

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КУЗУБ ЮРІЙ ОЛЕГОВИЧ**

**УДК 621.929.3-843:691.53(043.3)**

**ДИСЕРТАЦІЯ**  
**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РОЗЧИНОЗМІШУВАЧА**  
**З ПРИВОДОМ ВІД ВАЛУ ТРАНСМІСІЇ МОТОБЛОКА**

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.



Ю. О. Кузуб

Науковий керівник

кандидат технічних наук, доцент

Вірченко Віктор Вікторович

Полтава – 2026

## АНОТАЦІЯ

Кузуб Ю.О. Обґрунтування параметрів розчинозмішувача з приводом від вала трансмісії мотоблока. – 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.

Підвищення ефективності приготування будівельних розчинів набуває особливого значення за відсутності стаціонарного електропостачання, обмежених енергетичних ресурсів та необхідності виконання робіт у маломасштабному будівництві. Використання змішувачів з електроприводом у таких умовах супроводжується підвищеними енерговитратами, збільшенням тривалості підготовчих операцій і зниженням мобільності технологічного обладнання.

Аналіз існуючих конструкцій розчинозмішувачів показав, що більшість із них орієнтовані на використання стаціонарних джерел енергії та недостатньо пристосовані до роботи в польових умовах. Одним із перспективних напрямів удосконалення змішувального обладнання є застосування механічного привода від вала трансмісії мотоблока, що забезпечує автономну роботу змішувача зі збереженням необхідних технологічних показників.

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-технічну задачу обґрунтування параметрів роботи розчинозмішувача з приводом від вала трансмісії мотоблока. Одержано аналітичні залежності для визначення кінематичних та енергетичних параметрів змішування з урахуванням передавання крутного моменту від трансмісії мобільного енергетичного засобу до змішувального органа. Запропоновано стохастичний підхід до оцінювання однорідності розчинної суміші, який дає змогу визначати раціональну тривалість змішування та частоту обертання робочого органа.

Експериментально встановлено, що раціональними параметрами роботи розчинозмішувача є коефіцієнт заповнення робочого об'єму 0,6–0,7 та частота

обертання змішувального вала 35–40 об/хв, за яких досягаються найвища ефективність перемішування й необхідна однорідність цементно-піщаних розчинів. Підтверджено можливість ефективної роботи обладнання без використання зовнішніх джерел електроенергії.

Встановлено, що використання розробленого розчинозмішувача дає змогу зменшити енерговитрати на 45–50 %, скоротити тривалість циклу змішування на 25–30 % та підвищити продуктивність праці на 12–15 % порівняно зі змішувачами аналогічного об'єму з електроприводом. Зниження трудомісткості приготування розчинів до 0,25 людино·год/м<sup>3</sup> і собівартості їх виготовлення на 20–25 % підтверджує економічну доцільність запропонованого технічного рішення для маломасштабного будівництва.

Одержані результати можуть бути використані для подальшого вдосконалення мобільних змішувальних установок і обґрунтування їх конструктивних та режимних параметрів під час проєктування обладнання для приготування будівельних розчинів.

Об'єктом дослідження є розчинозмішувач з приводом від валу трансмісії мотоблока та його конструктивні й технологічні параметри, що визначають продуктивність, однорідність суміші та енергоефективність процесу приготування будівельних розчинів.

Предметом дослідження є процеси приготування будівельних розчинів у змішувальних установках примусової дії з автономним механічним приводом від валу трансмісії мотоблока та вплив конструктивних і режимних параметрів обладнання на ефективність і енергетичні показники процесу змішування.

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності процесу приготування будівельних розчинів шляхом обґрунтування конструктивних і режимних параметрів розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

– вперше встановлено закономірності впливу кінематичних параметрів привода від валу трансмісії мотоблока на інтенсивність перемішування

будівельних розчинів та енергетичні показники роботи розчинозмішувача примусової дії;

– отримало подальший розвиток застосування стохастичних моделей для оцінювання однорідності будівельних розчинів у змішувачах примусової дії;

– отримано аналітичні залежності для визначення кінематичних і енергетичних параметрів процесу змішування з урахуванням передачі крутного моменту від трансмісії мотоблока до робочого органа змішувача;

– експериментально обґрунтовано раціональні параметри роботи розчинозмішувача (коефіцієнт заповнення робочого об'єму 0,6–0,7, частота обертання змішувального вала 35–40 об/хв, тривалість змішування 4–6 хв), за яких забезпечується максимальна однорідність розчинної суміші при меншому енергоспоживанні;

– отримало подальший розвиток теоретичні положення щодо механізму інтенсифікації процесу перемішування будівельних розчинів у змішувачах примусової дії за рахунок використання механічного привода від мобільного джерела механічної енергії.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання розробленої конструкції розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока для приготування будівельних розчинів в умовах відсутності стаціонарного електропостачання під час виконання робіт маломасштабного та індивідуального будівництва.

Отримані аналітичні залежності та раціональні параметри роботи розчинозмішувача можуть бути використані під час інженерних розрахунків, проектування мобільного змішувального обладнання та вибору режимів роботи змішувачів залежно від властивостей будівельних розчинів і умов їх застосування.

Результати дисертаційного дослідження впроваджено у виробничу діяльність ТОВ «Виробниче підприємство “Будмеханізація”» (м. Полтава) та ЖБК «Ворскла» (м. Полтава) під час виконання ремонтно-будівельних робіт із

приготування будівельних розчинів, що підтверджено відповідними актами впровадження.

Практичне використання розробленого розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока підтвердило доцільність його застосування, надійність роботи та ефективність процесу приготування будівельних розчинів в умовах відсутності стаціонарного електропостачання. Отримані результати засвідчили можливість використання запропонованої конструкції в автономних малогабаритних змішувальних установках для індивідуального, ремонтного та маломасштабного будівництва.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, зумовлену необхідністю підвищення ефективності приготування будівельних розчинів в умовах будівельного майданчика, особливо під час виконання робіт маломасштабного будівництва за відсутності стаціонарного електропостачання. Визначено мету й основні завдання дослідження, сформульовано об'єкт і предмет дослідження. Описано методи дослідження, використані для теоретичного обґрунтування та експериментальної перевірки параметрів розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока. Сформульовано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі здійснено аналітичний огляд сучасного стану засобів і технологій приготування будівельних розчинів. Розглянуто вимоги до змішувального обладнання та показників якості розчинних сумішей, проаналізовано існуючі конструкції розчинозмішувачів і систем їх приводів. За результатами аналізу визначено основні недоліки традиційних технічних рішень та обґрунтовано доцільність застосування привода від валу трансмісії мотоблока.

У другому розділі виконано теоретичні дослідження роботи розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока. Розроблено конструктивну схему обладнання та обґрунтовано принцип його роботи в умовах будівельного майданчика. Запропоновано стохастичну модель процесу змішування будівельних розчинів, а також одержано аналітичні залежності для

визначення кінематичних і енергетичних параметрів, що дало змогу встановити раціональні режими роботи змішувача.

У третьому розділі подано результати експериментальних досліджень процесу змішування будівельних розчинів у розчинозмішувачі з приводом від вала трансмісії мотоблока. Розроблено програму й методики експериментальних досліджень, наведено характеристику обладнання, матеріалів і вимірювальних засобів. На основі отриманих експериментальних даних встановлено раціональні параметри роботи змішувача та підтверджено адекватність запропонованих теоретичних положень.

У четвертому розділі висвітлено результати виробничих випробувань розробленого розчинозмішувача в умовах будівельного майданчика. Подано його основні технічні характеристики та результати експлуатаційної перевірки на реальних об'єктах будівництва. Виконано оцінку техніко-економічної ефективності застосування змішувача й підтверджено зниження енерговитрат і тривалості циклу змішування, що засвідчено актами впровадження.

У додатках наведено матеріали, що доповнюють основні положення дисертаційної роботи, зокрема акти впровадження результатів досліджень у виробничу діяльність будівельних підприємств і список наукових праць здобувача за темою дисертації. Наведені матеріали підтверджують практичне значення отриманих результатів та їх апробацію.

