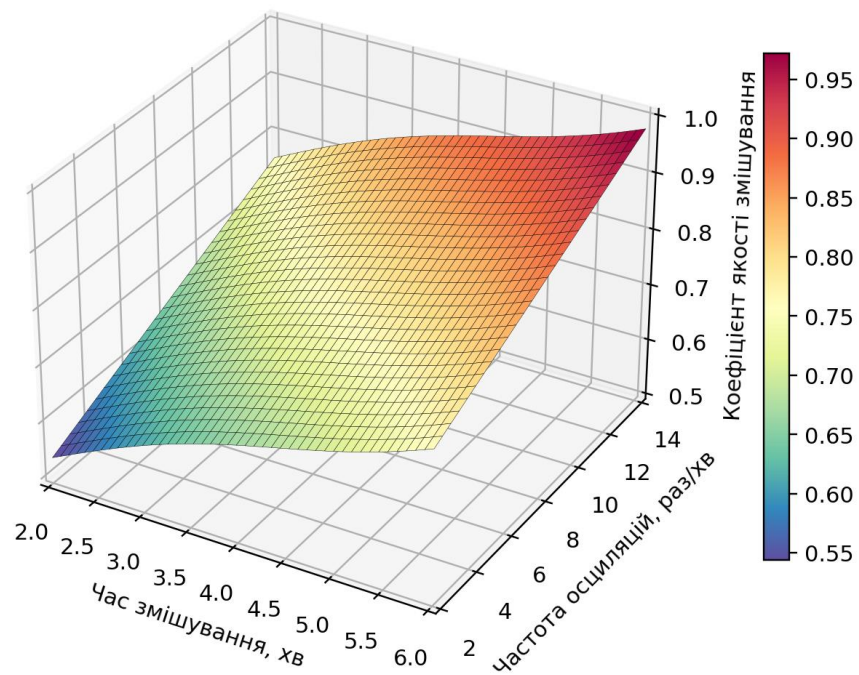


Рисунок 3.8 – Залежності коефіцієнта якості змішування від тривалості змішування та частоти осциляційного руху барабану

3.5 Дослідження впливу осциляційного руху барабана на процес змішування бетонної суміші

Для аналізу впливу осциляційного руху барабана на якість змішування бетонної суміші проведено експериментальні дослідження на дослідному зразку гравітаційного бетонозмішувача. Основну увагу приділено визначенню впливу частоти осциляційного руху, тривалості змішування, частоти обертання барабана на ступінь однорідності отриманого складу.

Дослідження дозволяють встановити закономірності зміни показників ефективності змішування залежно від технологічних режимів роботи змішувача з осциляційним рухом барабану. Експериментальна установка та методика проведення дослідів детально описані нижче.

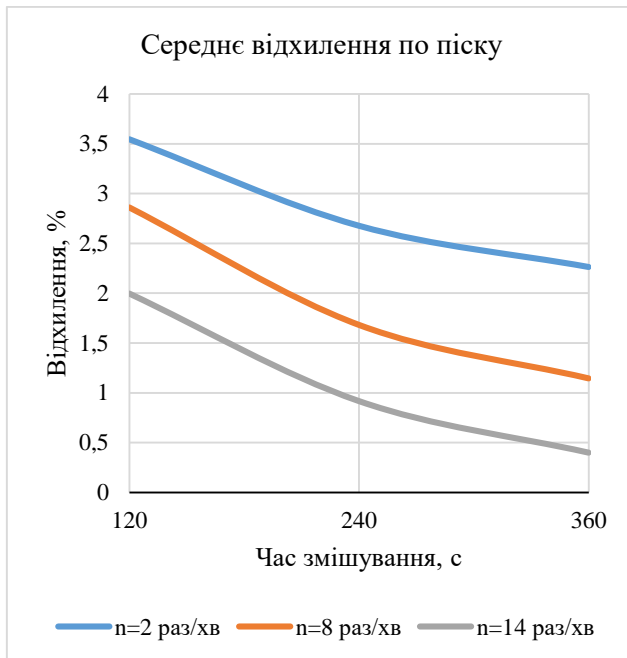
У таблиці 3.3 наведено результати випробувань на однорідність бетонної суміші залежно від частоти осциляційного руху барабана та тривалості змішування.

Таблиця 3.3 – Однорідність бетонної суміші при різних режимах осциляційного руху барабана та тривалості змішування

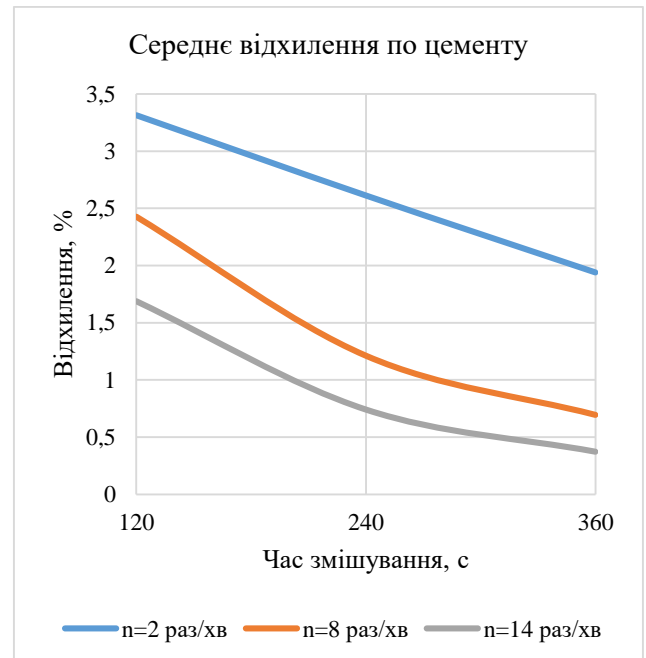
Частота осциляцій n , ХВ^{-1}	Тривалість змішування, t , с	Середнє значення маси компонентів, г				Середнє відхилення від середнього значення, %			
		пісок m_n^{cp}	цемент $m_{ц}^{cp}$	вода $m_{в}^{cp}$	щебінь $m_{щ}^{cp}$	пісок	цемент	вода	щебінь
2	120	600,03	300,01	150,00	1200,05	3,546	3,315	3,333	3,5
	240	608,02	304,04	152,01	1216,02	2,677	2,613	1,316	3,244
	360	618,67	309,33	154,67	1237,33	2,263	1,94	0,982	2,613
8	120	613,33	306,67	153,33	1226,67	2,862	2,428	1,389	3,119
	240	629,33	314,67	157,33	1258,67	1,683	1,212	0,965	1,844
	360	641,01	318,02	161,00	1282,01	1,146	0,694	0,695	1,254
14	120	634,67	317,33	158,67	1269,33	1,996	1,687	0,992	2,330
	240	642,67	321,33	160,67	1285,33	0,916	0,741	0,438	1,059
	360	656,00	328,00	164,00	1312,00	0,398	0,373	0,305	0,610

З метою аналізу закономірностей зміни показників однорідності бетонної суміші та більш наочного представлення результатів експериментальних

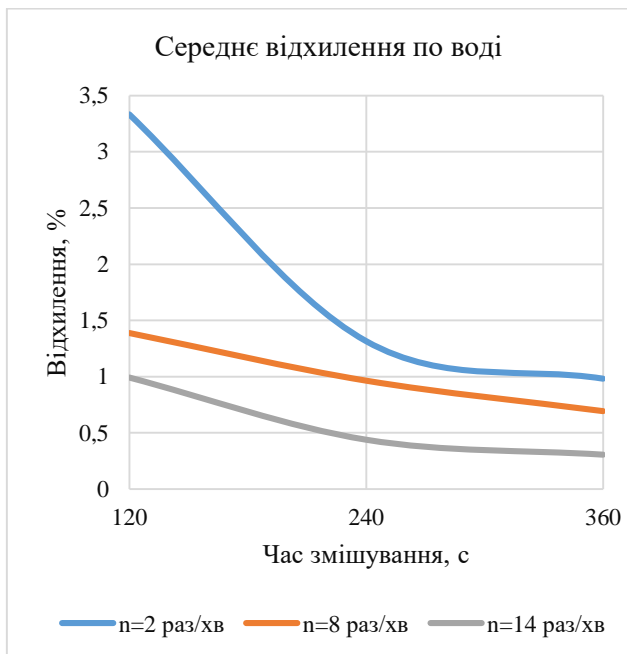
досліджень за даними таблиці 3.3 побудовано графічні залежності коефіцієнта нерівномірності розподілу компонентів від режимних параметрів роботи бетонозмішувача.



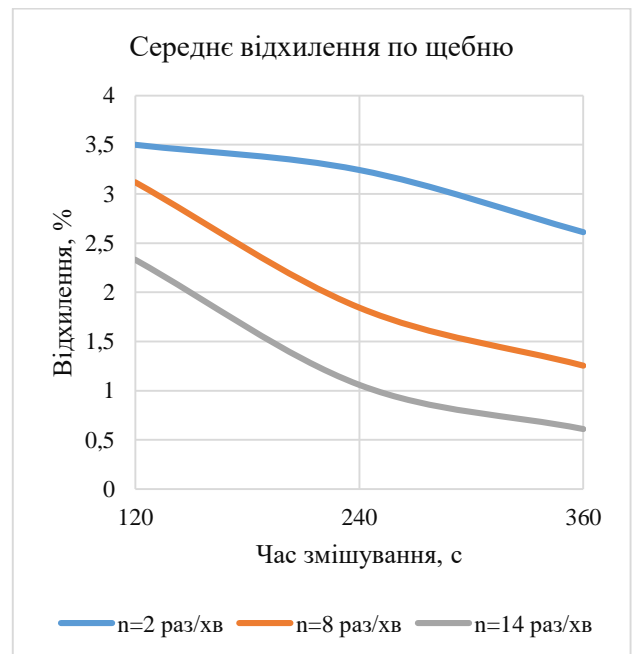
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.9 – Залежність коефіцієнта нерівномірності розподілу компонентів бетонної суміші від часу змішування:

а – пісок (3%); б – цемент (2%); в – вода (1%); г – щебінь (3%)

Аналіз отриманих експериментальних та графічних залежностей показав, що найбільш раціональні режими роботи бетонозмішувача з осциляційним рухом барабана відповідають частоті осциляцій у межах 8–12 хв⁻¹ та частоті обертання барабана 30–45 об/хв. У зазначеному діапазоні забезпечується інтенсивне перемішування компонентів бетонної суміші та досягаються мінімальні значення коефіцієнта нерівномірності їх розподілу. Встановлено, що подальше збільшення частоти осциляцій і частоти обертання барабана супроводжується незначним покращенням показників однорідності суміші, тоді як енерговитрати та динамічні навантаження на елементи конструкції продовжують зростати.

У таблиці 3.4 наведено результати випробувань на однорідність бетонної суміші залежно від частоти осциляційного руху барабана та амплітуди зміни кута нахилу.

Таблиця 3.4 – Однорідність бетонної суміші при різних значеннях частоти осциляційного руху барабана та амплітуди зміни кута нахилу

Частота осциляцій n , хв ⁻¹	Амплітуда зміни кута нахилу барабана, θ , градус	Середнє значення маси компонентів, г				Середнє відхилення від середнього значення, %			
		пісок m_n^{cp}	цемент m_u^{cp}	вода m_e^{cp}	щебінь $m_{щ}^{cp}$	пісок	цемент	вода	щебінь
2	10	624,03	312,07	156,01	1248,15	2,226	1,941	0,890	2,244
	25	629,32	314,67	157,33	1258,67	1,854	1,589	0,647	1,866
	40	634,67	317,33	158,67	1269,33	1,272	0,969	0,444	1,663
8	10	634,48	317,33	158,67	1269,37	1,488	1,167	0,700	1,942
	25	640,04	320,02	160,00	1280,03	1,181	0,816	0,417	1,411
	40	645,35	322,67	161,33	1290,68	0,826	0,522	0,298	1,075
14	10	645,23	322,67	161,33	1290,56	1,105	0,844	0,425	1,125
	25	650,67	325,33	162,67	1301,33	0,612	0,453	0,228	0,810
	40	656,05	328,02	164,04	1312,06	0,381	0,305	0,102	0,504

Для оцінки впливу амплітуди зміни кута нахилу барабана на процес перемішування бетонної суміші результати експериментальних досліджень,

наведені в таблиці 3.4, представлені у вигляді графічних залежностей.

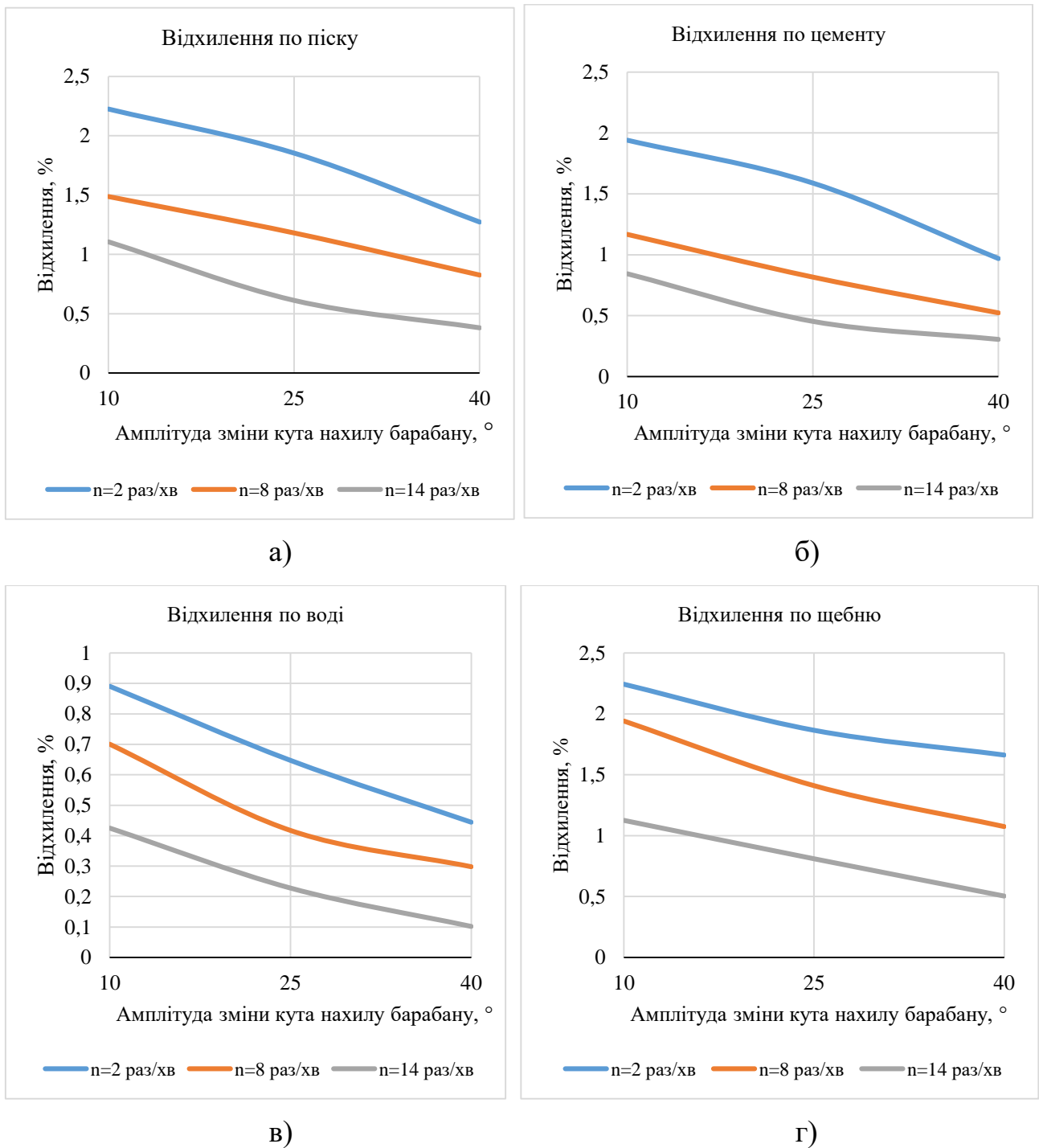


Рисунок 3.10 – Залежність коефіцієнта нерівномірності розподілу компонентів бетонної суміші від амплітуди зміни кута нахилу барабану: а – пісок (3%); б – цемент (2%); в – вода (1%); г – щебінь (3%).