Ключові слова: будівельний розчин, розчинозмішувальна установка, змішування, мотоблок, вал змішувача, однорідність суміші, стохастична модель, критерії подібності, математична модель, продуктивність, потужність приводу, малогабаритне обладнання, робочі параметри, енергоефективність, робочий орган.

#### ANOTATION

Kuzub Yu.O. Justification of the parameters of the mortar mixer driven by the transmission shaft of the walk-behind tractor. – Qualification scientific work submitted as a manuscript.

Doctor of Philosophy dissertation in specialty 133 Industrial Mechanical Engineering. – National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”, Poltava, 2026.

Improving the efficiency of mortar preparation becomes particularly important when stationary power supply is unavailable, energy resources are limited, and construction activities are performed on small-scale building sites. Under such conditions, conventional electrically driven mixers are characterized by higher energy consumption, longer preparation time, and limited mobility.

An analysis of existing mortar mixer designs showed that most of them rely on stationary power sources and are poorly suited for operation under field conditions. One promising approach involves using a mechanical drive powered by the transmission shaft of a walk-behind tractor, enabling autonomous mixer operation while maintaining the required technological performance.

The dissertation solves the scientific and engineering problem of substantiating operating parameters for a mortar mixer driven by the transmission shaft of a walk-behind tractor. Analytical relationships were derived to determine kinematic and energy parameters of the mixing process, taking into account torque transmission from the mobile power unit to the mixing shaft. A stochastic approach for evaluating mortar homogeneity was proposed, making it possible to determine the rational mixing duration and rotational speed of the working body.

Experimental studies established that the rational operating conditions correspond to a filling ratio of 0.6–0.7 and a mixing shaft speed of 35–40 rpm. These parameters ensure maximum mixing efficiency together with the required homogeneity of cement–sand mortars. The developed mixer was also confirmed to operate efficiently without external electrical power.

The proposed design reduced energy consumption by 45–50%, shortened the mixing cycle by 25–30%, and increased labour productivity by 12–15% compared with electrically driven mixers of similar capacity. Labour input decreased to 0.25 man-hours per cubic metre, while production cost was reduced by 20–25%, confirming the economic feasibility of the proposed solution for small-scale construction.

The obtained results can be applied to further development of mobile mixing equipment and to substantiation of design and operating parameters for mortar mixers intended for construction work under field conditions.

The object of the research is a mortar mixer driven by the transmission shaft of a walk-behind tractor together with its structural and technological parameters governing productivity, mixture homogeneity, and energy efficiency during mortar preparation.

The subject of the research comprises mortar preparation processes in forced-action mixers equipped with a mechanical drive powered by the transmission shaft of a walk-behind tractor, as well as the influence of structural and operating parameters on mixing efficiency and energy performance.

The aim of the dissertation is to improve mortar preparation efficiency by substantiating the structural and operating parameters of a mortar mixer driven by the transmission shaft of a walk-behind tractor.

Scientific novelty of the obtained results is as follows:

- for the first time, the influence of kinematic parameters of the transmission-driven system powered by a walk-behind tractor on mixing intensity and energy performance of a forced-action mortar mixer has been established;
- the application of stochastic models for evaluating mortar homogeneity in forced-action mixers has been further developed;
- analytical relationships have been derived for determining kinematic and energy parameters of the mixing process while accounting for torque transmission from the walk-behind tractor transmission to the mixing mechanism;
- rational operating parameters of the mortar mixer have been experimentally substantiated, including a filling coefficient of 0.6–0.7, a mixing shaft rotational speed of 35–40 rpm, and a mixing time of 4–6 min, providing maximum mixture homogeneity with reduced energy consumption;
- theoretical principles describing the mechanism of mixing intensification in forced-action mortar mixers through the use of a mechanical drive supplied by a mobile mechanical power source have been further developed.

The practical significance of the obtained results lies in the possibility of using the developed mortar mixer driven by the transmission shaft of a walk-behind tractor for mortar preparation under conditions without access to grid electricity during small-scale and individual construction projects.

The derived analytical relationships and rational operating parameters of the mortar mixer can be applied in engineering calculations, the design of mobile mixing equipment, and the selection of operating modes according to mortar properties and application conditions.

The research results have been implemented in the production activities of Budmekhanizatsiia Manufacturing Enterprise LLC (Poltava, Ukraine) and the Vorskla Housing Cooperative (Poltava, Ukraine) during repair and construction work involving mortar preparation, as confirmed by the corresponding implementation certificates.

Practical application of the developed mortar mixer driven by the transmission shaft of a walk-behind tractor confirmed the feasibility of the proposed design, its reliable operation, and high efficiency in mortar preparation without access to grid electricity. The obtained results also demonstrated the potential for using the proposed design in compact mobile mixing units intended for individual, repair, and small-scale construction projects.

The Introduction substantiates the relevance of the dissertation topic, driven by the need to improve the efficiency of mortar preparation under construction-site conditions, particularly during small-scale construction where stationary electrical power is unavailable. The research objective and main tasks are defined, while the object and subject of the study are specified. The research methods used for theoretical substantiation and experimental verification of the operating parameters of a mortar mixer driven by the transmission shaft of a walk-behind tractor are described. The scientific novelty and practical significance of the obtained results are also presented.

Chapter 1 provides an analytical review of current equipment and technologies used for preparing construction mortars. Requirements for mixing equipment and mortar quality are considered, while existing mortar mixer designs and drive systems are analysed. Based on this review, the main limitations of conventional technical

solutions are identified, and the feasibility of using a drive powered by the transmission shaft of a walk-behind tractor is substantiated.

Chapter 2 presents theoretical investigations into the operation of the proposed mortar mixer driven by the transmission shaft of a walk-behind tractor. A structural design of the equipment is developed, and its operating principle under construction-site conditions is substantiated. A stochastic model describing the mixing process is proposed, and analytical relationships are derived to determine kinematic and energy parameters. These relationships make it possible to establish rational operating conditions for the mixer.

Chapter 3 presents the results of experimental investigations into mortar mixing using the proposed transmission-driven mixer. Experimental procedures are developed, and the characteristics of the equipment, materials, and measuring instruments are described. Analysis of the experimental data made it possible to determine rational operating parameters and to confirm the adequacy of the proposed theoretical model.

Chapter 4 describes industrial testing of the developed mortar mixer under actual construction-site conditions. The main technical characteristics of the equipment and the results of field performance evaluation are presented. A technical and economic assessment confirmed reduced energy consumption and shorter mixing time, as verified by implementation reports.

The Appendices contain supplementary materials supporting the main provisions of the dissertation, including implementation reports documenting industrial application of the research results and a list of the author's scientific publications related to the dissertation topic. These materials confirm both the practical significance of the obtained results and their successful validation.

Keywords: construction mortar, mortar mixing unit, mixing process, walk-behind tractor, mixing shaft, mixture homogeneity, stochastic model, similarity criteria, mathematical model, productivity, drive power, compact equipment, operating parameters, energy efficiency, mixing element.

## Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

1. Kuzub Yuriy, Rudyk Rostyslav, (2026). Study of mixing building mortars in a mortar mixer driven by a walk-behind tractor transmission shaft. *Construction Engineering*, (44), 78-85.

<https://doi.org/10.32347/tb.2026-44.0708>

Особистий внесок здобувача: розроблено конструкцію розчинозмішувача; побудовано математичну модель процесу змішування; виконано теоретичні розрахунки кінематичних та енергетичних параметрів; проведено аналіз впливу режимів роботи на однорідність суміші та енерговитрати.

2. Крот О. Ю., Кузуб Ю. О., Крючков О. А. (2023) Способи зменшення негативного впливу резонансних коливань на якість бетонних виробів при їх віброущільненні. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 2 (101), с. 115-120.

<https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.115-120>

Особистий внесок здобувача: проведено реєстрацію та обробку тензометричних даних; узагальнено результати щодо впливу резонансних коливань на якість бетонних виробів та визначено шляхи їх мінімізації.

3. 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 та класифікацію існуючого бетонозмішувального обладнання; узагальнено переваги й недоліки різних типів змішувачів; досліджено критерії оцінювання ефективності процесу змішування та розглянуто сучасні методи моделювання.