Аналіз отриманих експериментальних та графічних залежностей показав, що раціональні режими роботи бетонозмішувача з осциляційним рухом барабана відповідають частоті осциляцій 8–14 хв⁻¹ та амплітуді зміни кута нахилу

барабана 25–35°. У зазначеному діапазоні забезпечуються найбільш сприятливі умови для переміщення та перерозподілу компонентів суміші, що супроводжується зменшенням коефіцієнта нерівномірності їх розподілу. Подальше збільшення інтенсивності осциляційного руху є менш ефективним з точки зору покращення показників однорідності, що свідчить про наближення процесу змішування до граничного рівня ефективності.

Основні результати дослідження представлені вище. Детальні дані значень мас компонентів по кожному дослідженню наведено в Додатку Б.

Результати аналізу отриманих експериментальних даних показали, що застосування осциляційного руху барабану при раціональних параметрах роботи бетонозмішувача призводить до підвищення якості суміші, та прибирає налипання.

Результати досліджень контрольних зразків-кубів на стиск з урахуванням віку (100% міцності у віці 28 діб), які були виготовлені із проб суміші (табл. 3.5) показали, що якість приготування бетонної суміші залежить від розподілу компонентів у масі суміші. При застосуванні осциляційного руху барабану досягається зменшення відсотку відхилення компонентів проби. Проби брались з спеціального бункера, так як взяти пробу безпосереднього з барабану змішувача є неможливим.



Рисунок 3.11 – Контрольні зразки-куби для випробування бетону на стиск

Таблиця 3.5 – Результати випробування зразків-кубів бетонної суміші на стиск

Частота осциляцій, $\Pi_1, \text{хв}^{-1}$	Амплітуда зміни кута нахилу барабану, θ , градус	Границя міцності при стисканні, σ_{cm} , МПа						Максимальне відхилення від середнього значення, %
		σ_{cm}^1	σ_{cm}^2	σ_{cm}^3	σ_{cm}^4	σ_{cm}^5	σ_{cm}^{cp}	
2	10	23,17	21,43	20,92	24,28	22,95	22,55	7,672
	25	22,81	24,63	24,27	23,74	24,98	24,086	5,298
	40	24,23	25,64	25,07	26,12	24,39	25,09	4,105
8	10	25,68	26,15	27,23	26,57	27,04	26,534	3,219
	25	27,53	28,96	27,85	28,61	28,32	28,254	2,562
	40	29,18	29,97	29,63	28,94	30,02	29,548	2,058
14	10	29,81	30,62	30,47	30,19	29,93	30,204	1,377
	25	31,79	32,48	32,37	32,16	31,75	32,11	1,152
	40	31,14	32,03	31,98	31,79	31,27	31,642	1,586

Результати випробувань контрольних зразків-кубів на стиск підтверджують позитивний вплив осциляційного руху барабана на якість бетонної суміші. Встановлено, що в діапазоні частоти осциляцій 8–14 хв⁻¹ та амплітуди зміни кута нахилу барабана 25–40° забезпечуються високі показники міцності бетону при мінімальному розкиді результатів. Це свідчить про підвищення однорідності суміші та ефективності процесу змішування.

3.6 Експериментальне дослідження споживаної потужності бетонозмішувача з осциляційним рухом барабана

Для проведення досліджень використовувався гравітаційний бетонозмішувач, який виконував функції експериментального стенда. Він був дообладнаний механізмом осциляційного руху барабана та засобами вимірювання споживаної електричної потужності, що дозволяло оцінювати енергоефективність процесу змішування. Загальний вигляд експериментального стенда наведено на рис. 3.12.



Рисунок 3.12 – Гравітаційний бетонозмішувач та засіб вимірювання споживаної потужності

Приготування бетонної суміші здійснювалося за регламентованого складу та рухливості, що забезпечувало відтворюваність експериментальних результатів. Процес завантаження компонентів відбувався поетапно у такій послідовності: вода, пісок, цемент, щебінь.

Робочий цикл бетонозмішувача було умовно поділено на окремі етапи, для кожного з яких зафіксовано характерні значення споживаної потужності. Узагальнені результати експериментальних вимірювань наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Зміна споживаної потужності гравітаційного бетонозмішувача протягом робочого циклу

Час, с	Етап роботи	Орієнтовна потужність, Вт
0-10	Холостий хід (робота без навантаження)	1080
10-120	Завантаження компонентів	1450
120-280	Процес перемішування	1700
280-300	Завершення змішування	1250

На основі наведених у таблиці даних побудовано графік зміни споживаної

потужності бетонозмішувача залежно від часу (рис. 3.13), який відображає динаміку навантаження електропривода протягом усього робочого циклу.

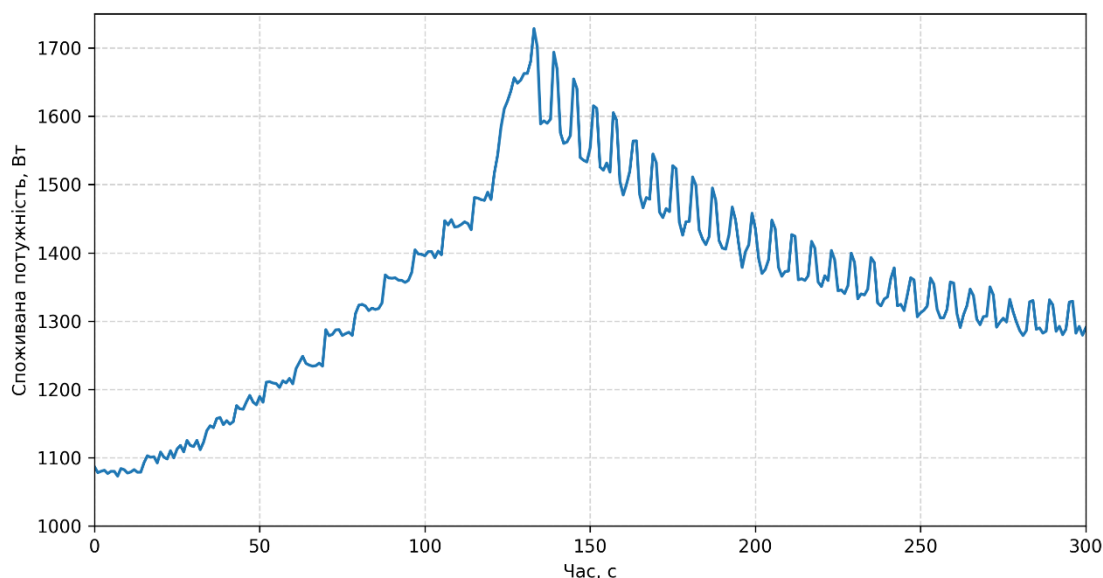


Рисунок 3.13 – Споживана потужність гравітаційного бетонозмішувача з осциляційним рухом барабана

Аналіз експериментального графіка показує, що на початковому етапі роботи бетонозмішувача, який відповідає холостому ходу, споживана потужність становить у середньому близько 1080 Вт. У процесі поетапного завантаження компонентів бетонної суміші спостерігається ступінчасте зростання потужності до 1450–1500 Вт. Такий характер зміни пояснюється послідовним завантаженням води, цементу, піску та щебеню, кожна порція яких збільшує масу суміші в барабані та опір її переміщенню.

Після завершення завантаження та введення осциляційного руху барабана потужність різко зростає і досягає максимальних значень 1700–1730 Вт. У цей період спостерігаються характерні пікові коливання навантаження, зумовлені одночасною дією обертального та осциляційного рухів барабана. Осциляції сприяють інтенсифікації перемішування, активізації внутрішньої циркуляції суміші та руйнуванню локальних зон накопичення компонентів.

У міру перебігу процесу змішування та підвищення однорідності бетонної суміші середній рівень споживаної потужності поступово зменшується. При

цьому на графіку зберігаються періодичні коливання, що відповідають осциляційному режиму роботи барабана з частотою близько 10 хв^{-1} . Амплітуда коливань поступово зменшується, що свідчить про зниження внутрішнього опору руху суміші та стабілізацію робочого процесу.

На завершальному етапі змішування потужність стабілізується на рівні 1280–1320 Вт. Отримані результати підтверджують, що введення осциляційного руху забезпечує інтенсифікацію процесу змішування, а характер зміни енергоспоживання може бути використаний для оцінювання поточного стану бетонної суміші та вибору раціональних режимів роботи бетонозмішувача.

3.7 Визначення продуктивності бетонозмішувача з осциляційним рухом барабана

Експериментальні дослідження процесів приготування бетонної суміші дозволили побудувати залежності продуктивності гравітаційного бетонозмішувача з осциляційним рухом барабана, від визначальних факторів – частоти осциляцій та амплітуди зміни кута нахилу барабану. Отримані результати дають змогу оцінити вплив кінематичних параметрів робочого процесу на енергетичну ефективність змішування та обґрунтувати раціональні режими роботи, за яких забезпечується ефективне використання потужності привода при збереженні необхідної якості приготування бетонної суміші.

Характер кривих, зображених на рис. 3.14, свідчить про зростання продуктивності бетонозмішувача із підвищенням частоти осциляцій барабана. Зі збільшенням інтенсивності осциляцій покращується циркуляція бетонної суміші всередині робочого об'єму, що сприяє швидшому досягненню однорідності та зменшенню тривалості процесу змішування. При цьому експериментальні дані характеризуються вищими значеннями продуктивності порівняно з теоретичними розрахунками, що може бути пояснено позитивним впливом додаткових коливальних рухів на ефективність перемішування та зниження втрат часу на формування потоків суміші. Робочим діапазоном доцільно вважати

частоту осциляцій 8-12 хв^{-1} , за якої досягається зростання продуктивності із мінімальними відхиленнями показників.

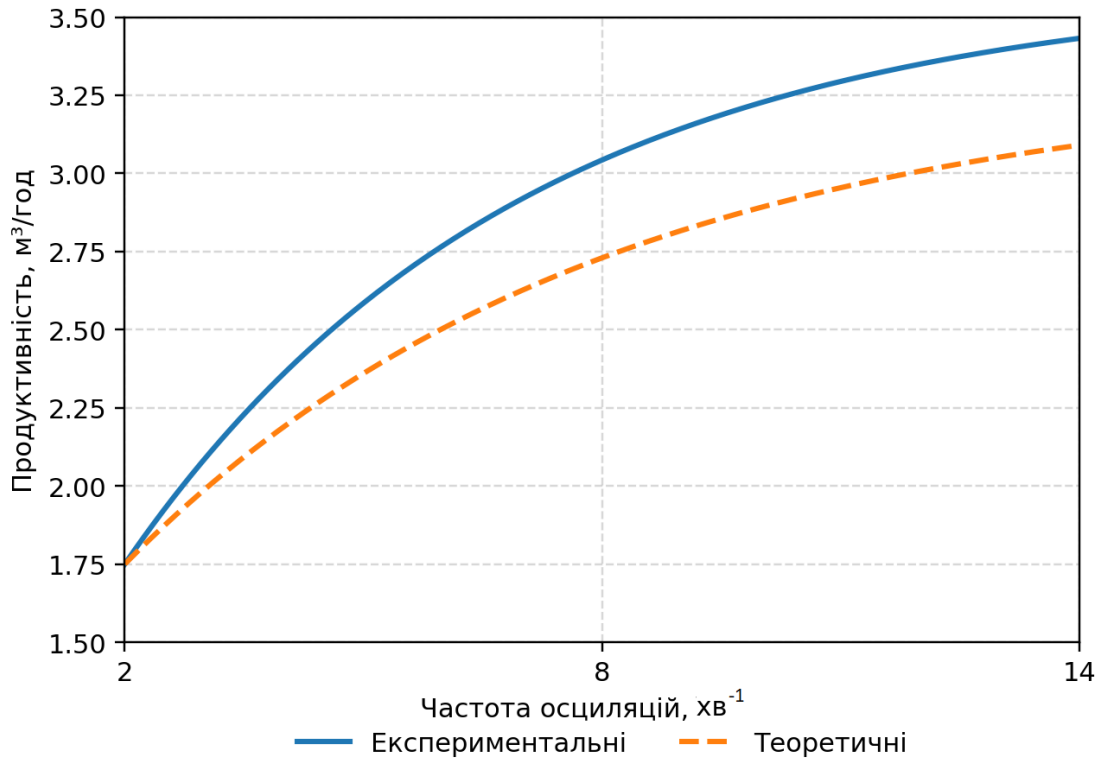


Рисунок 3.14 – Залежність продуктивності від частоти осциляцій барабану

Характер кривих, зображених на рисунку 3.15, свідчить про суттєвий вплив амплітуди зміни кута нахилу барабану на продуктивність процесу змішування. Для обох залежностей спостерігається зростання продуктивності зі збільшенням амплітуди від 10 до 25°, що пояснюється активізацією переміщення бетонної суміші в робочому об'ємі барабану та покращенням умов взаємного перемішування її компонентів.