4. 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>

Особистий внесок здобувача: здійснено розрахунки кінематичних характеристик руху матеріалу в робочій камері; виконано порівняльний аналіз традиційних бетонозмішувачів та мішалки з приводом від мотоблока; проведено експериментальні дослідження роботи спіральної стрічкової мішалки, обробку та узагальнення отриманих результатів; сформульовано рекомендації щодо оптимізації конструкції для підвищення якості розчину та зниження енерговитрат.

5. 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: проведено аналіз літературних джерел щодо кінематики руху частинок у змішувачах; розроблено математичні залежності для опису траєкторій руху частинок з урахуванням дії гравітаційних, відцентрових та сил тертя; виконано числові розрахунки та оцінку ефективності інтенсифікації процесу змішування за допомогою гармонічних коливань.

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

6. О.Ю. Крот, Ю.О. Кузуб, О.А. Крючков. Розробка стенда для експериментального дослідження механічної характеристики асинхронного двигуна. Матеріали 75-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 02 травня – 25 травня 2023 року), с. 262-263.

7. О.Ю. Крот, Ю.О. Кузуб, О.А. Крючков. Розробка розчинозмішувача з приводом від колеса мотоблока. Матеріали 76-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (14-23.05.24, м. Полтава), с. 279-281.

8. О.Ю. Крот, Ю.О. Кузуб, О.А. Крючков, О.В. Пуховой. Моделювання процесу змішування у спіральному стрічковому бетонозмішувачі Матеріали VII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і

ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки» (25.04.24, м. Полтава), с. 17-19.

9. 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» (24.04.25, м. Полтава).

10. Kuzub, Y. O., & Sklyarenko, T. O. (2026). Research on mortar mixer driven by the transmission shaft of a walk-behind tractor. In Sustainable development of cities: Post-war period: Proceedings of the XIX All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Higher Education Applicants (91st Scientific and Technical Conference of O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv) (Part 2, pp. 77–79).

11. Кузуб, Ю. О., & Вірченко, В. В. (2026). Енергетична оцінка процесу змішування будівельного розчину у змішувачі з гвинтовими лопатками. Тези 78-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів (Т. 1, с. 248–249).

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	18
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМІВ УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ РОЗЧИНІВ.....	25
1.1 Стан механізації процесів приготування будівельних розчинів у малому будівництві.....	25
1.2 Вимоги до якості будівельних розчинів та обладнання для їх приготування.....	27
1.3 Аналіз конструкцій та класифікація розчинозмішувального обладнання .....	30
1.3.1 Класифікація змішувачів за режимом роботи.....	32
1.3.2 Класифікація змішувачів за ступенем мобільності .....	34
1.3.3 Класифікація змішувачів за способом змішування.....	38
1.3.4 Аналіз конструкцій робочих органів змішувачів .....	48
1.4 Аналіз приводів змішувального обладнання та можливості використання мотоблоків .....	51
1.5 Обґрунтування напрямів підвищення ефективності розчинозмішувачів .....	63
1.6 Висновки до розділу 1 .....	65
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ РОЗЧИНОЗМІШУВАЧА З ПРИВОДОМ ВІД ВАЛА ТРАНСМІСІЇ МОТОБЛОКА.....	68
2.1 Аналіз кінематичної схеми приводу від валу трансмісії мотоблока ...	68
2.2 Кінематичні та енергетичні закономірності роботи змішувального органа.....	74
2.3 Теоретичне визначення силових і енергетичних параметрів приводу змішувача .....	82

2.3.1	Визначення сили взаємодії робочих органів із сумішшю та моменту опору змішуванню.....	82
2.3.2	Визначення крутного моменту приводу змішувача.....	85
2.3.3	Визначення потужності приводу змішувача з урахуванням втрат у трансмісії.....	86
2.4.	Стохастична модель процесу змішування.....	88
2.4.1	Формалізація просторової структури змішувача та початкового розподілу компонентів.....	88
2.4.2	Побудова матриці ймовірностей переходів між комірками.....	93
2.4.3	Побудова матриці переходів для конкретного випадку.....	99
2.4.4	Адаптація матриці до змінних умов змішування.....	102
2.5	Аналіз динаміки процесу змішування.....	103
2.5.1	Аналіз адаптивного стану системи.....	103
2.5.2	Динаміка переходів станів у часі.....	108
2.5.3	Критерій оцінки однорідності та визначення моменту її досягнення.....	114
2.5.4	Практичні рекомендації щодо реалізації адаптивного режиму змішування.....	120
2.6	Аналіз чутливості моделі.....	124
2.6.1	Загальні положення аналізу чутливості.....	124
2.6.2	Вплив реологічних параметрів суміші.....	125
2.6.3	Вплив кінематичних параметрів приводу.....	129
2.6.4	Вплив геометричних параметрів робочого органа.....	131
2.7	Визначення технічної продуктивності розчинозмішувача.....	133
2.8	Теоретичне визначення загальних енерговитрат процесу змішування.....	137
2.9	Висновки до розділу 2.....	141
	<b>РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ РОЗЧИНОЗМІШУВАЧА З ПРИВОДОМ ВІД ВАЛУ ТРАНСМІСІЇ МОТОБЛОКА.....</b>	<b>143</b>

3.1 Програма досліджень.....	143
3.2 Характеристика експериментального обладнання, матеріалів та засобів вимірювання.....	144
3.2.1 Експериментальне обладнання.....	144
3.2.2 Матеріали досліджень .....	146
3.2.3 Засоби вимірювання параметрів процесу змішування.....	148
3.3 Методика проведення експериментальних досліджень та обробки результатів.....	149
3.4 Визначення раціональних параметрів процесу змішування в розчинозмішувачі з приводом від трансмісії мотоблока .....	152
3.5 Експериментальні дослідження процесу змішування будівельних розчинів .....	159
3.6 Експериментальні дослідження споживаної потужності розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока.....	165
3.7 Дослідження продуктивності та енергетичної ефективності розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока.....	169
3.8 Висновки до розділу 3 .....	172
<b>РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗЧИНОЗМІШУВАЧА З ПРИВОДОМ ВІД ВАЛУ ТРАНСМІСІЇ МОТОБЛОКА .....</b>	<b>173</b>
4.1 Експериментальна перевірка експлуатаційних характеристик розробленого обладнання.....	173
4.2 Практичне використання розробленого розчинозмішувача.....	176
4.3 Оцінка економічної ефективності впровадження обладнання.....	180
4.4 Висновки до розділу 4 .....	183
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>184</b>
Список використаних джерел.....	186
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача.....	199
ДОДАТОК Б. Акти впровадження .....	201

## ВСТУП

### **Актуальність**

Підвищення ефективності будівельного виробництва зумовлює необхідність удосконалення технологічних процесів приготування будівельних розчинів, зокрема шляхом застосування мобільних, енергоефективних та універсальних засобів механізації. Особливої актуальності це питання набуває під час виконання робіт у маломасштабному та індивідуальному будівництві, де ефективність приготування будівельних розчинів безпосередньо впливає на технологічні показники будівельного процесу, експлуатаційні властивості будівельних конструкцій та економічну ефективність виконання робіт.

Традиційні методи приготування розчинів, засновані на ручній праці або використанні стаціонарних вузлів, характеризуються значними витратами часу й енергії та обмежують можливості застосування у віддалених чи важкодоступних місцевостях. Існуючі розчинозмішувачі, як правило, відзначаються недостатньою продуктивністю, високою енергоємністю та потребою у додаткових джерелах живлення, що ускладнює їх використання в умовах обмеженої інфраструктури та підвищує собівартість будівельних робіт.

Водночас мотоблоки, які широко застосовуються в сільському господарстві, мають значний потенціал як універсальні енергетичні засоби. Використання їх трансмісійного валу для приводу допоміжного обладнання створює передумови для розроблення компактних і мобільних систем приготування будівельних сумішей.

Розробка розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока забезпечує поєднання мобільності, енергоефективності та технологічної універсальності. Таке обладнання сприятиме зменшенню частки ручної праці, підвищенню продуктивності та забезпеченню однорідності будівельних розчинів. Його застосування є особливо актуальним для малогабаритного та модульного будівництва, ремонтних робіт, а також відновлення об'єктів у регіонах, що зазнали руйнувань унаслідок військових дій.