Для експериментальної залежності інтенсивне зростання продуктивності спостерігається до амплітуди близько 25–30°, після чого приріст поступово зменшується і крива наближається до стабілізації. Це свідчить про наближення процесу до режиму, за якого подальше збільшення амплітуди не забезпечує суттєвого підвищення ефективності змішування.

Розбіжність між теоретичними та експериментальними даними незначна, що підтверджує адекватність прийнятих теоретичних передумов та можливість використання розробленої моделі для оцінювання впливу амплітуди зміни кута нахилу барабану при осциляціях на продуктивність бетонозмішувача.

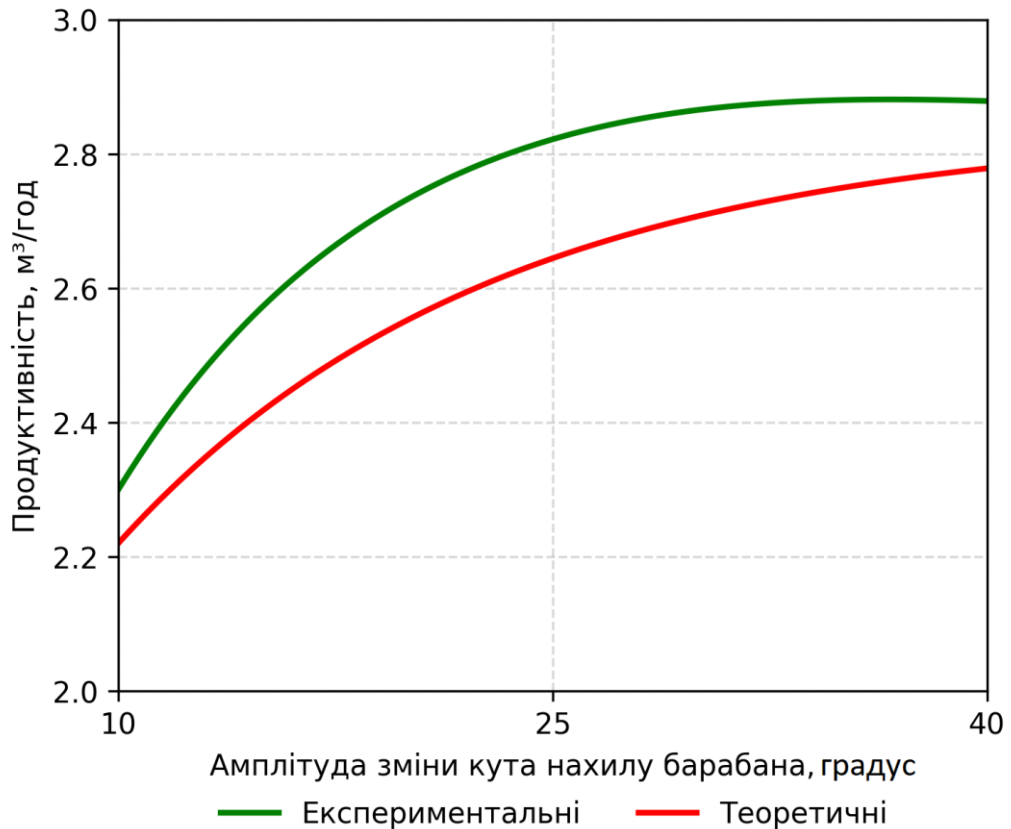


Рисунок 3.15 – Залежність продуктивності від амплітуди зміни кута нахилу барабану

Отримані результати свідчать, що найбільш доцільним є використання амплітуди зміни кута нахилу барабану в межах 20–30°, за якої забезпечується висока продуктивність процесу змішування та зберігається стабільний режим роботи обладнання без істотного зростання енергетичних витрат.

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень для гравітаційного бетонозмішувача з осциляційним рухом барабану встановлено раціональні параметри роботи: частота осциляцій 8–12 хв⁻¹ та амплітуда зміни кута нахилу барабану 20–30°. У зазначених межах досягаються найкращі показники інтенсивності змішування та продуктивності обладнання.

Порівняння теоретичних і експериментальних результатів показало, що розбіжність між ними не перевищує 10 %, що підтверджує адекватність розроблених математичних моделей та достовірність отриманих залежностей.

3.8 Висновки до розділу 3

У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено основні закономірності впливу конструктивних і технологічних параметрів гравітаційного бетонозмішувача з осциляційним рухом барабана на процес приготування бетонної суміші.

1. Розроблено та реалізовано програму експериментальних досліджень, яка передбачала проведення чотирьохфакторного експерименту для визначення впливу амплітуди зміни кута нахилу барабана, частоти його обертання, частоти осциляцій та тривалості змішування на коефіцієнт якості змішування бетонної суміші.

2. Встановлено, що застосування осциляційного руху барабана забезпечує підвищення однорідності бетонної суміші та інтенсифікацію процесу перемішування. Зі збільшенням частоти осциляцій до 8–12 хв⁻¹ зменшується нерівномірність розподілу компонентів суміші та підвищується коефіцієнт якості змішування.

3. Експериментально визначено раціональні параметри роботи бетонозмішувача: амплітуда зміни кута нахилу барабана 20–25°, частота обертання 35–45 об/хв, частота осциляцій 8–12 хв⁻¹ та тривалість змішування 3–4 хв. За цих умов забезпечуються найкращі показники однорідності бетонної суміші та ефективності змішування.

4. За результатами випробувань контрольних зразків-кубів на стиск встановлено, що підвищення однорідності бетонної суміші супроводжується зростанням міцності бетону. Найвищі значення міцності досягалися при частоті осциляцій 8–14 хв⁻¹ та амплітуді зміни кута нахилу барабана 25–40°, при мінімальному розкиді результатів між зразками.

5. Під час аналізу енергетичних характеристик встановлено, що найбільші значення споживаної потужності спостерігаються на етапі завантаження компонентів та під час введення осциляційного руху барабана. У процесі змішування зі зростанням однорідності суміші потужність поступово зменшується та стабілізується на рівні близько 1250–1300 Вт.

6. Визначено залежності продуктивності від частоти осциляцій та амплітуди зміни кута його нахилу. Найбільші значення продуктивності досягаються при частоті осциляцій 8–12 хв⁻¹, частоті обертання 35–40 об/хв та амплітуді зміни кута нахилу барабана 25–40°.

7. Розбіжність між результатами експериментальних досліджень та теоретичними розрахунками не перевищує 10 %, що підтверджує адекватність розробленої математичної моделі та достовірність отриманих результатів.

РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ У ТЕХНІЧНУ ПРАКТИКУ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ БЕТНОЗМІШУВАЧА

4.1 Розроблення та впровадження способу змішування бетонних сумішей

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено принципову та конструктивну схему автономного універсального мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетонних сумішей та апробовано новий спосіб їх змішування з використанням осциляційного руху барабана. На відміну від традиційних гравітаційних бетонозмішувачів, де перемішування здійснюється виключно за рахунок обертання барабана навколо своєї осі, у даному обладнанні передбачено періодичну зміну кута нахилу барабана в обидва напрямки на величину 20-25°. Такий осциляційний рух барабана створює більш сприятливі умови для взаємодії компонентів бетонної суміші та забезпечує формування однорідної структури суміші при раціональній тривалості процесу змішування.

Запропонований спосіб змішування розроблено з урахуванням закономірностей руху частинок бетонної суміші в барабані гравітаційного типу, виявлених у ході досліджень. За умов традиційного обертання барабана рух матеріалу має переважно циркуляційний характер у межах окремих шарів, що знижує інтенсивність взаємодії між компонентами та може спричинити утворення зон нерівномірного розподілу компонентів. У розробленому обладнанні ці недоліки мінімізуються завдяки періодичній зміні кута нахилу барабана, що забезпечує більш рівномірний перерозподіл суміші та підвищує ефективність процесу змішування.

Циклічна зміна положення барабана зумовлює зміну напрямків руху шарів бетонної суміші та формування більш різноманітних траєкторій їх переміщення. Це поєднує гравітаційне переміщення матеріалу з його осциляційним рухом, що

забезпечує інтенсивніше перемішування. У результаті підвищується рівномірність розподілу компонентів у робочому об'ємі та зменшується ймовірність утворення зон неоднорідності.

Основні технічні характеристики бетонозмішувального обладнання, на базі якого реалізовано запропонований спосіб змішування, наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Технічна характеристика бетонозмішувального обладнання, у якому реалізовано спосіб змішування з періодичною зміною кута нахилу барабана

Найменування показників	Одиниці виміру	Значення показників
Тип бетонозмішувача	-	Гравітаційний, циклічної дії
Ємність барабана	м ³	0,2
Об'єм готової суміші	м ³	0,12
Частота обертання барабана	об/хв	35-45
Амплітуда зміни кута нахилу	градус	20-25
Частота осциляцій барабану	хв ⁻¹	10-12
Потужність приводного електродвигуна	кВт	2,2
Час одного циклу змішування	хв	5-6
Коефіцієнт однорідності суміші	-	0,92-0,97

Запропоноване бетонозмішувальне обладнання реалізовано у вигляді дослідного зразка, який пройшов випробування в лабораторних умовах Полтавської політехніки (рис. 4.1). Результати експериментальних досліджень показали, що при однакових обертах барабана та заданому складі бетонної суміші коефіцієнт однорідності підвищується на 10-15 % порівняно з традиційним гравітаційним змішуванням, а тривалість приготування бетонної суміші зменшується на 20-25 %. Отримані результати свідчать про підвищення технологічної та енергетичної ефективності запропонованого способу.

У ході досліджень встановлено, що зміна кута нахилу барабана під час його обертання формує комбіновану дію гравітаційних та інерційних сил, унаслідок чого в робочому об'ємі виникають різноспрямовані траєкторії руху суміші. Це

забезпечує активніше перемішування шарів матеріалу та сприяє досягненню високого ступеня однорідності бетонної суміші за оптимізованої тривалості процесу змішування, що є важливим для подальшого застосування обладнання.



Рисунок 4.1 – Дослідний зразок бетонозмішувального обладнання з осциляційним рухом барабана

Отримані результати лабораторних досліджень потребують подальшої перевірки в умовах реального виробництва. Порівняння експериментальних даних із виробничими випробуваннями дозволить підтвердити достовірність висновків та оцінити ефективність обладнання в практичному застосуванні.

4.2 Виробничі випробування способу змішування бетонних сумішей

Виробничі випробування запропонованого способу змішування бетонних сумішей проводилися в умовах будівельного майданчику під час виконання бетонних робіт із ремонту фундаментів житлових споруд. Для досліджень застосовувався гравітаційний бетонозмішувач, обладнаний механізмом

періодичної зміни кута нахилу барабана, що забезпечує реалізацію осциляційного режиму змішування.

Приготування бетонної суміші здійснювалося з використанням портландцементу марки М500, річкового піску, щебеню фракції 5-20 мм та води. Співвідношення компонентів відповідало рецептурі бетону класу В25, який широко застосовується при будівництві малих об'єктів. Обладнання працювало в автономному режимі з живленням від електрогенератора потужністю 6,2 кВт, що підтвердило можливість його ефективного використання в польових умовах за відсутності стаціонарного електропостачання.

Об'єм бетонної суміші в одному циклі завантаження становив 0,25 м³. Частота обертання барабана під час випробувань підтримувалася на рівні 30 об/хв, частота осциляцій – 10 хв⁻¹ при амплітуді зміни кута нахилу 25°. Робота обладнання регулювалася за допомогою трифазного частотного перетворювача. Тривалість одного циклу змішування складала 5 хвилин, що відповідає режимам, визначеним у результаті попередніх експериментальних досліджень.

З метою оцінки ефективності застосування розробленого способу змішування бетонних сумішей у виробничих умовах було здійснено його впровадження на конкретних об'єктах виконання будівельних робіт. Таке впровадження дало змогу дослідити роботу способу в тривалому режимі, оцінити надійність технологічного процесу, зручність експлуатації та якість приготованої бетонної суміші в умовах реальної діяльності будівельних організацій.

Розроблений спосіб змішування бетонних сумішей було впроваджено в умовах будівельного майданчика на базі житлово-будівельного кооперативу «Ворскла» (м. Полтава, вул. Ігоря Дорошенка, 31), де виконувалися бетонні роботи в рамках ремонтно-відновлювальних заходів на об'єктах житлового призначення. Обраний об'єкт характеризувався обмеженими умовами доступу до стаціонарних джерел електроживлення, що створювало передумови для використання автономного бетонозмішувального обладнання.

Впровадження здійснювалося безпосередньо на будівельному майданчику під час виконання робіт з приготування бетонних сумішей для ремонтів фундаментних елементів, заповнення монтажних і технологічних швів, а також виконання локальних бетонних робіт малої механізації. Приготована бетонна суміш використовувалася безпосередньо після змішування, без додаткового транспортування, що дозволило оцінити якість суміші в умовах реального технологічного циклу.

У процесі впровадження застосовувався дослідно-промисловий зразок гравітаційного бетонозмішувача циклічної дії з осциляційним рухом барабана. Обладнання працювало в автономному режимі з живленням від генератора змінного струму, що забезпечувало незалежність від зовнішніх мереж живлення та дозволяло експлуатувати установку безпосередньо в зоні виконання робіт. Об'єм одного замісу становив близько $0,25 \text{ м}^3$, що відповідало вимогам до обсягів бетонування на об'єкті.

Робота бетонозмішувача здійснювалася в режимах, визначених за результатами попередніх експериментальних досліджень: частота обертання барабана підтримувалася в 40 об/хв , частота осциляцій становила 10 хв^{-1} , амплітуда зміни кута нахилу барабана досягала 25° , а тривалість одного циклу змішування складала в середньому 5 хв . У зазначених режимах обладнання працювало надійно, без збоїв у роботі приводу та механізму зміни положення барабана.

Загальна тривалість експлуатації бетонозмішувача на об'єкті становила кілька тижнів, протягом яких було виконано серію послідовних циклів приготування бетонної суміші. За цей період не було зафіксовано відмов механізмів, підвищених вібрацій або перегріву елементів приводу, що підтверджує надійність конструкції та її придатність до тривалої роботи в умовах будівельного майданчика.

Практичні результати впровадження показали, що використання осциляційного руху барабана забезпечує отримання бетонної суміші з високим ступенем однорідності та стійкими технологічними властивостями. Суміш легко

укладалася, не проявляла ознак розшарування або грудкування, а її якість відповідала вимогам чинних нормативних документів. За відгуками обслуговуючого персоналу, процес експлуатації бетонозмішувача відзначався зручністю, а зміна кута нахилу барабана сприяла зменшенню трудомісткості робіт і підвищенню продуктивності.

Таким чином, результати впровадження розробленого способу змішування бетонних сумішей на базі ЖБК «Ворскла» підтвердили його практичну доцільність, ефективність та можливість використання в умовах будівельного майданчика при виконанні бетонних робіт малої механізації.

Розроблений спосіб змішування бетонних сумішей також було впроваджено на базі ТОВ «Виробниче підприємство “Будмеханізація”», яке спеціалізується на виконанні будівельних і ремонтно-відновлювальних робіт, а також виготовленні та експлуатації будівельного обладнання. Впровадження проводилося безпосередньо в умовах будівельного майданчика під час виконання робіт з відновлення конструктивних елементів і підпірних споруд, а також при улаштуванні бетонних стяжок різного призначення.

Запропонований спосіб змішування бетонних сумішей використовувався без зміни загальної організації виробничого процесу, що дозволило оцінити його ефективність у стандартних умовах експлуатації підприємства. Бетонні суміші готувалися безпосередньо на місці виконання робіт з використанням гравітаційного бетонозмішувача циклічної дії, у якому реалізовано осциляційний рух барабана за рахунок періодичної зміни кута його нахилу. Такий підхід забезпечив приготування бетонних сумішей у необхідних обсягах без потреби у додаткових витратах на транспортування.

У процесі впровадження бетонозмішувальне обладнання працювало в умовах тривалого навантаження під час послідовного виконання технологічних операцій. Приготована бетонна суміш використовувалася для влаштування стяжок, відновлення пошкоджених ділянок конструкцій та заповнення конструктивних порожнин, що вимагало відтворюваних властивостей суміші та її високої однорідності протягом усього робочого циклу. Робота обладнання

характеризувалася відсутністю перевантажень та надійним функціонуванням механізмів приводу.

Результати впровадження показали, що застосування вдосконаленого способу змішування забезпечує зменшення тривалості приготування бетонної суміші, підвищення її однорідності та зростання продуктивності виконання бетонних робіт. Отримана суміш характеризувалася рівномірною структурою, відсутністю розшарування та стійкі технологічними властивостями, що позитивно позначалося на якості виконуваних будівельних операцій.

Важливим результатом виробничих випробувань стало підтвердження можливості ефективного використання запропонованого способу змішування без ускладнення технологічного процесу та без необхідності додаткового технічного обслуговування обладнання. Скорочення тривалості технологічних операцій та підвищення якості бетонної суміші сприяли загальному підвищенню ефективності виконання робіт на об'єкті.

Таким чином, результати впровадження способу змішування бетонних сумішей на будівельному майданчику на базі ТОВ «Виробниче підприємство “Будмеханізація”» підтвердили його доцільність, практичну ефективність та можливість використання в умовах реального будівельного виробництва при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт.

4.3 Порівняльний аналіз роботи розробленого обладнання та гравітаційного бетонозмішувача

Для оцінки ефективності запропонованого способу було проведено порівняння роботи гравітаційного бетонозмішувача з реалізованим осциляційним рухом барабана та традиційного гравітаційного бетонозмішувача аналогічної місткості, у якому процес перемішування здійснювався виключно за рахунок обертального руху барабана без зміни його кута нахилу. Основними критеріями порівняння виступали: коефіцієнт однорідності бетонної суміші, тривалість циклу приготування, споживана потужність, якість ущільнення

суміші під час укладання, а також зручність обслуговування та надійність роботи механізмів. Результати виробничих випробувань наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Порівняльні показники роботи бетонозмішувачів з традиційним та осциляційним способом змішування

Показник	Одиниці виміру	Традиційне змішування	Осциляційне змішування
Об'єм одного циклу	м ³	0,25	0,25
Тривалість змішування	хв	7	4
Частота обертання барабана	об/хв	40	40
Частота зміни кута нахилу	хв ⁻¹	-	10
Амплітуда зміни кута	градус	-	25
Коефіцієнт однорідності суміші	-	0,86	0,95
Енергоспоживання за цикл	кВт*год	0,24	0,2
Залишки матеріалу на стінках барабана	%	6,5	2,1
Витрати ручної праці	людино*год/м ³	0,35	0,28

Аналіз отриманих даних показав, що застосування способу змішування з осциляційним рухом барабана забезпечує суттєве підвищення ефективності процесу приготування бетонної суміші. Зокрема, коефіцієнт однорідності зростає в середньому на 10-12 %, а тривалість змішування скорочується на 25...30 % порівняно з традиційним гравітаційним змішуванням. При цьому енергоспоживання установки зменшується на 15-20 %, що пояснюється більш рівномірним розподілом навантаження на барабан і зниженням втрат потужності на подолання внутрішнього тертя суміші.

Випробування також засвідчили, що запропонований спосіб дозволяє досягати високого ступеня однорідності бетонної суміші навіть при знижених обертах барабана, що є особливо важливим при роботі з малорухомими бетонними складами. У процесі експлуатації обладнання відзначено надійну роботу механізмів, відсутність надмірних механічних перевантажень та можливість тривалого використання без додаткового технічного обслуговування.



Рисунок 4.2 – Стан бетонної суміші у барабані після змішування з періодичною зміною кута нахилу

Таким чином, результати виробничих випробувань підтвердили доцільність і практичну ефективність запропонованого способу змішування бетонних сумішей. Виявлені переваги – зниження енерговитрат, підвищення однорідності та скорочення тривалості змішування – свідчать про можливість успішного впровадження розробленого способу в малогабаритні автономні бетонозмішувальні установки для широкого застосування в будівництві, зокрема при виконанні індивідуальних, ремонтних і тимчасових робіт.

Результати впровадження розробленого способу змішування бетонних сумішей у виробничу діяльність підприємств підтверджуються актами впровадження, які наведені в додатку В.

4.4. Висновки до розділу 4

1. У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено принципову та конструктивну схему автономного універсального мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетонних сумішей та

апробовано новий спосіб їх змішування з використанням осциляційного руху барабана.

2. Виробничі випробування засвідчили, що застосування способу з осциляційним рухом барабана забезпечує підвищення коефіцієнта однорідності бетонної суміші на 10–12 %, скорочення тривалості змішування на 25–30 % та зменшення енергоспоживання на 15–20 % порівняно з традиційним гравітаційним змішуванням.

3. Впровадження способу змішування бетонних сумішей на базі ЖБК «Ворскла» (м. Полтава) та ТОВ «Виробниче підприємство "Будмеханізація"» підтвердило надійність роботи обладнання, високу якість приготованої бетонної суміші та доцільність його застосування в умовах будівельного майданчику.

4. Отримані результати, підтверджені відповідними актами впровадження, доводять ефективність розробленого способу змішування та підтверджують можливість його широкого практичного використання в автономних малогабаритних бетонозмішувальних установках при виконанні індивідуальних, ремонтно-відновлювальних та маломасштабних бетонних робіт.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що використання осциляційного руху барабана гравітаційного бетонозмішувача забезпечує інтенсифікацію переміщення частинок бетонної суміші в робочому об'ємі змішувача, сприяє зменшенню застійних зон та підвищенню однорідності суміші.

2. Розроблено математичну модель процесу змішування бетонної суміші в гравітаційному бетонозмішувачі з осциляційним рухом барабана, яка враховує переміщення суміші вздовж лопатки та по довжині барабана і дозволяє оцінювати вплив кінематичних параметрів робочого органу на формування однорідності суміші.

3. Розроблено принципову та конструктивну схему автономного універсального мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетонних сумішей, яка забезпечує виконання повного технологічного циклу в умовах будівельного майданчика.

4. Установлено закономірності впливу частоти обертання барабана, частоти осциляцій, амплітуди зміни кута нахилу барабана та тривалості змішування на коефіцієнт однорідності суміші, продуктивність, коефіцієнт корисної дії, міцність бетону та енергоспоживання бетонозмішувача.

5. Обґрунтовано раціональні параметри роботи бетонозмішувача з осциляційним рухом барабана: амплітуда зміни кута нахилу барабана $25\text{--}35^\circ$, частота обертання $35\text{--}45$ об/хв, частота осциляцій $8\text{--}12$ хв⁻¹ та тривалість змішування $3\text{--}4$ хв, за яких забезпечуються високі показники однорідності бетонної суміші, продуктивності та енергетичної ефективності.

6. Встановлено закономірності зміни енергоспоживання бетонозмішувача залежно від параметрів осциляційного руху барабана, що дало змогу визначити раціональні режими роботи обладнання з урахуванням показників продуктивності та енергоефективності.

7. Експериментально підтверджено, що застосування осциляційного руху барабана забезпечує підвищення коефіцієнта однорідності бетонної суміші на

10-12 %, скорочення тривалості змішування на 25-30 % та зменшення енерговитрат на 15-20 % порівняно з традиційним гравітаційним способом змішування.

8. Доведено ефективність використання розробленого способу змішування бетонних сумішей на будівельному майданчику, що підтверджено результатами під час виконання будівельних і відновлювальних робіт на об'єктах ЖБК «Ворскла» та ТОВ «Виробниче підприємство «Будмеханізація»».

Список використаних джерел

1. DeRousseau, M. A., Kasprzyk, J. R., & Srubar, W. V. (2018). Computational design optimization of concrete mixtures: A review. *Cement and Concrete Research*, 109, 42–53. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.007>
2. Назаренко І.І., Клименко М.О. (2020) Застосування узагальнених критеріїв енергетичної оцінки робочого процесу перемішування будівельних сумішей. *Вісник ХНАДУ*, 88, 37-42.
<https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.37>
3. Jiapeng Yang, Hua Zeng, Tongqing Zhu, Qi An (2017). Study on the dynamic performance of concrete mixer's mixing drum. *Mechanical Sciences* 1 (8), 165-178. <https://doi.org/10.5194/ms-8-165-2017>
4. Kamble, R., Baredar, P., Kumar, A., & Gupta, B. (2021). New Approach for Evaluating Different Concrete Mixer Based on Concrete Slurry Property. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 637–650.
https://doi.org/10.1007/978-981-15-9678-0_55
5. Cazzulani, G., Ghielmetti, C., Giberti, H., Resta, F., & Ripamonti, F. (2011). Overview on the truck mounted concrete boom pump: a dynamic numerical model for active control logic definition. *IFAC Proceedings Volumes*, 44(1), 4232–4237. <https://doi.org/10.3182/20110828-6-it-1002.02072>
6. Amruta K. Wankhede, A.R. Sahu (2015). Design, Modification and Analysis of Concrete Mixer Machine. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 3(12), 6613–6616.
<https://doi.org/10.17762/ijritcc.v3i12.5105>
7. Zhang, H., & Palaoag, T. (2024). Analysis of key parameters of continuous concrete mixer based on discrete element. In *Third International Conference on Mechatronics and Mechanical Engineering (ICMME 2024)*, 13220, 149-156. <https://doi.org/10.1117/12.3037855>

8. Bilgil, A. (2011). Estimation of slump value and Bingham parameters of fresh concrete mixture composition with artificial neural network modelling. *Scientific Research and Essays*, 6(8), 1753-1765. <https://doi.org/10.5897/SRE10.415>
9. Behrooz Jadidi, Ebrahimi, M., Farhad Ein-Mozaffari, & Lohi, A. (2023). Effect of the Mixer Design Parameters on the Performance of a Twin Paddle Blender: A DEM Study. *Processes*, 11(3), 733–733. <https://doi.org/10.3390/pr11030733>
10. Statsenko, V., Burmistenkov, O., Bila, T., & Demishonkova, S. (2021). Determining the loose medium movement parameters in a centrifugal continuous mixer using a discrete element method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7 (111)), 59–67. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232636>
11. Shirzadi Javid, A. A., Ghoddousi, P., Aghajani, S., Naseri, H., & Hossein Pour, S. (2020). Investigating the Effects of Mixing Time and Mixing Speed on Rheological Properties, Workability, and Mechanical Properties of Self-Consolidating Concretes. *International Journal of Civil Engineering*, 19(3), 339–355. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00562-z>
12. Mazanec, O., Lowke, D., & Schießl, P. (2009). Mixing of high performance concrete: effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time. *Materials and Structures*, 43(3), 357–365. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9494-y>
13. Zhang, J., Huang, Y., Wang, Y., & Ma, G. (2020). Multi-objective optimization of concrete mixture proportions using machine learning and metaheuristic algorithms. *Construction and Building Materials*, 253, 119208. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119208>
14. Hua, X., & Shultis, K. (2021). Kinematics of cohesive and elongated particulate materials in a vertical axis mixer. *Powder Technology*, 386, 540–546. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.03.030>
15. Блажко В. В., Аніщенко А. І., Саєнко Л. В., Григорків О. Б. (2024). Малогабаритні комплекси для виготовлення будівельних сумішей різноманітного призначення. *Вісник ХНАДУ*, 104, 70-74. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2024.104.1.70>

16. Ahmed, Mohd., Islam, S., Nazar, S., & Khan, R. A. (2015). A Comparative Study of Popular Concrete Mix Design Methods from Qualitative and Cost-Effective Point of View for Extreme Environment. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4), 1403–1412. <https://doi.org/10.1007/s13369-015-1946-9>
17. Nicolò Beccati, & Ferrari, C. (2020). Predicting the capacity of an off-road self-loading drum mixer with different concrete consistencies through three-dimensional fluid dynamics analysis. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(7). <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02464-6>
18. Zhao, L.-y., Li, P., & Liu, F.-x. (2021). Structural design of spiral blade of concrete mixer truck. *Journal of Physics: Conference Series*, 1820(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012041>
19. Онищенко, О. Г., Матвієнко, А. М., & Вірченко, В. В. (2009). Малогабаритна розчинозмішувальна установка з гідравлічним приводом. *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*, 23(1), 24–28.
20. Кабусь, А. (2018). Проблеми збереження рухливості бетонної суміші під час транспортування. *Науковий вісник будівництва*, 92(2), 214–219. <https://doi.org/10.29295/2311-7257-2018-92-2-214-219>
21. Jon Elvar Wallevik, Olafur Haralds Wallevik (2020). Concrete mixing truck as a rheometer. *Cement and Concrete Research*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105930>
22. Alireza Mokhtar, Mohsen Nasooti (2020). A decision support tool for cement industry to select energy efficiency measures. *Energy Strategy Reviews*, 28. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100458>
23. Tan, Y., Deng, R., Feng, Y., Zhang, H., & Jiang, S. (2015). Numerical study of concrete mixing transport process and mixing mechanism of truck mixer. 32(4), 1041–1065. <https://doi.org/10.1108/ec-04-2014-0097>
24. Ma, H., & Zhao, Y. (2017). Modelling of the flow of ellipsoidal particles in a horizontal rotating drum based on DEM simulation. *Chemical Engineering Science*, 172, 636–651. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.07.017>