Саме тому, наукове обґрунтування та практична реалізація конструкції розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока має суттєве значення для розвитку сучасних технологій будівельного виробництва, підвищення ефективності виробничих процесів та розширення можливостей виконання будівельних робіт в умовах відсутності стаціонарного електропостачання.

### **Мета і завдання дослідження**

Метою роботи є підвищення ефективності процесу приготування будівельних розчинів безпосередньо на будівельному майданчику шляхом створення розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблоку та обґрунтування раціональних параметрів його функціонування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

1. Здійснити аналіз існуючих конструкцій обладнання для приготування будівельних розчинів та визначити ключові напрями їх удосконалення з урахуванням вимог автономності та енергоефективності.

2. Розробити принципову конструкцію розчинозмішувача, що використовує енергію від валу трансмісії мотоблоку як джерело приводу.

3. Створити математичну модель роботи розчинозмішувача на основі аналізу динаміки процесу змішування з урахуванням впливу геометричних параметрів, кінематичних характеристик приводу та фізико-механічних властивостей компонентів розчину.

4. Провести аналітичні та експериментальні дослідження процесу приготування будівельних розчинів у розробленому обладнанні, визначивши залежності між основними технологічними параметрами та якісними показниками готової суміші.

5. Виконати розрахунок продуктивності, енергоефективності та інших основних техніко-експлуатаційних показників роботи розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблоку.

6. Встановити раціональні режими роботи обладнання при приготуванні будівельних розчинів у різних умовах експлуатації.

7. Провести випробування розробленого розчинозмішувача в умовах будівельного майданчика та здійснити техніко-економічне обґрунтування його ефективності у порівнянні з традиційними способами приготування розчинів.

**Об'єкт дослідження:** розчинозмішувач з приводом від валу трансмісії мотоблока, його конструктивні особливості, кінематичні схеми та режими роботи, що забезпечують ефективне приготування будівельних розчинів.

**Предмет дослідження:** процеси приготування будівельних розчинів із застосуванням обладнання, що приводиться в дію від валу трансмісії мотоблока; вплив конструктивних і технологічних параметрів на якість суміші та енергоефективність роботи.

### **Методи дослідження**

При виконанні дисертаційної роботи для обґрунтування параметрів стаціонарного розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока були використані як загальні, так і спеціальні методи наукових досліджень.

Загальні методи включали емпіричні та теоретичні підходи. Емпіричні методи застосовувались на етапі збору даних про існуючі конструкції розчинозмішувачів та обладнання аналогічного призначення. При проведенні аналізу здійснювалося порівняння гравітаційних та примусових змішувачів за основними ознаками: продуктивністю, енергоспоживанням та якістю змішування. Теоретичні методи використовувались для розробки математичної моделі процесу змішування, яка враховує геометричні параметри робочої ємності, кінематичні характеристики приводу від мотоблока та фізико-механічні властивості компонентів розчину. Методи аналогії та узагальнення застосовувались для визначення оптимальних конструктивних рішень.

Спеціальні методи досліджень включали метод математичного моделювання для опису динаміки процесу змішування; експериментально-

статистичний метод для проведення лабораторних та виробничих випробувань дослідного зразка обладнання та статистичної обробки отриманих даних; метод порівняльного аналізу для зіставлення результатів роботи розробленого змішувача з традиційними способами приготування розчинів; метод оптимізації технологічних параметрів для визначення раціональних режимів роботи обладнання шляхом комп'ютерного моделювання та експериментів; функціонально-вартісний аналіз для оцінки економічної доцільності впровадження розчинозмішувача з приводом від мотоблока.

Для підтвердження адекватності математичної моделі було проведено експериментальні випробування на макеті розчинозмішувача та здійснено порівняльний аналіз отриманих даних із теоретичними розрахунками. Комплексне застосування зазначених 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 встановлено закономірності впливу кінематичних параметрів привода від валу трансмісії мотоблока на інтенсивність перемішування будівельних розчинів та енергетичні показники роботи розчинозмішувача.

2. Вперше розроблено математичну модель процесу змішування будівельних розчинів у розчинозмішувачі з приводом від валу трансмісії мотоблока, яка враховує взаємний вплив геометричних параметрів робочих органів, режимів роботи привода та фізико-механічних властивостей суміші.

3. Отримали подальший розвиток методи оцінювання однорідності будівельних розчинів на основі стохастичного підходу, що дозволяє визначати раціональну тривалість змішування та прогнозувати якість готової суміші.

4. Експериментально обґрунтовано раціональні параметри роботи розчинозмішувача (коефіцієнт заповнення робочого об'єму 0,6–0,7, частота обертання змішувального вала 35–40 об/хв, тривалість змішування 4–6 хв), за яких забезпечується максимальна однорідність будівельного розчину при мінімальних енерговитратах.

### **Практичне значення одержаних результатів**

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні та впровадженні розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока, призначеного для приготування будівельних розчинів в умовах відсутності стаціонарного електропостачання. Запропонована конструкція забезпечує використання мотоблока як автономного джерела механічної енергії, що дозволяє знизити енерговитрати процесу приготування розчинів та підвищити ефективність виконання будівельних робіт.

Отримані в роботі аналітичні залежності та встановлені раціональні параметри роботи розчинозмішувача можуть бути використані під час проектування змішувального обладнання, виконання інженерних розрахунків і вибору режимів змішування будівельних розчинів різної рухомості. Використання розробленого обладнання забезпечує зменшення енерговитрат на 45–50 %, скорочення тривалості циклу змішування на 25–30 % та підвищення продуктивності праці на 12–15 % порівняно з традиційними змішувачами аналогічного об'єму.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені на ТОВ «Виробниче підприємство “Будмеханізація”» та ЖБК «Ворскла», що підтверджено відповідними актами впровадження. Отримані результати можуть бути використані під час виконання ремонтно-будівельних робіт, індивідуального та маломасштабного будівництва в умовах обмеженого енергозабезпечення.

### **Особистий внесок здобувача**

Основні результати дисертаційного дослідження здобувач отримав самостійно. Формування наукової концепції, визначення напрямів роботи та узагальнення отриманих даних здійснювалося у співпраці з науковим керівником. У спільних публікаціях здобувачем проведено аналіз та класифікацію існуючого бетонозмішувального обладнання, узагальнено переваги й недоліки різних типів змішувачів; досліджено критерії оцінювання ефективності процесу змішування та розглянуто сучасні методи моделювання, розроблено конструкцію розчинозмішувача; побудовано математичну модель процесу змішування; виконано теоретичні розрахунки кінематичних та енергетичних параметрів; проведено аналіз впливу режимів роботи на однорідність суміші та енерговитрати, проведено реєстрацію та обробку тензометричних даних; узагальнено результати щодо впливу резонансних коливань на якість бетонних виробів та визначено шляхи їх мінімізації, здійснено розрахунки кінематичних характеристик руху матеріалу в робочій камері, виконано порівняльний аналіз традиційних бетонозмішувачів та змішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока; проведено експериментальні дослідження роботи спірального стрічкового змішувача, обробку та узагальнення отриманих результатів, сформульовано рекомендації щодо оптимізації конструкції для підвищення якості розчину та зниження енерговитрат, проведено аналіз літературних джерел щодо кінематики руху частинок у змішувачах; розроблено математичні залежності для опису траєкторій руху частинок з урахуванням дії гравітаційних, відцентрових та сил тертя; виконано числові розрахунки та оцінку ефективності інтенсифікації процесу змішування за допомогою гармонічних коливань.

### **Апробація результатів**

Основні положення, результати та висновки дисертаційної роботи були апробовані під час виступів на науково-технічних конференціях: Міжнародна конференція «Розбудова і відновлення машинобудівного комплексу України»,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет (30.05.23, м. Харків); 75-а наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (01.05- 26.05.2023); VI Всеукраїнська науково-технічна конференція «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (11.05.2023); VII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (25.04.2024); 76-а наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (14.05-23.05.2024); VIII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (24.04.2025); 77-а наукова конференція професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», (19-22 травня 2025); Міжнародна науково-практична конференція «Енергоощадні машини і технології», Київський національний університет будівництва і архітектури, (20-21.05.25, м. Київ).