25. Lin, C.-M., & Chang, Y.-W. (2020). Optimization designation of static mixer geometry considering mixing effect. *Microsystem Technologies*, 27(3), 883–892. <https://doi.org/10.1007/s00542-020-04962-y>
26. Valigi, M. C., Logozzo, S., & Galletti, L. (2018). Effect of Design Parameters and Operating Conditions in Concrete Twin Shaft Mixers. *Mechanisms and Machine Science*, 424–431. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03320-0_46
27. Widhate, P., Zhu, H., Zeng, Q., & Dong, K. (2020). Mixing of Particles in a Rotating Drum with Inclined Axis of Rotation. *Processes*, 8(12), 1688. <https://doi.org/10.3390/pr8121688>
28. Sharifi, E., Sadjadi, S., Aliha, M., & Moniri, A. (2020). Optimization of high-strength self-consolidating concrete mix design using an improved Taguchi optimization method. *Construction and Building Materials*, 236, 117547. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117547>
29. Ferrari C, Beccati N, Magri L. Numerical Mixing Index: Definition and Application on Concrete Mixer. *Fluids*. 2025; 10(3):72. <https://doi.org/10.3390/fluids10030072>
30. Anishchenko, A., Blazko, V., Aleinikova, A., & Salenko, Y. (2024). Technological equipment package for preparing polystyrene concrete mixture. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(62), 79–84. <https://doi.org/10.26906/znp.2024.62.3885>
31. Nazarenko, I., Bernyk, I., Dedov, O., Rogovskii, I., Ruchynskiy, M., Pereginets, I., & Titova, L. (2021). Research of technical systems of processes of mixing materials. *Dynamic processes in technological technical systems*. <https://doi.org/10.15587/978-617-7319-49-7.ch4>
32. Онищенко О.Г., Попов С.В., Вірченко В.В. (2010). Вплив геометричних параметрів на ефективність роботи цівкового зачеплення змішувачів для приготування будівельних розчинних сумішей. *Збірник наукових праць (Галузеве машинобудування, будівництво) № 27*, 3–8.
33. Ємельянова І.А., Блажко В.В. (2015). Сучасне обладнання для приготування будівельних сумішей в умовах будівельного майданчика.

Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів. Актуальні задачі сучасних технологій. Тернопіль, 93-94.

34. Крот О.Ю. (2011). Дослідження впливу механоактивації бетонних сумішей на структуру заповнювача у валкових машинах. Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини, 78, 44-51.

35. Грищук Ю.М., Баранчук М.С. (2021). Машини та обладнання для бетонних і залізобетонних робіт. The VIII International Science Conference «Theoretical foundations of modern science and practice», 220-225.

36. Dils, J., De Schutter, G. & Boel, V. (2012). Influence of mixing procedure and mixer type on fresh and hardened properties of concrete: a review. Mater Struct 45, 1673–1683.

<https://doi.org/10.1617/s11527-012-9864-8>

37. Онищенко О.Г., Ващенко К.М. (2006). Розрахунок потужності та визначення опорів, що виникають при роботі стрічкового шнекового розчинозмішувача. Вісник КДПУ: Зб. наук. праць. Кременчук: КДПУ, № 1(36), 58-63

38. Онищенко О.Г., Ващенко К.М. (2004). Розроблення конструкції бункера-змішувача на основі аналізу конструктивних особливостей машин для прийому, перемішування і видачі будівельних розчинів. Галузеве машинобудування, будівництво. Полтава, 6-11.

39. Бурмістенков О.П., Біла Т.Я., Стаценко В.В. (2019). Дослідження енергоефективності обладнання для змішування сипких матеріалів. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки №4 (136), 42-48

<https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.4.4>

40. Jiapeng Yang, Qi An (2018). Mechanics analysis for the main bearing of the rotating drum in the concrete mixing truck. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 40:302.

<https://doi.org/10.1007/s40430-018-1231-4>

41. Ващенко К.М. (2007). Моделювання робочих процесів шнекового змішувача із застосуванням теорії подібності. Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського, 6/2007 (47), 123-125.

42. Shtut, A., Kolisnyk, M., & Voznyak, O. (2020). Studying the dynamic characteristics of closed system of gravity concrete mixer's electric drive by means of computer simulation. *Agricultural Engineering*, 54, 49–61.

<https://doi.org/10.15544/ageng.2022.54.6>

43. Забродський, М. М. (2011). Системне моделювання проектного розрахунку гравітаційних бетонозмішувачів циклічної дії. *ГБДММ*, 77, 11–18.

44. Wallevik, J. E., & Wallevik, O. H. (2017). Analysis of shear rate inside a concrete truck mixer. *Cement and Concrete Research*, 95, 9–17.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.007>

45. Ручинський, М. М., & Свиридюк, Д. Я. (2013). Дослідження коливань вібраційного бетонозмішувача з урахуванням впливу перемішувачого матеріалу. *Техніка будівництва*, 31, 35–42.

46. Баранов, Ю. О., & Клименко, М. О. (2012). Критерії вибору змішувача сухих будівельних сумішей. *Техніка будівництва*, 28, 34–40.

47. Блажко В. В., Григорків О. Б. (2025) Визначення основних показників роботи бетонозмішувача примусової дії з використанням критеріїв подібності. *Вісник ХНАДУ*, 109, 15-19

<https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2025.109.0.15>.

48. Назаренко, І. І., & Клименко, М. О. (2015). Оцінка енергетичного балансу та критеріїв робочого процесу системи «барабан змішувача–бетонна суміш». *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*, (85), 59–65.

49. Бурлака, С. А., Купчук, І. М., Шаповалюк, С. О., & Черниш, М. В. (2023). Аналіз впливу геометрії лопатевого змішувача на турбулентність та інтенсивність змішування рідини. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*, 121(2), 16–21. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-2-2>

50. Joško Ožbolt, Li, Y., & Ivica Kožar. (2001). Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint. *38(16)*, 2683–2711.

[https://doi.org/10.1016/s0020-7683\(00\)00177-3](https://doi.org/10.1016/s0020-7683(00)00177-3)

51. D. Scerrato, Giorgio, I., Corte, A. D., Madeo, A., & A. Limam. (2015). A micro-structural model for dissipation phenomena in the concrete. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 39(18), 2037–2052.

<https://doi.org/10.1002/nag.2394>

52. Hill, K. M., & Zhang, J. (2008). Kinematics of densely flowing granular mixtures. *Physical Review E*, 77(6). <https://doi.org/10.1103/physreve.77.061303>

53. Полевода, Ю. А., Волинець, Є. О., & Бистрицький, О. П. (2022). Математична модель руху частинок в циліндричному контейнері віброзмішувача. *Вібрації в техніці та технологіях*, 4(107), 20–24.

<https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-4-3>

54. Конопляник, О. Ю., Жук, Д. В. (2025). Вплив часу перемішування бетонних сумішей на міцнісні характеристики конструкційних бетонів. *Український журнал будівництва та архітектури*, 3 (27), 81-91.

<https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.81.1164>

55. Hattani, F., Menu, B., Allaoui, D., Mouflih, M., Zanzoun, H., Hannache, H., & Manoun, B. (2024). Evaluating the Impact of Material Selections, Mixing Techniques, and On-site Practices on Performance of Concrete Mixtures. *Civil Engineering Journal*, 10(2), 571–598. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2024-010-02-016>

56. Emeljanova, I., Anishchenko, A., & Dobrohodova, O. (2018). Means to enhance operating efficiency of the concrete mixer trucks with the purpose of highly-homogeneous concrete mix preparation. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*, 7(3), 102-106.

<https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14383>

57. Cheng, H., Luo, Z., & Yong, L. (2021). Reliability analysis of mixer structure under mixing simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1043. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1043/2/022020>.

58. Пушкарьова, К., Шейніч, Л., Чайковський, В., & Приймаченко, А. (2025). Оцінка відповідності міцності бетону на стиск за українськими та європейськими стандартами. *Наука та будівництво*, 39(1).

<https://doi.org/10.33644/2313-6679-1-2024-6>

59. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 43 с.

60. Ivanchev, I. (2022). Investigation with Non-Destructive and Destructive Methods for Assessment of Concrete Compressive Strength. Applied Sciences. <https://doi.org/10.3390/app122312172>.

61. ДСТУ Б В.2.7-45:2010 Будівельні матеріали. Бетони ніздрюваті. Загальні технічні умови. Зміна № 2. Київ: ДП «Український науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут будівельних матеріалів та виробів», 2017

62. ДСТУ EN 206:2022 Бетон. Специфікація, продуктивність, виробництво та відповідність. Київ: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2022.

63. Jahandari, S., Tao, Z., Alim, M., & Li, W. (2023). Integral waterproof concrete: A comprehensive review. Journal of Building Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107718>.

64. ДСТУ EN 12350-2:2022. Випробування бетонної суміші. Частина 2. Визначення консистенції. Випробування на осадку конуса (EN 12350-2:2019, IDT). Київ: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2022. 12 с.

65. Rudyk, R., & Kuzub, Y. (2022). Justification of new equipment development for preparing concrete solutions. Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering, 1(58), 11–16. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.3077>

66. Баладінський В.Л., Назаренко І.І., Онищенко О.Г. (2002). Будівельна техніка. Київ-Полтава: КНУБА-ПНТУ. 463 с.

67. Онищенко В. О., Онищенко О. Г., Коробко Б. О., Вірченко В. В. (2017). Будівельна техніка. Кондор, 424 с.

68. Саленко Ю. С., Вакуленко Р. А., Шевчук О. Ю., Лисенко О. В., Дятловська В. Л. (2020). Дослідження робочого режиму бетонозмішувача

безперервної дії. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, 1(120), 133–139.

<https://doi.org/10.30929/1995-0519.2020.1.133-139>

69. Ferraris, C. (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. <https://doi.org/10.6028/jres.106.016>.

70. Ємельянова І.А., Гордієнко А.Т., Субота Д.Ю. (2018). Особливості виконання бетонних робіт в умовах будівельного майданчика. *Будівництво. Науковий вісник будівництва*, 3 (93), 205-214.

<https://doi.org/10.29295/2311-7257-2018-93-3-205-214>

71. Назаренко, І., Клименко, М., Свідерській, А., & Печерський, В. (2017). Визначення раціональних параметрів гравітаційних бетонозмішувачів. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*, (90), 67–72.

72. Вірченко В.В. (2011). Приготування будівельних сумішей за допомогою ефективних змішувачів. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*, 1/2011 (66), 71-74.

73. Y. Kuzub, R. Rudyk (2025). Influence of spiral tape parameters mixer for mortar homogeneity. *Scientific Bulletin of Construction*, (112), 302-308

<https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.37>

74. Онищенко О.Г., Помазан В.М. (1999). *Будівельна техніка*. Київ: Урожай, 300 с.

75. Korobko , V., Levchenko , O., & Rudyk , R. (2023). Development of an energy-saving design for the feeding system of a concrete mixing plant. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 2(61), 46–51.

<https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3552>

76. Вірченко Віктор, Рудик Ростислав, Біданець Сергій (2024). Автоматизація обладнання для приготування бетону в умовах будівельного майданчика. *Збірник тез та доповідей міжнародної конференції "Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії"*, с. 81-83.

77. Назаренко І.І., Туманська О.В. (2004). *Машини і устаткування підприємств будівельних матеріалів: конструкції та основи експлуатації: Підручник.*- К.: Вища шк., с. 590.

78. Рудик Р.Ю., Вірченко В.В., Сальніков Р.Ю., Біданець С.С. (2023). Дослідження робочих процесів обладнання для приготування будівельних сумішей. Матеріали VI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки», с. 50-51.

79. Назаренко І.І., Клименко М.О., Чичур А.І., Сахно С.В. (2011). Перспективні конструкції автобетонозмішувачів. *Теорія і практика будівництва*, 7, 2-9.

80. Ємельянова І.А., Чайка Д.О., Кабанець Д.С. (2017). Створення технологічного комплексу малогабаритного обладнання з безпоршневым бетононасосом для умов будівельного майданчика. *Комунальне господарство міст*, 137, 98-103.

81. Plugin, A., Donets, O., Trykoz, L., & Pluhin, O. (2023). Electromechanical control method of rheological and technological characteristics of building mixtures. *Results in Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101419>.

82. Vasyliiev, I., & Taranenko, D. (2024). Mobile compact gravity-force concrete mixer. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 2(63), 73–78. <https://doi.org/10.26906/znp.2024.63.3879>

83. Yakovenko, A., & Kulai, V. (2025). Complex of mobile equipment for work on small construction sites. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 108, 54-60. <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2025.108.0.54>.

84. Рудик Ростислав, Сальніков Роман, Біданець Сергій, Вірченко Віктор (2024). Вивчення шляхів підвищення ефективності роботи обладнання для приготування бетонних розчинів. Матеріали VII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки», с. 103.

85. Рудик Р.Ю., Вірченко В.В., Сальніков Р.Ю. Універсальний автономний гравітаційний бетонозмішувач. Патент на корисну модель № 161941 Україна. МПК В28С 5/42, В28С 5/18, G05В 19/042 (2006.01), заявник і патентовласник Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». u202502513; заявл. 28.05.2025; опубл. 21.01.2026, Бюл. № 3.

86. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор, Сальніков Роман, Біданець Сергій. Розроблення методики та обладнання для приготування бетонних сумішей у гравітаційних змішувачах. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Енергоощадні машини і технології». Київ: КНУБА, 2024. – С. 12-15.

87. Yuan, Y., Wang, X., Chen, X., Xiao, P., Koenders, E., & Dai, Y. (2023). Mathematical models of apparent viscosity as a function of water–cement/binder ratio and superplasticizer in cement pastes. *Scientific Reports*, 13, 22301. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-48748-4>

88. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор, Сальніков Роман, Біданець Сергій (2024). Вплив лопатки на змішування бетонної суміші. Матеріали 76-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, с. 270-271.

89. Hoorijani, H., Esgandari, B., Zarghami, R., Sotudeh-Gharebagh, R., & Mostoufi, N. (2023). Predictive modeling of mixing time for super-ellipsoid particles in a four-bladed mixer: A DEM-based approach. *Powder Technology*, 430, 119009. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119009>

90. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор, Сальніков Роман, Кузуб Юрій (2025). Оптимізація енерговитрат бетонозмішувача за допомогою аналізу часового розподілу змішування. Матеріали VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки». с. 106-107.

91. Голуб, Г. А., & Ачкевич, О. М. (2017). Оптимізація величини кутової швидкості змішувачів барабанного типу. *Вісник Житомирського національного агроєкологічного університету*, 1(58), 194–202.

92. Pan, J.-P., Wang, T.-J., Yao, J.-J., & Jin, Y. (2006). Granule transport and mean residence time in horizontal drum with inclined flights. *Powder Technology*, 162(1), 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2005.12.004>
93. Jiang, M., Zhao, Y., Liu, G., & Zheng, J. (2011). Enhancing mixing of particles by baffles in a rotating drum mixer. *Particuology*, 9(3), 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2010.06.008>
94. Rudyk, R., Salnikov, R. (2024). Analysis of the mixer geometry and rheology impact on concrete mixture mixing efficiency. *Construction Engineering*, (41), 77–84. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0409>
95. Liu, Y., Gonzalez, M., & Wassgren, C. (2018). Modeling granular material blending in a rotating drum using a finite element method and advection-diffusion equation multiscale model. *AIChE Journal*, 64(9), 3277–3292. <https://doi.org/10.1002/aic.16179>
96. Rudyk Rostyslav, Virchenko Viktor (2025). Increasing the efficiency of gravity mixing for concrete mixtures. *Construction Engineering*, (42), 50-60. <https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0506>
97. Golub, G., Yaroslav Myhailovych, Oksana Achkevych, & Chuba, V. (2019). Optimization of angular velocity of drum mixers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7 (99)), 64–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.166944>
98. Bulgakov, V., Pilipaka, S., Adamchuk, V., Olt, J. (2014). Theory of motion of a material point along a plane curve with a constant pressure and velocity. *Agronomy Research*, Vol. 12(3), pp. 937–948.
99. Volina, T., Pylypaka, S., Babka, V., Zalevska, O., Rebrii, A. (2023). Sliding of a particle on the horizontal plane under oscillating and rotary movements. In: *Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner 2022*, pp. 506–514. Springer, Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_48
100. Havlica, J., Jiroukova, K., Travnickova, T., Stanovsky, P., Petrus, P., & Kohout, M. (2019). Granular dynamics in a vertical bladed mixer: Secondary flow patterns. *Powder Technology*, 344, 79–88.

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.094>

101. Rudyk R. Y., Virchenko V. V., Salnikov R. Y., Kuzub Y. O. (2025). Mathematical modeling of the working body's oscillatory motion in a concrete mixer. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 12(2), pp. D45–D54.

[https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).d4](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).d4)

102. Rudyk, R., & Bidanets, S. (2023). Research on modes and operating parameters of construction mixes preparing equipment. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(60), 25–30.

<https://doi.org/10.26906/znp.2023.60.3183>

103. Salamat, J., & Genç, B. (2023). Mixing Performance Analysis of Cohesive Granular Particles in a Planetary Concrete Mixer Containing Two Different Mixing Units via DEM. *Orclever Proceedings of Research and Development*, 3(1), 311–320.

<https://doi.org/10.56038/oprd.v3i1.291>

104. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор, Сальніков Роман, Кузуб Юрій. Визначення основних факторів, що впливають на потужність у гравітаційному змішувачі. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Енергоощадні машини і технології» Київ: КНУБА, 2025. – С. 36-39.

105. Hahn-Woernle, P., & Günthner, W. A. (2018). Power-load management reduces energy-dependent costs of multi-aisle mini-load automated storage and retrieval systems. *International Journal of Production Research*, 56(3), 1269–1285.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1395487>

106. ДСТУ Б EN 197-1:2015 Цемент. Частина 1. Склад, технічні вимоги та критерії відповідності для звичайних цементів. – Київ: ДП «Орган з сертифікації цементів «СЕПРОЦЕМ», 2015.

107. ДСТУ Б EN 12620:2013 Заповнювачі для бетону. – Київ: Науково-технічний комітет «Будстандарт», 2014.

108. ДСТУ EN 1008:2022 Вода для замішування бетону. Технічні умови для відбирання проб, тестування та оцінювання придатності води, охоплюючи воду, відновлену під час виробництва бетону, як воду для змішування бетону. –

Київ: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2022.

109. ДСТУ EN 934-2:2019 Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Частина 2. Добавки для бетонів. – Київ: ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості», 2019.

110. ДСТУ EN 45501:2021 Метрологія. Ваги неавтоматичної дії. Вимоги та методи випробування. - Київ: Технічний комітет стандартизації «Прилади для вимірювання маси, сили, деформації та визначення механічних характеристик матеріалів», 2021.

111. ДСТУ EN 933-1:2021 Тести на зерновий склад. Частина 1. Методи визначення розміру зерен. – Київ: Технічний комітет стандартизації ТК 307 «Автомобільні дороги і транспортні споруди», 2021.

112. ДСТУ Б В.2.7-233:2010 Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. – Київ: Науково-технічний комітет «Будстандарт», 2010.

113. Maddala, G., & Wu, S. (1999). A Comparative Study of Unit Root Tests with Panel Data and a New Simple Test. *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 61, 631-652. <https://doi.org/10.1111/1468-0084.0610s1631>.

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Rudyk, R., & Kuzub, Y. (2022). Justification of new equipment development for preparing concrete solutions. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(58), 11–16. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.3077>

2. Rudyk, R., & Bidanets, S. (2023). Research on modes and operating parameters of construction mixes preparing equipment. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 1(60), 25–30.

<https://doi.org/10.26906/znp.2023.60.3183>

3. Korobko , B., Levchenko , O., & Rudyk , R. (2023). Development of an energy-saving design for the feeding system of a concrete mixing plant. *Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering*, 2(61), 46–51.

<https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3552>

4. Rudyk, R., & Salnikov, R. (2024). Analysis of the mixer geometry and rheology impact on concrete mixture mixing efficiency. *Construction Engineering*, (41), 77–84. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0409>

5. Rudyk Rostyslav, Virchenko Viktor (2025). Increasing the efficiency of gravity mixing for concrete mixtures. *Construction Engineering*, (42), 50-60.

<https://doi.org/10.32347/tb.2025-42.0506>

Статті в наукових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз:

6. Rudyk R. Y., Virchenko V. V., Salnikov R. Y., Kuzub Y. O. (2025). Mathematical modeling of the working body's oscillatory motion in a concrete mixer. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 12(2), pp. D45–D54.

[https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(2\).d4](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(2).d4)

Патенти України на корисну модель:

7. Рудик Р.Ю., Вірченко В.В., Сальніков Р.Ю. Спосіб змішування бетонних сумішей. Патент на корисну модель №159089 Україна. МПК В28С 5/00, С04В

40/00 (2025.01), заявник і патентовласник Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». u202404718; заявл. 01.10.2024; опубл. 24.04.2025, Бюл. № 17.

8. Рудик Р.Ю., Вірченко В.В., Сальніков Р.Ю. Універсальний автономний гравітаційний бетонозмішувач. Патент на корисну модель № 161941 Україна. МПК В28С 5/42, В28С 5/18, G05В 19/042 (2006.01), заявник і патентовласник Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». u202502513; заявл. 28.05.2025; опубл. 21.01.2026, Бюл. № 3.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Рудик Р.Ю., Вірченко В.В., Сальніков Р.Ю., Біданець С.С. Дослідження робочих процесів обладнання для приготування будівельних сумішей. Матеріали VI Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки матеріали», 11 трав. 2023 р. – Полтава : Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. – С. 50–51.

10. Вірченко Віктор, Рудик Ростислав, Біданець Сергій. Автоматизація обладнання для приготування бетону в умовах будівельного майданчика. Збірник тез та доповідей міжнародної конференції "Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії". (11–12.03.24, м. Харків), . – Х. : Бровін О.В., 2024. – С. 81-83.

11. Рудик Ростислав, Сальніков Роман, Біданець Сергій, Вірченко Віктор. Вивчення шляхів підвищення ефективності роботи обладнання для приготування бетонних розчинів. Матеріали VII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки» (25.04.24, м. Полтава), . – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2024. – С. 103.

12. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор, Сальніков Роман, Біданець Сергій. Вплив лопатки на змішування бетонної суміші. Тези 76-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів

Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, 14 трав.–23 трав. 2024 р.). – Т. 1. – С. 270–271.

13. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор, Сальніков Роман, Біданець Сергій. Розроблення методики та обладнання для приготування бетонних сумішей у гравітаційних змішувачах. Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції «Енергоощадні машини і технології» (Київ, 22-24 трав. 2024 р.). – К.: КНУБА, 2024. – С. 12-15.

14. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор, Сальніков Роман, Кузуб Юрій. Оптимізація енерговитрат бетонозмішувача за допомогою аналізу часового розподілу змішування. Матеріали VIII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки» (24 квіт. 2025 р., м. Полтава). – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2025. – С. 106–107.

15. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор, Сальніков Роман, Кузуб Юрій. Визначення основних факторів, що впливають на потужність у гравітаційному змішувачі. Матеріали VI Міжнародної науково-практичної конференції «Енергоощадні машини і технології» (Київ, 20-21 трав. 2025 р.). – К. : КНУБА, 2025. – С. 36-39.

16. Рудик Ростислав, Вірченко Віктор. Research on energy efficiency in gravity concrete mixing with oscillatory drum motion. Матеріали XIX всеукраїнської науково-технічної конференції здобувачів вищої освіти «сталий розвиток міст: поствоєнний період» (Харків, 28-29 квітня 2026 р.). – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, ч. 2, – С. 79-81.

17. Рудик Ростислав, Сальніков Роман, Вірченко Віктор. Дослідження процесу змішування бетонних сумішей в змішувачі з осциляційним рухом робочого органа. Тези 78-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (Полтава, 15 трав.–22 трав. 2026 р.). – Т. 1. – С. 246–247.

ДОДАТОК Б

Дослідження процесу змішування бетонної суміші у гравітаційному бетонозмішувачі за допомогою осциляційного руху робочого органу

Таблиця Б.1 – Однорідність бетонної суміші при різних режимах осциляційного руху барабана та тривалості змішування

Частота осциляцій, ν , ХВ^{-1}	Час змішування, t , с	№ точки проби	Вміст компонентів у пробі, г				Середнє значення маси компонентів, г				Відхилення від середнього значення (абс. величина), %				Середнє відхилення від середнього значення, %			
			пісок m_n	цемент $m_{ц}$	вода $m_{в}$	щебінь $m_{щ}$	пісок m_n^{cp}	цемент $m_{ц}^{cp}$	вода $m_{в}^{cp}$	щебінь $m_{щ}^{cp}$	пісок	цемент	вода	щебінь	пісок	цемент	вода	щебінь
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2	120	1	625	317	159	1266	600,03	300,01	150,00	1200,05	4,17	5,67	6,00	5,50	3,546	3,315	3,333	3,555
		2	571	285	142	1141					4,83	5,00	5,33	4,92				
		3	638	310	154	1238					6,33	3,33	2,67	3,17				
		4	590	291	147	1167					1,67	3,00	2,00	2,75				
		5	607	302	151	1215					1,17	0,67	0,67	1,25				
		6	562	283	141	1134					6,33	5,67	6,00	5,50				
		7	619	315	157	1257					3,17	5,00	4,67	4,75				
		8	578	288	143	1148					3,67	4,00	4,67	4,33				
		9	633	308	155	1244					5,50	2,67	3,33	3,67				
		10	584	293	146	1159					2,67	2,33	2,67	3,42				
		11	597	305	152	1227					0,50	1,67	1,33	2,25				
		12	613	296	144	1176					2,17	1,33	4,00	2,00				
		13	566	312	158	1251					5,67	4,00	5,33	4,25				
		14	629	286	145	1150					4,83	4,67	3,33	4,17				
		15	581	299	149	1198					3,17	0,33	0,67	0,17				
		16	605	314	156	1260					0,83	4,67	4,00	5,00				
		17	592	289	148	1162					1,33	3,67	1,33	3,17				
		18	635	306	153	1233					5,83	2,00	2,00	2,75				

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2	240	1	598	311	151	1243	608,02	304,04	152,01	1216,02	1,64	2,30	0,66	2,22	2,677	2,613	1,316	3,244
		2	625	296	154	1179					2,80	2,63	1,32	3,04				
		3	582	302	149	1228					4,28	0,66	1,97	0,99				
		4	611	317	152	1158					0,49	4,28	0,00	4,77				
		5	638	290	155	1267					4,93	4,61	1,97	4,19				
		6	589	308	150	1187					3,13	1,32	1,32	2,38				
		7	620	293	153	1249					1,97	3,62	0,66	2,71				
		8	578	314	148	1165					4,93	3,29	2,63	4,19				
		9	605	299	156	1276					0,49	1,64	2,63	4,93				
		10	630	305	152	1172					3,62	0,33	0,00	3,62				
		11	592	319	149	1235					2,63	4,93	1,97	1,56				
		12	615	291	154	1146					1,15	4,28	1,32	5,76				
		13	584	309	151	1258					3,95	1,64	0,66	3,45				
		14	627	297	153	1169					3,13	2,30	0,66	3,87				
		15	595	312	150	1204					2,14	2,63	1,32	0,99				
		16	622	289	155	1286					2,30	4,93	1,97	5,76				
		17	580	306	152	1183					4,61	0,66	0,00	2,71				
		18	608	301	148	1231					0,00	0,99	2,63	1,23				
	360	1	627	314	154	1256	618,67	309,33	154,67	1237,33	1,35	1,51	0,43	1,51	2,263	1,940	0,982	2,613
		2	605	303	156	1198					2,21	2,05	0,86	3,18				
		3	633	318	153	1273					2,32	2,80	1,08	2,88				
		4	597	299	155	1212					3,50	3,34	0,22	2,05				
		5	615	311	157	1285					0,59	0,54	1,51	3,85				
		6	641	305	152	1189					3,61	1,40	1,72	3,91				
		7	609	320	155	1264					1,56	3,45	0,22	2,16				
		8	623	301	158	1205					0,70	2,69	2,16	2,61				
		9	593	316	154	1293					4,15	2,16	0,43	4,50				
		10	637	307	156	1181					2,96	0,75	0,86	4,55				
		11	601	312	153	1247					2,86	0,86	1,08	0,78				
		12	629	298	155	1224					1,67	3,66	0,22	1,08				
		13	611	319	157	1279					1,24	3,13	1,51	3,37				
		14	619	302	152	1193					0,05	2,37	1,72	3,58				
		15	645	308	155	1235					4,26	0,43	0,22	0,19				
		16	599	315	158	1288					3,18	1,83	2,16	4,09				
		17	635	304	154	1217					2,64	1,72	0,43	1,64				
		18	607	310	156	1251					1,89	0,22	0,86	1,10				