### **Публікації**

За результатами проведених досліджень основні наукові положення дисертаційної роботи опубліковано у 11 публікаціях, з яких 4 наукових статей – у фахових наукових виданнях, включених до переліку МОН України, 1 стаття – у журналі, індексованому в міжнародній наукометричній базі Scopus. Апробацію результатів досліджень засвідчено публікаціями 6 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 102 найменувань та 2 додатків. Загальний обсяг роботи становить 203 сторінки машинописного тексту, містить 37 рисунків, 7 таблиць та 2 додатки на 5 сторінках.

## **РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМІВ УДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ БУДІВЕЛЬНИХ РОЗЧИНІВ**

### **1.1 Стан механізації процесів приготування будівельних розчинів у малому будівництві**

Розвиток приватного та маломасштабного будівництва зумовлює необхідність підвищення рівня механізації процесів приготування будівельних розчинів. Попри наявність широкого спектра промислово доступного обладнання, на більшості малих будівельних об'єктів досі переважає ручне приготування сумішей, що зумовлює підвищені трудовитрати, збільшення тривалості виконання робіт і погіршення якості готового розчину. Особливої актуальності це набуває в умовах обмежених ресурсів, зокрема за відсутності надійного електропостачання, що істотно знижує ефективність використання традиційних електричних змішувачів [1, 2]. Додатковим чинником, що зумовлює необхідність удосконалення технічних засобів приготування будівельних розчинів, є зростання попиту на індивідуальне житлове будівництво та ремонтні роботи, що потребує впровадження мобільних, енергоефективних і економічно доцільних технічних рішень.

Існуючі методи механізованого приготування будівельних розчинів мають низку конструктивних і експлуатаційних обмежень, що ускладнює їхнє ефективне застосування в умовах малого будівництва. Електричні розчинозмішувачі функціонально залежать від наявності джерела електропостачання, що унеможлиблює їх використання на будівельних майданчиках. Ручні методи приготування розчинів мають низьку продуктивність і часто зумовлюють нерівномірне змішування компонентів, що негативно впливає на фізико-механічні властивості готового матеріалу [3].

У зазначених умовах доцільним є використання мотоблоків, як джерела енергії для приводу змішувального обладнання. Мотоблоки набули широкого

розповсюдження в сільській місцевості завдяки своїй універсальності, мобільності та порівняно низьким експлуатаційним витратам. Здатність працювати на різних видах пального, відсутність потреби у стаціонарній інфраструктурі та можливість швидкого транспортування визначають їх переваги в умовах обмежених ресурсів. Ідея передачі крутного моменту безпосередньо від валу трансмісії мотоблока на змішувач дала б змогу реалізувати енергоефективний привод без залучення додаткових силових агрегатів, що сприяло б зменшенню енерговитрат і конструктивному спрощенню системи. Такий підхід може бути доцільним у випадках, коли основними вимогами є автономність, технологічна простота та економічна ефективність [4].

Основною метою даного дослідження є розроблення та технічне вдосконалення конструкції змішувача будівельних розчинів із приводом від валу трансмісії мотоблока з урахуванням усунення недоліків існуючих технічних рішень. Для досягнення цієї мети передбачається здійснити комплексний аналіз сучасних конструкцій змішувального обладнання, зокрема його робочих органів, систем передачі крутного моменту та застосовуваних матеріалів. Одним із ключових завдань є підвищення енергетичної ефективності системи шляхом оптимізації геометрії лопаток, зменшення втрат енергії під час передачі обертального руху та забезпечення адаптивності приводу до змінних режимів роботи мотоблока. Особливу увагу необхідно приділити дослідженню впливу конструктивних параметрів змішувача на якісні характеристики готового розчину, зокрема його однорідність та фізико-механічні властивості.

Важливим напрямом дослідження є також розроблення методик експериментальної перевірки ефективності запропонованих технічних рішень в умовах реальної експлуатації. До основних завдань належать визначення раціональних режимів роботи змішувача, оцінювання його продуктивності та порівняння з традиційними технологіями приготування будівельних розчинів. Реалізація зазначених завдань забезпечить створення енергоефективного, мобільного та доступного обладнання, здатного істотно підвищити якість і темпи виконання будівельних робіт у малому та приватному будівництві.

## 1.2 Вимоги до якості будівельних розчинів та обладнання для їх приготування

Процес приготування будівельних розчинів є одним із визначальних етапів реалізації будівельних і ремонтно-монтажних робіт, від якого значною мірою залежать експлуатаційні характеристики та довговічність будівельних конструкцій. У зв'язку з цим до обладнання, призначеного для приготування будівельних розчинів, висувається комплекс технологічних і експлуатаційних вимог, спрямованих на забезпечення необхідної однорідності суміші, енергоефективності процесу змішування, надійності функціонування обладнання та зручності його використання в умовах будівельного майданчика.

Однією з основних вимог до змішувального обладнання є забезпечення високої якості приготованого будівельного розчину, зокрема його однорідності, пластичності, водоутримувальної здатності та міцності після тужавлення. Забезпечення зазначених характеристик можливе за умови інтенсивного та рівномірного перемішування компонентів незалежно від складу будівельного розчину, зокрема цементно-піщаних, вапняних, гіпсових та інших різновидів розчинів [5-8]. Рівномірний розподіл в'язучого матеріалу в об'ємі суміші, запобігання розшарування компонентів суміші заповнювачів і утворенню грудок є необхідною передумовою формування заданих фізико-механічних властивостей будівельного матеріалу.

Не менш важливою є вимога до універсальності обладнання, що полягає у здатності працювати з широким спектром будівельних розчинів, які можуть відрізнятися як за своїм складом, так і за фізико-хімічними властивостями. Обладнання повинно функціонувати ефективно як з розчинами високої густини та малої рухомості, так і з легкими пластичними сумішами, не допускаючи розшарування чи втрати води з поверхні. Крім того, має передбачатися можливість регулювання основних параметрів процесу змішування: тривалості, інтенсивності перемішування, частоти обертання робочих органів тощо [9-12].

Енерговитрати змішувального обладнання є одним із визначальних показників його технічної та економічної ефективності, оскільки впливають на продуктивність технологічного процесу й собівартість приготування будівельних розчинів. Під час виконання робіт на тимчасових будівельних майданчиках доступ до стаціонарних джерел електропостачання нерідко є обмеженим або відсутнім. Це обумовлює необхідність застосування конструктивних рішень, які забезпечують раціональне використання енергії та зменшення її втрат у приводі, зокрема на подолання сил тертя, коливальні процеси й роботу обладнання на холостому ході [13–16].

Ефективність застосування змішувального обладнання значною мірою визначається його надійністю та ресурсом роботи в реальних умовах експлуатації. Змішувальне обладнання повинно бути здатне працювати в складних умовах експлуатації, включаючи підвищену вологість, запиленість, перепади температур та механічні навантаження. Вибір матеріалів для деталей і вузлів змішувального обладнання має враховувати стійкість до зношування, корозії та дії агресивних компонентів розчину [17-18]. Особливу увагу при цьому необхідно приділяти конструктивним параметрам робочих органів, зокрема їх формі, геометричним характеристикам, які безпосередньо впливають на ефективність процесу змішування та якість готового будівельного розчину [19-22].

Важливою експлуатаційною характеристикою змішувального обладнання є його мобільність, яка забезпечує можливість оперативної зміни місця виконання робіт без необхідності демонтажу або застосування складних транспортних засобів. Особливої актуальності ця вимога набуває в умовах малого та середнього будівництва, де характерною є часта зміна місця виконання робіт і обсягів приготування будівельного розчину залежно від технологічних потреб будівельного процесу. Компактність конструкції, відносно мала маса та можливість роботи за відсутності стаціонарного електропостачання суттєво розширюють сферу застосування змішувального обладнання [23-25].

Отже, до обладнання для приготування будівельного розчину висувається комплекс взаємопов'язаних вимог, що охоплюють технічну досконалість, якість кінцевого продукту, безпеку та зручність у використанні. Їх дотримання є необхідною передумовою підвищення ефективності будівельних робіт, економії ресурсів та забезпечення високих експлуатаційних характеристик будівельних конструкцій.

Визначення якості будівельного розчину здійснюється за сукупністю фізико-механічних, реологічних і технологічних показників, які повинні відповідати чинним нормативним вимогам та забезпечувати необхідні умови для формування міцної та однорідної структури матеріалу в конструкції [26-30]. Вимоги до якості будівельного розчину встановлюються з урахуванням умов його застосування, виду розчину (цементного, вапняного, змішаного тощо), способу укладання, а також характеру експлуатаційних навантажень на конструкції.

Однією з основних характеристик, що визначає якість будівельного розчину, є його міцність на стиск. Цей показник визначає здатність затверділого розчину витримувати навантаження, не зазнаючи руйнування. Випробування на стиск зазвичай проводиться на стандартних зразках у вигляді кубів або призм, які формують зі свіжоприготованої суміші та витримують у стандартних умовах протягом 7, 14 або 28 діб. Результати випробувань дозволяють оцінити відповідність міцності розчину заданим проектним значенням, а також здійснювати контроль за якістю під час виконання робіт [31-32].

Важливим критерієм є рухливість будівельного розчину, яка відображає її здатність легко заповнювати порожнини в кладці або опалубці без додаткових зусиль, ущільнення чи вібрації. Рухливість залежить від вмісту води замішування, співвідношення компонентів розчинної суміші, гранулометричного складу заповнювача, наявності хімічних добавок та часу, що минув після її приготування. Для оцінювання рухливості будівельних розчинів зазвичай використовують метод визначення глибини занурення стандартного конуса, а для окремих видів сумішей – метод розтікання [33-35].

Важливим показником якості будівельного розчину є її однорідність, яка характеризує рівномірність розподілу в'язучого матеріалу, заповнювачів і води по всьому об'єму суміші. Однорідність безпосередньо впливає на всі подальші властивості затверділого розчину – від механічної міцності до морозостійкості. Недостатньо перемішаний розчин здатний розшаровуватися, що ускладнює процес укладання та призводить до нерівномірного тужавлення, зниження міцності й естетичних дефектів поверхні конструкції [36-37].

Для забезпечення довговічності експлуатації затверділого розчину також важливими є такі властивості, як морозостійкість, водонепроникність та тріщиностійкість. Морозостійкість визначає здатність матеріалу витримувати багаторазові цикли заморожування й відтавання без втрати міцності або появи мікротріщин. Вона є критичною при використанні розчинів у зовнішніх або неутеплених конструкціях. Водонепроникність, у свою чергу, дозволяє зменшити капілярне підсмоктування вологи, що позитивно впливає на збереження структури та запобігає корозії закладених елементів. Тріщиностійкість пов'язана зі здатністю матеріалу компенсувати внутрішні напруження, які виникають при випробувань на міцність або зміні температурно-вологісних умов [38].

Проведений аналіз вимог до якості будівельних розчинів та обладнання для їх приготування показав, що ефективність роботи розчинозмішувальних установок визначається забезпеченням необхідної однорідності суміші, заданих фізико-механічних властивостей розчину, раціональних режимів перемішування, енергоефективності процесу та надійності функціонування обладнання в умовах будівельного майданчика.

### **1.3 Аналіз конструкцій та класифікація розчинозмішувального обладнання**

Механізоване приготування будівельних розчинів порівняно з ручними способами забезпечує підвищення продуктивності праці, більш точне дозування

компонентів та рівномірність їх перемішування, що сприяє формуванню заданих фізико-механічних властивостей розчину. У зв'язку з цим сучасні технологічні рішення у сфері приготування будівельних розчинів передбачають застосування змішувального обладнання, здатного забезпечувати інтенсивне перемішування компонентів при раціональних витратах енергії та скороченні тривалості технологічного циклу приготування розчину.

З огляду на різноманітність умов виконання будівельних робіт, обладнання для приготування будівельного розчину повинно мати необхідні технічні характеристики та відповідати конкретним технологічним і експлуатаційним умовам. Це зумовлює застосування різних конструкцій змішувального обладнання, які розрізняються за принципом дії, режимом роботи, мобільністю, потужністю та можливістю інтеграції з іншими технологічними елементами будівельного процесу. Відповідно, вибір конкретного типу обладнання визначається масштабами будівництва, доступністю джерел енергії, складом будівельного розчину та вимогами до його якості.

Найбільш поширеним підходом до приготування розчинів у сучасному будівництві є використання механічних змішувачів циклічної або безперервної дії, які забезпечують відтворюваність заданих властивостей суміші при кожному завантаженні. В умовах стаціонарних підприємств виготовлення розчинів здійснюється з використанням високопродуктивного обладнання з автоматизованим контролем дозування компонентів і процесу змішування, що дозволяє виготовляти будівельні розчини різного складу із заданими властивостями. Водночас на будівельних майданчиках, особливо у випадках малого або середнього обсягу робіт, перевага часто надається мобільним або пересувним установкам, які забезпечують можливість приготування суміші безпосередньо на місці використання, скорочуючи логістичні витрати та втрати якості, пов'язані з транспортуванням [39-40].

Розвиток маломасштабного та ремонтного будівництва зумовлює необхідність створення компактного й мобільного обладнання для приготування будівельних розчинів, придатного до роботи за відсутності або обмеженого

доступу до стаціонарних джерел електропостачання, а також на віддалених будівельних майданчиках. Тому вдосконалення змішувального обладнання пов'язане не лише з підвищенням інтенсивності перемішування, а й із забезпеченням його мобільності, конструктивної простоти, надійності та пристосованості до різних умов виконання будівельних робіт [41].

Класифікація змішувального обладнання для приготування будівельних розчинів здійснюється за рядом ознак, основними з яких є режим роботи, ступінь мобільності, спосіб змішування та конструкція робочих органів. Розгляд зазначених ознак дозволяє оцінити конструктивні особливості змішувачів і визначити напрями їх подальшого вдосконалення.

### **1.3.1 Класифікація змішувачів за режимом роботи**

Важливою ознакою класифікації обладнання для приготування будівельних розчинів є режим його роботи, який визначає конструктивне виконання, технологічні можливості та сферу застосування змішувальної установки. Згідно з цією ознакою, розчинозмішувальні установки поділяються на обладнання циклічної та безперервної дії. Кожен із цих режимів має свої переваги, недоліки та характерні сфери використання, що визначає доцільність їх застосування залежно від умов виконання будівельних робіт.

Обладнання циклічної дії працює за порційним принципом: кожен цикл передбачає окрему послідовність операцій – завантаження компонентів, змішування до досягнення однорідності та вивантаження готової суміші. Після завершення одного повного циклу установка готова до нового завантаження. Такий режим дозволяє здійснювати контроль над кожною порцією розчину, точно дотримуючись рецептури та забезпечуючи відтворюваність фізико-механічних властивостей готової суміші. Це особливо важливо під час приготування розчинів із багатокомпонентним складом або підвищеними вимогами до однорідності, рухливості та водоутримувальної здатності [42].

Циклічний режим дозволяє регулювати тривалість змішування, що є перевагою при приготуванні розчинів різного типу – від легких штукатурних до більш густих кладочних сумішей. Крім того, кожна партія може бути адаптована до конкретних умов: зміни рецептури, дозування води або в'язучого, внесення добавок тощо. Гнучкість такого підходу робить обладнання циклічної дії надзвичайно зручним для невеликих та середніх обсягів будівельних робіт, а також у випадках, коли необхідна висока якість і контроль процесу змішування.

Конструктивно установки циклічної дії зазвичай оснащуються змішувальним барабаном або камерою, в якій розташовані робочі органи – лопаті, лопатеві блоки чи шнеки. Після завантаження компонентів відбувається процес перемішування з чітко заданою тривалістю, після чого суміш вивантажується у приймальний резервуар або безпосередньо до місця укладання. Вивантаження зазвичай здійснюється шляхом нахилу барабана або відкриття спеціального люка. Така конструкція забезпечує надійність, простоту обслуговування та високу точність змішування [43].

Разом з тим, обладнання циклічної дії має певні недоліки. Найбільш суттєвим з них є порівняно невисока продуктивність у разі потреби в безперервному приготуванні великих обсягів розчину. Між окремими циклами змішування необхідно витратити час на завантаження нової порції компонентів, вивантаження готового матеріалу та підготовку до нового циклу. У результаті загальний час приготування розчину на об'єкті збільшується, що не завжди прийнятно в умовах інтенсивного будівництва. Проте в умовах, де критичним є саме якість суміші, а не її кількість, циклічні установки залишаються найбільш прийнятним рішенням.