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
8	120	1	629	314	154	1258	613,33	306,67	153,33	1226,67	2,55	2,39	0,43	2,55	2,862	2,428	1,389	3,119
		2	598	298	151	1189					2,50	2,83	1,52	3,07				
		3	615	321	156	1273					0,27	4,67	1,74	3,78				
		4	584	295	150	1204					4,78	3,80	2,17	1,85				
		5	637	309	153	1285					3,86	0,76	0,22	4,76				
		6	592	302	157	1172					3,48	1,52	2,39	4,46				
		7	623	317	152	1264					1,58	3,37	0,87	3,04				
		8	588	293	155	1197					4,13	4,46	1,09	2,42				
		9	644	312	149	1293					5,00	1,74	2,83	5,41				
		10	582	299	153	1161					5,11	2,50	0,22	5,35				
		11	619	305	150	1246					0,92	0,54	2,17	1,58				
		12	605	319	155	1215					1,36	4,02	1,09	0,95				
		13	631	296	152	1279					2,88	3,48	0,87	4,27				
		14	590	310	157	1183					3,80	1,09	2,39	3,56				
		15	611	303	153	1235					0,38	1,20	0,22	0,68				
		16	639	315	151	1288					4,18	2,72	1,52	5,00				
		17	596	300	154	1209					2,83	2,17	0,43	1,44				
		18	625	308	149	1251					1,90	0,43	2,83	1,98				
	240	1	637	317	158	1275	629,33	314,67	157,33	1258,67	1,22	0,74	0,42	1,30	1,683	1,212	0,965	1,844
		2	615	311	155	1233					2,28	1,17	1,48	2,04				
		3	643	319	160	1289					2,17	1,38	1,69	2,41				
		4	611	309	156	1241					2,91	1,80	0,85	1,40				
		5	629	314	157	1295					0,05	0,21	0,21	2,89				
		6	619	322	159	1228					1,64	2,33	1,06	2,44				
		7	647	312	154	1267					2,81	0,85	2,12	0,66				
		8	613	316	157	1237					2,60	0,42	0,21	1,72				
		9	633	307	158	1300					0,58	2,44	0,42	3,28				
		10	609	314	155	1216					3,23	0,21	1,48	3,39				
		11	625	310	157	1259					0,69	1,48	0,21	0,03				
		12	621	318	160	1249					1,32	1,06	1,69	0,77				
		13	639	313	156	1283					1,54	0,53	0,85	1,93				
		14	617	321	159	1225					1,96	2,01	1,06	2,67				
		15	631	314	157	1263					0,26	0,21	0,21	0,34				
		16	649	308	154	1292					3,12	2,12	2,12	2,65				
		17	623	315	158	1230					1,01	0,11	0,42	2,28				
		18	635	306	156	1271					0,90	2,75	0,85	0,98				

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
8	360	1	643	322	161	1273	641,01	318,02	161,00	1282,01	0,47	0,63	0,63	0,55	1,146	0,694	0,694	1,254
		2	633	318	159	1298					1,09	0,63	0,63	1,41				
		3	648	324	162	1261					1,25	1,25	1,25	1,48				
		4	629	316	158	1305					1,72	1,25	1,25	1,95				
		5	638	320	160	1284					0,31	0,00	0,00	0,31				
		6	654	325	161	1256					2,19	1,56	0,63	1,88				
		7	631	319	159	1301					1,41	0,31	0,63	1,64				
		8	641	321	160	1269					0,16	0,31	0,00	0,86				
		9	626	315	162	1310					2,19	1,56	1,25	2,34				
		10	649	320	158	1250					1,41	0,00	1,25	2,34				
		11	635	317	160	1287					0,78	0,94	0,00	0,55				
		12	644	323	161	1276					0,63	0,94	0,63	0,31				
		13	630	320	159	1293					1,56	0,00	0,63	1,02				
		14	652	324	160	1264					1,88	1,25	0,00	1,25				
		15	637	318	162	1280					0,47	0,63	1,25	0,00				
		16	647	322	158	1308					1,09	0,63	1,25	2,19				
		17	628	319	161	1259					1,88	0,31	0,63	1,64				
		18	639	321	159	1291					0,16	0,31	0,63	0,86				
14	120	1	627	319	159	1285	634,67	317,33	158,67	1269,33	1,21	0,53	0,21	1,23	1,996	1,687	0,992	2,330
		2	645	313	157	1238					1,63	1,37	1,05	2,47				
		3	618	324	161	1302					2,63	2,10	1,47	2,57				
		4	652	309	156	1251					2,73	2,63	1,68	1,44				
		5	634	317	158	1319					0,11	0,11	0,42	3,91				
		6	610	327	160	1229					3,89	3,05	0,84	3,18				
		7	639	311	155	1293					0,68	2,00	2,31	1,86				
		8	623	322	158	1246					1,84	1,47	0,42	1,84				
		9	658	307	159	1311					3,68	3,26	0,21	3,28				
		10	615	325	157	1219					3,10	2,42	1,05	3,97				
		11	643	315	160	1276					1,31	0,74	0,84	0,53				
		12	630	320	158	1263					0,74	0,84	0,42	0,50				
		13	649	310	156	1307					2,26	2,31	1,68	2,97				
		14	621	326	161	1235					2,15	2,73	1,47	2,70				
		15	637	318	158	1289					0,37	0,21	0,42	1,55				
		16	654	323	159	1315					3,05	1,79	0,21	3,60				
		17	612	312	155	1242					3,57	1,68	2,31	2,15				
		18	641	321	160	1297					1,00	1,16	0,84	2,18				

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
14	240	1	638	323	161	1278	642,67	321,33	160,67	1285,33	0,73	0,52	0,21	0,57	0,916	0,741	0,438	1,059
		2	647	319	160	1296					0,67	0,73	0,41	0,83				
		3	633	325	162	1265					1,50	1,15	0,83	1,58				
		4	651	317	161	1307					1,30	1,35	0,21	1,69				
		5	642	321	161	1283					0,10	0,10	0,21	0,18				
		6	653	326	160	1259					1,61	1,46	0,41	2,05				
		7	635	318	162	1301					1,19	1,04	0,83	1,22				
		8	644	322	161	1272					0,21	0,21	0,21	1,04				
		9	631	316	160	1311					1,82	1,67	0,41	2,00				
		10	649	321	162	1268					0,99	0,10	0,83	1,35				
		11	637	320	161	1291					0,88	0,42	0,21	0,44				
		12	640	324	160	1285					0,41	0,83	0,41	0,03				
		13	648	321	161	1299					0,83	0,10	0,21	1,06				
		14	634	325	162	1275					1,35	1,15	0,83	0,80				
		15	643	318	160	1289					0,05	1,04	0,41	0,29				
		16	652	323	161	1305					1,45	0,52	0,21	1,53				
		17	636	319	162	1262					1,04	0,73	0,83	1,82				
		18	645	322	161	1293					0,36	0,21	0,21	0,60				
	360	1	657	328	164	1305	656,00	328,00	164,00	1312,00	0,15	0,00	0,00	0,53	0,398	0,373	0,305	0,610
		2	653	326	163	1319					0,46	0,61	0,61	0,53				
		3	660	329	165	1299					0,61	0,30	0,61	0,99				
		4	651	325	164	1324					0,76	0,91	0,00	0,91				
		5	656	328	164	1312					0,00	0,00	0,00	0,00				
		6	662	330	163	1297					0,91	0,61	0,61	1,14				
		7	654	327	165	1321					0,30	0,30	0,61	0,69				
		8	658	328	164	1308					0,30	0,00	0,00	0,30				
		9	650	326	163	1327					0,91	0,61	0,61	1,14				
		10	656	331	165	1301					0,00	0,91	0,61	0,84				
		11	655	328	164	1317					0,15	0,00	0,00	0,38				
		12	659	327	164	1303					0,46	0,30	0,00	0,69				
		13	656	329	165	1325					0,00	0,30	0,61	0,99				
		14	661	328	164	1310					0,76	0,00	0,00	0,15				
		15	652	330	163	1315					0,61	0,61	0,61	0,23				
		16	657	325	164	1323					0,15	0,91	0,00	0,84				
		17	654	329	165	1306					0,30	0,30	0,61	0,46				
		18	658	328	164	1314					0,30	0,00	0,00	0,15				

Таблиця Б.2 – Однорідність бетонної суміші при різних значеннях частоти осциляційного руху барабана та амплітуди зміни кута нахилу

Частота осциляцій, п, хВ ⁻¹	Амплітуда зміни кута нахилу барабана, θ, град	№ точки проби	Вміст компонентів у пробі, г				Середнє значення маси компонентів, г				Відхилення від середнього значення (абс. величина), %				Середнє відхилення від середнього значення, %			
			пісок m_n	цемент $m_{ц}$	вода $m_в$	щебінь $m_{щ}$	пісок m_n^{cp}	цемент $m_{ц}^{cp}$	вода $m_в^{cp}$	щебінь $m_{щ}^{cp}$	пісок	цемент	вода	щебінь	пісок	цемент	вода	щебінь
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2	10	1	631	317	157	1262	624,03	312,07	156,01	1248,15	1,12	1,60	0,64	1,12	2,226	1,941	0,890	2,244
		2	613	306	154	1235					1,76	1,92	1,28	1,04				
		3	642	321	159	1299					2,88	2,88	1,92	4,09				
		4	605	303	155	1207					3,04	2,88	0,64	3,29				
		5	627	313	156	1254					0,48	0,32	0,00	0,48				
		6	650	323	158	1275					4,17	3,53	1,28	2,16				
		7	617	309	153	1198					1,12	0,96	1,92	4,01				
		8	636	315	156	1221					1,92	0,96	0,00	2,16				
		9	598	301	157	1286					4,17	3,53	0,64	3,04				
		10	644	319	154	1240					3,21	2,24	1,28	0,64				
		11	621	308	156	1214					0,48	1,28	0,00	2,72				
		12	609	311	159	1238					2,40	0,32	1,92	0,80				
		13	639	322	155	1302					2,40	3,21	0,64	4,33				
		14	615	305	158	1196					1,44	2,24	1,28	4,17				
		15	633	314	156	1268					1,44	0,64	0,00	1,60				
		16	647	320	157	1244					3,69	2,56	0,64	0,32				
		17	602	302	153	1259					3,53	3,21	1,92	0,88				
		18	629	310	156	1292					0,80	0,64	0,00	3,53				

Продовження таблиці Б.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2	25	1	610	317	158	1242	629,32	314,67	157,33	1258,67	3,07	0,74	0,42	1,32	1,854	1,589	0,647	1,866
		2	648	324	156	1297					2,97	2,97	0,85	3,05				
		3	625	310	157	1261					0,69	1,48	0,21	0,19				
		4	638	316	159	1215					1,38	0,42	1,06	3,47				
		5	611	311	156	1255					2,91	1,17	0,85	0,29				
		6	643	321	158	1284					2,17	2,01	0,42	2,01				
		7	621	306	155	1270					1,32	2,75	1,48	0,90				
		8	637	319	159	1239					1,22	1,38	1,06	1,56				
		9	608	314	157	1224					3,39	0,21	0,21	2,75				
		10	646	322	157	1266					2,65	2,33	0,21	0,58				
		11	632	308	156	1247					0,42	2,12	0,85	0,93				
		12	618	318	158	1302					1,80	1,06	0,42	3,44				
		13	629	312	157	1288					0,05	0,85	0,21	2,33				
		14	644	309	155	1209					2,33	1,80	1,48	3,95				
		15	634	323	158	1275					0,74	2,65	0,42	1,30				
		16	613	320	157	1305					2,60	1,69	0,21	3,68				
		17	639	307	156	1258					1,54	2,44	0,85	0,05				
		18	616	313	158	1281					2,12	0,53	0,42	1,77				
	40	1	648	312	159	1262	634,67	317,33	158,67	1269,33	2,10	1,68	0,21	0,58	1,272	0,969	0,444	1,663
		2	624	324	160	1235					1,68	2,10	0,84	2,70				
		3	639	317	158	1293					0,68	0,11	0,42	1,86				
		4	626	316	159	1247					1,37	0,42	0,21	1,76				
		5	647	320	158	1301					1,94	0,84	0,42	2,49				
		6	629	311	160	1255					0,89	2,00	0,84	1,13				
		7	643	319	159	1275					1,31	0,53	0,21	0,45				
		8	620	310	159	1242					2,31	2,31	0,21	2,15				
		9	633	318	160	1280					0,26	0,21	0,84	0,84				
		10	640	316	158	1229					0,84	0,42	0,42	3,18				
		11	627	322	159	1304					1,21	1,47	0,21	2,73				
		12	651	314	160	1270					2,57	1,05	0,84	0,05				
		13	636	317	158	1265					0,21	0,11	0,42	0,34				
		14	634	317	159	1259					0,11	0,11	0,21	0,81				
		15	619	321	160	1298					2,47	1,16	0,84	2,26				
		16	645	315	158	1238					1,63	0,74	0,42	2,47				
		17	631	313	159	1285					0,58	1,37	0,21	1,23				
		18	630	320	159	1306					0,74	0,84	0,21	2,89				

Продовження таблиці Б.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
8	10	1	642	319	159	1258	634,67	317,33	158,67	1269,33	1,16	0,53	0,21	0,89	1,488	1,167	0,700	1,942
		2	619	314	158	1293					2,47	1,05	0,42	1,86				
		3	636	322	160	1237					0,21	1,47	0,84	2,55				
		4	654	311	157	1308					3,05	2,00	1,05	3,05				
		5	628	317	159	1265					1,05	0,11	0,21	0,34				
		6	630	325	161	1223					0,74	2,42	1,47	3,65				
		7	649	313	158	1284					2,26	1,37	0,42	1,16				
		8	625	320	159	1246					1,52	0,84	0,21	1,84				
		9	644	309	157	1315					1,47	2,63	1,05	3,60				
		10	616	317	160	1231					2,94	0,11	0,84	3,02				
		11	639	316	159	1276					0,68	0,42	0,21	0,53				
		12	633	323	158	1252					0,26	1,79	0,42	1,37				
		13	647	317	161	1299					1,94	0,11	1,47	2,34				
		14	621	324	159	1240					2,15	2,10	0,21	2,31				
		15	638	312	160	1269					0,53	1,68	0,84	0,03				
		16	631	319	157	1305					0,58	0,53	1,05	2,81				
		17	646	315	159	1235					1,79	0,74	0,21	2,70				
		18	622	321	161	1281					2,00	1,16	1,47	0,92				
	25	1	637	322	160	1273	640,04	320,02	160,00	1280,03	0,47	0,63	0,00	0,55	1,181	0,816	0,417	1,411
		2	648	317	159	1298					1,25	0,94	0,63	1,41				
		3	629	324	161	1257					1,72	1,25	0,63	1,80				
		4	652	315	160	1309					1,88	1,56	0,00	2,27				
		5	642	320	160	1284					0,31	0,00	0,00	0,31				
		6	626	326	159	1245					2,19	1,88	0,63	2,73				
		7	645	318	161	1302					0,78	0,63	0,63	1,72				
		8	633	321	161	1266					1,09	0,31	0,63	1,09				
		9	654	314	159	1315					2,19	1,88	0,63	2,73				
		10	631	320	161	1252					1,41	0,00	0,63	2,19				
		11	643	319	161	1289					0,47	0,31	0,63	0,70				
		12	638	323	160	1277					0,31	0,94	0,00	0,23				
		13	650	320	161	1295					1,56	0,00	0,63	1,17				
		14	627	325	161	1261					2,03	1,56	0,63	1,48				
		15	640	316	159	1280					0,00	1,25	0,63	0,00				
		16	651	322	160	1311					1,72	0,63	0,00	2,42				
17	635	318	161	1258	0,78	0,63	0,63	1,72										
18	647	321	160	1291	1,09	0,31	0,00	0,86										