Обладнання безперервної дії, на відміну від циклічного, забезпечує постійне змішування та подачу готового будівельного розчину без зупинок на окремі технологічні операції. Компоненти подаються у змішувальну камеру в режимі постійного потоку через дозувальні пристрої, де вони безперервно перемішуються за допомогою шнеків, роторів або інших робочих органів. Готова

суміш одночасно вивантажується з іншого кінця камери, забезпечуючи безперервність процесу та високу продуктивність.

Застосування обладнання безперервної дії є доцільним у тих випадках, коли необхідно забезпечити великий обсяг розчину протягом тривалого періоду, наприклад, при монолітному бетонуванні, муруванні довгих ділянок кладки або серійному виробництві будівельних елементів. Основними перевагами цього режиму є висока продуктивність, зменшення втрат часу на завантаження-вивантаження та зниження потреби у додатковому обслуговуванні. Крім того, автоматизовані системи подачі компонентів дозволяють зменшити вплив людського фактора та забезпечити задані параметри готової суміші [44].

Разом із перевагами обладнання безперервної дії має і свої характерні недоліки. Головним з них є зменшений ступінь гнучкості – внесення змін до рецептури або режиму змішування вимагає зупинки процесу, очищення камери та повторного налаштування системи дозування. Крім того, через безперервний потік складніше контролювати якість кожної окремої порції суміші, що може бути критичним у разі використання складних або спеціалізованих розчинів. Також обладнання цього типу зазвичай має складнішу конструкцію, вищу вартість і потребує кваліфікованого обслуговування.

### **1.3.2 Класифікація змішувачів за ступенем мобільності**

Залежно від ступеня мобільності обладнання для приготування будівельних розчинів поділяється на стаціонарне, пересувне, навісне та причіпне. Вибір типу змішувача визначається масштабами будівельного проекту, географічними умовами, частотою зміни будівельного майданчика, рівнем механізації робіт і логістичними особливостями. Ступінь мобільності безпосередньо впливає на ефективність використання обладнання, економічність процесу приготування розчину та можливість його застосування в різних умовах виконання будівельних робіт. Кожен із зазначених типів має свої конструктивні особливості, переваги та сферу застосування.

Стаціонарні змішувачі є традиційним рішенням для організації приготування розчинів на постійних базах або в умовах централізованого будівельного виробництва. Таке обладнання зазвичай встановлюється в межах розчинного вузла, бетонного заводу або великого будівельного майданчика, де виконуються роботи великого обсягу з постійною потребою в будівельному розчині. Стаціонарні установки мають підвищену продуктивність, більший об'єм змішувальної камери, можливість автоматичного дозування компонентів і точного регулювання процесу змішування. Їх конструкція передбачає міцний фундамент, надійні системи живлення і часто інтегрується з іншими технологічними вузлами: конвеєрами, дозаторами, підйомниками тощо [45].

Перевагою стаціонарного обладнання є висока керованість технологічного процесу, можливість підключення до мережі живлення великої потужності, довговічність та низький рівень зношування елементів унаслідок роботи в контрольованих умовах. Проте головним недоліком такого обладнання є його повна прив'язаність до одного місця – для зміни місця розташування змішувача потрібні демонтаж, транспортування та монтаж, що значно ускладнює гнучкість будівельного процесу, особливо в умовах розосереджених або тимчасових об'єктів.

У протиположності стаціонарним установкам, пересувні розчинозмішувачі призначені для мобільного використання безпосередньо на будівельному майданчику. Вони зазвичай мають компактні розміри, оснащуються колесами, шасі або платформою, що дозволяє швидко переміщати їх у межах будівельної ділянки або транспортувати між об'єктами. Пересувні установки можуть бути як самохідними, так і такими, що переміщуються вручну або за допомогою механічного тягача. Завдяки простоті конструкції, автономності та універсальності, такі змішувачі є ідеальними для виконання робіт середнього та малого обсягу, аварійних ремонтів, робіт у важкодоступних місцях або в умовах, коли підключення до електромережі ускладнене або неможливе [46-47].

Основними перевагами пересувного обладнання є мобільність, оперативність у роботі та можливість швидкої зміни місця розміщення без

значних витрат часу і ресурсів. При цьому пересувні змішувачі, як правило, поступаються стаціонарним за потужністю, продуктивністю та точністю дозування компонентів. Їх продуктивність зазвичай обмежена середнім діапазоном, а змішувальна камера має менший об'єм. Крім того, у зв'язку з експлуатацією в змінних виробничих умовах і можливістю роботи безпосередньо на будівельному майданчику такі установки висувають підвищені вимоги до міцності, зносостійкості та конструктивної надійності.

Навісний змішувач належить до спеціалізованого різновиду змішувального обладнання, яке встановлюється безпосередньо на базові машини або механізми, зокрема вантажні автомобілі, міні-навантажувачі або трактори. Така конструктивна схема дозволяє використовувати базову машину одночасно як джерело механічної енергії приводу та транспортну платформу, що сприяє зменшенню експлуатаційних витрат і підвищенню мобільності обладнання.

Навісний змішувач застосовується переважно під час виконання спеціалізованих або невеликих за обсягом робіт у сільському або дорожньому будівництві. До його основних переваг належить компактність конструкції, можливість оперативного встановлення та демонтажу, а також використання на базі універсальних мобільних енергетичних засобів. Водночас таке обладнання характеризується обмеженим об'ємом змішувальної камери, порівняно меншою продуктивністю та залежністю режимів роботи від технічних параметрів базової машини [16].

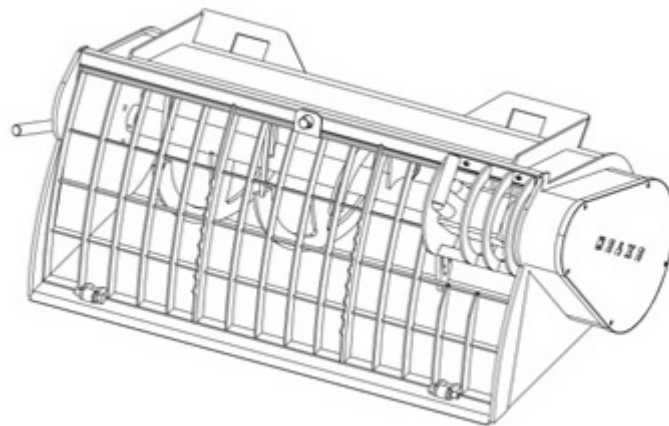


Рисунок 1.1 – Конструктивна схема навісного розчинозмішувача

Окрему групу мобільного змішувального обладнання становлять причіпні розчинозмішувачі (рис. 1.2), які встановлюються на спеціалізованих візках або платформах, обладнаних дишлом для транспортування. Такі установки можуть переміщуватися між будівельними об'єктами за допомогою автомобільного або тракторного транспорту. Причіпні змішувачі характеризуються підвищеною мобільністю та можливістю роботи як від зовнішніх джерел електропостачання на будівельному майданчику, так і від автономних джерел енергії, що використовуються у складі енергетичного обладнання установки. Застосування причіпних змішувачів дозволяє поєднати відносно високу продуктивність зі збереженням мобільності обладнання під час виконання будівельних робіт [48].