Продовження таблиці Б.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
8	40	1	643	323	161	1283	645,33	322,67	161,33	1290,67	0,36	0,10	0,21	0,59	0,826	0,522	0,298	1,075
		2	650	321	161	1305					0,72	0,52	0,21	1,11				
		3	638	325	161	1277					1,14	0,72	0,21	1,06				
		4	653	320	161	1312					1,19	0,83	0,21	1,65				
		5	645	323	161	1294					0,05	0,10	0,21	0,26				
		6	635	326	161	1266					1,60	1,03	0,21	1,91				
		7	648	322	162	1301					0,41	0,21	0,41	0,80				
		8	641	324	161	1288					0,67	0,41	0,21	0,21				
		9	655	319	160	1316					1,50	1,14	0,83	1,96				
		10	637	323	161	1273					1,29	0,10	0,21	1,37				
		11	647	321	161	1299					0,26	0,52	0,21	0,65				
		12	644	325	161	1285					0,21	0,72	0,21	0,44				
		13	652	323	162	1308					1,03	0,10	0,41	1,34				
		14	639	327	161	1271					0,98	1,34	0,21	1,52				
		15	646	320	160	1291					0,10	0,83	0,83	0,03				
		16	654	324	161	1314					1,34	0,41	0,21	1,81				
		17	636	322	161	1269					1,45	0,21	0,21	1,68				
		18	649	323	161	1303					0,57	0,10	0,21	0,96				
14	10	1	640	320	161	1272	645,33	322,67	161,33	1290,67	0,83	0,83	0,21	1,45	1,105	0,844	0,425	1,125
		2	653	322	162	1315					1,19	0,21	0,41	1,89				
		3	633	318	160	1287					1,91	1,45	0,83	0,28				
		4	650	327	161	1264					0,72	1,34	0,21	2,07				
		5	642	319	160	1309					0,52	1,14	0,83	1,42				
		6	657	324	161	1302					1,81	0,41	0,21	0,88				
		7	638	323	162	1291					1,14	0,10	0,41	0,03				
		8	635	318	161	1278					1,60	1,45	0,21	0,98				
		9	654	327	160	1320					1,34	1,34	0,83	2,27				
		10	658	323	161	1281					1,96	0,10	0,21	0,75				
		11	644	320	161	1305					0,21	0,83	0,21	1,11				
		12	652	317	160	1274					1,03	1,76	0,83	1,29				
		13	632	325	161	1300					2,07	0,72	0,21	0,72				
		14	641	322	162	1311					0,67	0,21	0,41	1,58				
		15	645	324	161	1284					0,05	0,41	0,21	0,52				
		16	636	326	160	1320					1,45	1,03	0,83	2,27				
		17	646	321	162	1297					0,10	0,52	0,41	0,49				
		18	637	327	161	1294					1,29	1,34	0,21	0,26				

Продовження таблиці Б.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
14	25	1	648	323	163	1309	650,67	325,33	162,67	1301,33	0,41	0,72	0,20	0,59	0,612	0,453	0,228	0,810
		2	651	327	163	1283					0,05	0,52	0,20	1,41				
		3	659	324	163	1311					1,28	0,41	0,20	0,74				
		4	645	326	162	1294					0,87	0,21	0,41	0,56				
		5	653	325	163	1318					0,36	0,10	0,20	1,28				
		6	649	323	163	1289					0,26	0,72	0,20	0,95				
		7	655	325	163	1300					0,67	0,10	0,20	0,10				
		8	643	328	163	1320					1,18	0,83	0,20	1,43				
		9	654	324	163	1287					0,51	0,41	0,20	1,10				
		10	650	326	163	1304					0,10	0,21	0,20	0,20				
		11	657	325	163	1292					0,97	0,10	0,20	0,72				
		12	644	322	163	1316					1,02	1,03	0,20	1,13				
		13	647	327	163	1299					0,56	0,52	0,20	0,18				
		14	656	325	163	1307					0,82	0,10	0,20	0,44				
		15	651	326	163	1285					0,05	0,21	0,20	1,26				
		16	652	322	162	1296					0,20	1,03	0,41	0,41				
		17	646	328	163	1313					0,72	0,83	0,20	0,90				
		18	657	325	163	1286					0,97	0,10	0,20	1,18				
	19	655	328	164	1318	0,15	0,00	0,00	0,46	0,381	0,305	0,102	0,504					
	20	659	326	164	1305	0,46	0,61	0,00	0,53									
	21	652	329	164	1299	0,61	0,30	0,00	0,99									
	22	655	330	165	1314	0,15	0,61	0,61	0,15									
	23	658	327	164	1302	0,30	0,30	0,00	0,76									
	24	657	328	164	1318	0,15	0,00	0,00	0,46									
	25	652	327	164	1311	0,61	0,30	0,00	0,08									
	26	660	329	164	1308	0,61	0,30	0,00	0,30									
	27	657	326	164	1324	0,15	0,61	0,00	0,91									
	28	661	328	164	1300	0,76	0,00	0,00	0,91									
	29	653	330	164	1310	0,46	0,61	0,00	0,15									
	30	655	327	164	1316	0,15	0,30	0,00	0,30									
	31	657	328	164	1322	0,15	0,00	0,00	0,76									
	32	651	329	164	1304	0,76	0,30	0,00	0,61									
	33	657	328	165	1303	0,15	0,00	0,61	0,69									
	34	658	329	164	1307	0,30	0,30	0,00	0,38									
	35	652	326	165	1317	0,61	0,61	0,61	0,38									
	36	658	327	164	1315	0,30	0,30	0,00	0,23									

Додаток В
Акти впровадження

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Керівник

ТОВ «Виробниче підприємство Будмеханізація»

ПАВЛЬ Павло

_____ 2025 р.



АКТ

про впровадження у виробничу діяльність підприємства
результатів дисертаційної роботи на тему:

**«Обґрунтування параметрів роботи автономного універсального
мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетону»**

Даний акт засвідчує, що при виконанні будівельних робіт на підприємстві впроваджено спосіб змішування бетонних сумішей, розроблений у межах виконання дисертаційної роботи та реалізований із використанням гравітаційного бетонозмішувача. Розроблений спосіб передбачає удосконалення процесу перемішування компонентів бетонної суміші з метою підвищення її однорідності та постійних значень технологічних показників. Під час будівельних робіт проводилось відновлення конструкцій і підпірних елементів споруди підприємства, а також влаштування бетонних стяжок.

У процесі впровадження було забезпечено роботу гравітаційного бетонозмішувача в штатних режимах експлуатації. Застосування удосконаленого способу змішування дозволило оптимізувати перебіг технологічних операцій приготування бетонних сумішей, зменшити нерівномірність розподілу компонентів та покращити реологічні властивості бетонної суміші.

У результаті впровадження забезпечено збільшення продуктивності виконання бетонних робіт. Якість бетонної суміші, приготованої із застосуванням удосконаленого способу змішування, відповідала вимогам чинних нормативних документів і технічних умов на виконання відповідних видів будівельних робіт. Порушень технологічної дисципліни та відхилень від встановлених вимог у процесі впровадження не виявлено.

Отримані результати впровадження підтверджують ефективність і доцільність застосування розробленого способу змішування бетонних сумішей та свідчать про можливість його подальшого використання у виробничій діяльності підприємства при виконанні будівельних і ремонтно-відновлювальних робіт.

Представник ТОВ «Виробниче підприємство Будмеханізація»:

Керівник




ПАВЛЬ Павло


Представники

Національного університету

«Полтавська Політехніка

імені Юрія Кондратюка:

 ВІРЧЕНКО Віктор

 РУДИК Ростислав



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Голова кооперативу
ЖБК «Ворскла»
САЛЬНИКОВ Роман
« 06 » 2025 р.

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
у господарську діяльність житлово-будівельного кооперативу
на тему:

**«Обґрунтування параметрів роботи автономного універсального
мобільного малогабаритного обладнання для приготування бетону»**

Даний акт засвідчує, що при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт у багатопверховому житловому будинку впроваджено спосіб змішування бетонних сумішей, розроблений у межах виконання дисертаційної роботи та реалізований із використанням гравітаційного бетонозмішувача. Розроблений спосіб спрямований на підвищення ефективності процесу приготування бетонних сумішей безпосередньо на місці виконання робіт в умовах обмеженого простору та щільної забудови.

Впровадження зазначеного способу здійснювалося при відновленні бетонних ділянок сходових маршів і сходових майданчиків, відмостки, балконних плит, а також під час улаштування вирівнювальних стяжок у підвальних приміщеннях будівлі.

У процесі впровадження було забезпечено роботу обладнання в штатних режимах експлуатації без порушення технологічної дисципліни та без негативного впливу на поточну експлуатацію будівлі. Застосування способу дозволило зменшити тривалість технологічних операцій приготування бетонних сумішей, підвищити рівномірність їх структури.

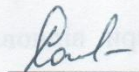
У результаті впровадження досягнуто підвищення темпів виконання ремонтно-відновлювальних робіт, скорочення часу приготування бетонних сумішей та забезпечення необхідної якості бетонних сумішей, що

використовувалися при відновленні конструктивних елементів будівлі. Це дало змогу оптимізувати організацію ремонтних робіт і забезпечити належний рівень якості виконання робіт в умовах поточної експлуатації житлового будинку.


Якість бетонних сумішей, приготованих із застосуванням впровадженого способу змішування, відповідала вимогам чинних нормативних документів і технічних умов, що регламентують виконання ремонтно-відновлювальних робіт у житлово-комунальному господарстві. Зауважень щодо якості сумішей та технології їх приготування у процесі впровадження не виявлено.


Отримані результати свідчать про практичну доцільність, технологічну ефективність і можливість подальшого широкого застосування впровадженого способу змішування бетонних сумішей у сфері житлово-комунального господарства, зокрема при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт у багатоповерхових житлових будинках, що перебувають в експлуатації.

Представник ЖБК «Ворскла»:
Голова кооперативу

 САЛЬНИКОВ Роман

Представники
Національного університету
«Полтавська Політехніка
імені Юрія Кондратюка:

 ВІРЧЕНКО Віктор

 РУДИК Ростислав

Додаток Г
Патенти на корисну модель



(11) **159089**(19) **UA**(51) МПК (2025.01)
B28C 5/00
C04B 40/00

<p>(21) Номер заявки: u 2024 04718</p> <p>(22) Дата подання заявки: 01.10.2024</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 24.04.2025</p> <p>(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: 23.04.2025, Бюл. № 17</p>	<p>(72) Винахідники: Рудик Ростислав Юрійович, UA, Вірченко Віктор Вікторович, UA, Сальніков Роман Юрійович, UA</p> <p>(73) Володілець: НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА", просп. Першотравневий, 24, м. Полтава, 36011, UA</p>
---	---

(54) Назва корисної моделі:

СПОСІБ ЗМІШУВАННЯ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ

(57) Формула корисної моделі:

Спосіб змішування бетонних сумішей, що включає перемішування компонентів у гравітаційному бетонозмішувачі, який має лопаті, закріплені на внутрішній поверхні обертового барабана, який **відрізняється** тим, що під час обертання барабана здійснюють періодичну зміну кута його нахилу в обидва напрямки на 15-20 градусів за допомогою гідроприводу.



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 161941

**УНІВЕРСАЛЬНИЙ АВТОНОМНИЙ ГРАВІТАЦІЙНИЙ
БЕТНОЗМШУВАЧ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей
21.01.2026.

В.о. директора
Державної організації «Український
національний офіс інтелектуальної
власності та інновацій»

Б.М. Падучак



(11) **161941**(19) **UA**(51) МПК
B28C 5/42 (2006.01)
B28C 5/18 (2006.01)
G05B 19/042 (2006.01)

<p>(21) Номер заявки: u 2025 02513</p> <p>(22) Дата подання заявки: 28.05.2025</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 22.01.2026</p> <p>(46) Дата публікації відомостей про державну реєстрацію та номер Бюлетеня: 21.01.2026, Бюл. № 3</p>	<p>(72) Винахідники: Рудик Ростислав Юрійович, UA, Вірченко Віктор Вікторович, UA, Сальніков Роман Юрійович, UA</p> <p>(73) Володілець: НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА", просп. Віталія Грицаєнка, 24, м. Полтава, 36011, UA</p>
--	--

(54) Назва корисної моделі:

УНІВЕРСАЛЬНИЙ АВТОНОМНИЙ ГРАВІТАЦІЙНИЙ БЕТОНОЗМІШУВАЧ

(57) Формула корисної моделі:

1. Універсальний автономний гравітаційний бетонозмішувач, що містить раму, змішувальний барабан, ківш, генератор, блок керування, який **відрізняється** тим, що змішувальний барабан закріплений на траверсі з можливістю обертання навколо горизонтальної осі за допомогою гідромотора через зубчастий вінець, який взаємодіє з опорними роликками і захищений кожухом, при цьому барабан встановлений на опорно-поворотній платформі з можливістю повороту на кут до 210° для вивантаження бетонної суміші в різних напрямках.

2. Бетонозмішувач за п. 1, який **відрізняється** тим, що блок керування виконаний з можливістю дистанційного керування всіма вузлами бетонозмішувача за допомогою пульта керування.

3. Бетонозмішувач за п. 1, який **відрізняється** тим, що рама виконана з поворотним шарніром, конструктивно розташованим між її секціями, що забезпечує адаптацію до нерівностей ґрунту та покращує прохідність обладнання.