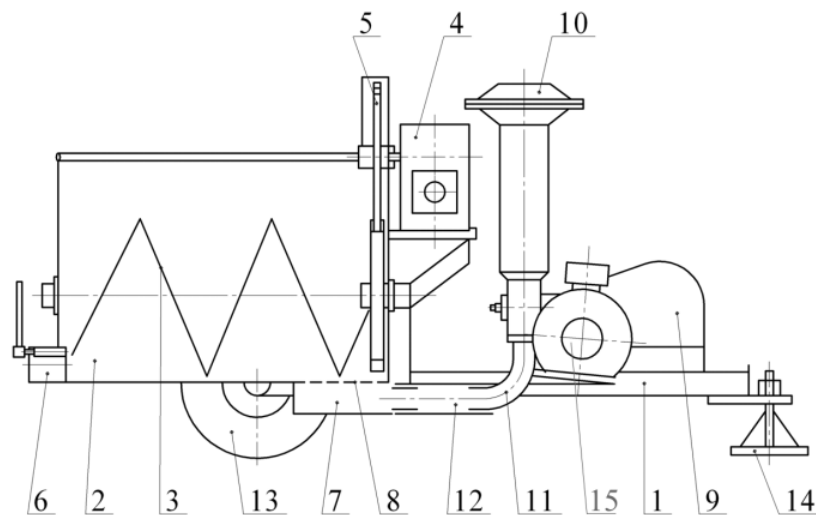


Рисунок 1.2 – Розчинозмішувальна установка УРЗ-3,8: 1 – рама;  
 2 – бункер; 3 – змішувач; 4 – черв'ячний редуктор; 5 – цівкова передача;  
 6 – затвор; 7 – камера-живильник; 8 – проціджувальна решітка;  
 9 – розчинонасос; 10 – комбінований компенсатор пульсації тиску;  
 11 – всмоктувальний патрубок; 12 – гумовотканинний рукав;  
 13 – пневматичні шини; 14 – підставка

Завдяки використанню дорожнього шасі, причіпні установки зручні для транспортування навіть на значні відстані без необхідності демонтажу. Це особливо актуально для мобільних бригад, які виконують роботи на віддалених

об'єктах. Проте такі змішувачі можуть мати більшу масу, вимагають ретельнішого технічного обслуговування і відповідного узгодження з транспортними засобами, що забезпечують їхнє переміщення.

### **1.3.3 Класифікація змішувачів за способом змішування**

Серед основних технічних характеристик обладнання для приготування будівельного розчину вирішальне значення має спосіб змішування компонентів. Ця класифікаційна ознака безпосередньо визначає не лише ефективність перемішування, а й придатність обладнання для роботи з різними типами розчинів, їхньою консистенцією, зерновим складом заповнювачів, наявністю спеціальних добавок тощо. За способом змішування розчинозмішувачі поділяються на гравітаційні, примусової дії та комбіновані. Кожен із типів має свої конструктивні особливості, переваги та недоліки, що визначає сферу його оптимального використання в будівельному процесі.

Гравітаційні змішувачі (рис. 1.3) є одними з найпоширеніших типів обладнання, що застосовуються переважно для приготування будівельних розчинів середньої та підвищеної пластичності. Принцип їх дії базується на використанні сили тяжіння як рушійної сили для перемішування компонентів. У таких установках змішувальний барабан обертається навколо своєї осі, а матеріали, що знаходяться всередині, підіймаються по стінках барабана за допомогою лопатей або ребер і потім вільно падають вниз, створюючи ефект багаторазового перемішування. Повторення цього циклу зумовлює поступове досягнення однорідності суміші [49-50].

Гравітаційні змішувачі характеризуються простою конструкцією, порівняно невеликими енерговитратами та нескладним технічним обслуговуванням. Завдяки цьому вони широко застосовуються в малому будівництві, на тимчасових об'єктах, у фермерських господарствах і приватному секторі. Таке обладнання доцільно використовувати для приготування цементно-піщаних, вапняно-піщаних та штукатурних розчинів, а також інших сумішей із

відносно високою рухливістю. Водночас ефективність гравітаційних змішувачів знижується під час роботи з жорсткими або малорухомими сумішами, для яких необхідна більш інтенсивна механічна дія. Крім того, досягнення необхідної однорідності таких сумішей часто потребує збільшення тривалості перемішування, що негативно впливає на продуктивність обладнання [51].

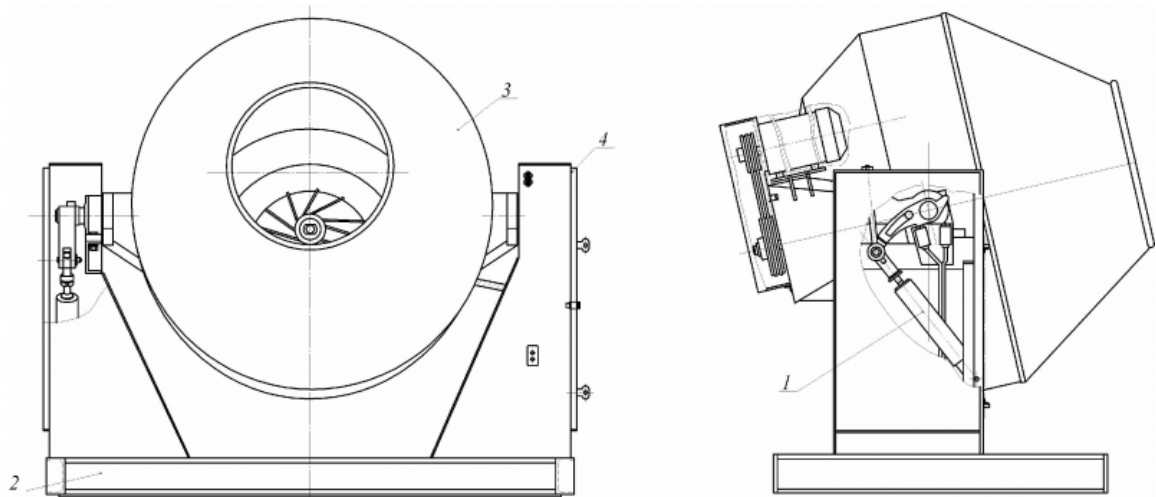


Рисунок 1.3 – Схема гравітаційного змішувача: 1 – гідроциліндр; 2 – опорна рама (станина); 3 – змішувальний барабан; 4 – захисний кожух

Іншу групу становлять змішувачі примусової дії, які відзначаються підвищеною інтенсивністю перемішування за рахунок активної механічної дії на компоненти суміші. У таких змішувачах робочі органи – лопаті, шнеки, роторні або планетарні механізми – обертаються усередині нерухомої або малорухомої камери, примушуючи матеріали перемішуватись не під дією власної ваги, а за рахунок зовнішнього механічного впливу. Такий принцип роботи дозволяє ефективно змішувати жорсткі, в'язкі, малорухомі, важкі або збагачені добавками суміші, що потребують високої однорідності.

Змішувачі примусової дії демонструють відмінну якість перемішування за короткий проміжок часу. Вони забезпечують рівномірне розподілення компонентів по всьому об'єму, мінімізують утворення грудок або сегрегації, що особливо актуально при роботі з цементно-піщаними, вапняно-цементними та спеціальними розчинами з пластифікаторами, ущільнювачами або барвниками.

Високий ступінь інтенсивності змішування дозволяє застосовувати такі змішувачі в промисловому виробництві, на бетонозаводах, у лабораторіях та при виконанні відповідальних будівельних робіт, де якість розчину має першочергове значення [52-53].

Однак, разом із високою ефективністю, змішувачі примусової дії мають певні особливості, що впливають на їх експлуатацію. Зокрема, вони споживають більше енергії, мають складнішу конструкцію, потребують періодичного обслуговування й мають вищу собівартість виготовлення. Через наявність великої кількості рухомих частин, особливо в роторно-планетарних моделях, вони є більш чутливими до абразивного зношування та потребують використання зносостійких матеріалів. Проте у випадках, коли головним критерієм є якість та швидкість змішування, саме обладнання примусової дії є найбільш доцільним вибором [54-55].

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

Роторні змішувачі примусової дії (рис. 1.4, *a*) являють собою ефективні й високопродуктивні машини, призначені для інтенсивного перемішування будівельних сумішей, зокрема розчинів, штукатурок, клейових композицій та сухих будівельних сумішей із різноманітними добавками. Основною конструктивною особливістю роторного змішувача є наявність швидкообертового ротора, на якому закріплені ножі або лопаті, що розміщені в спеціальній змішувальній камері. Під час роботи ротор обертається з великою швидкістю (до 1500 об/хв і більше), створюючи сильні турбулентні потоки, які перемішують компоненти суміші за рахунок їх інтенсивного переміщення, зсуву та ударної взаємодії [56].

Принцип дії роторного змішувача базується на високошвидкісному перемішуванні матеріалів під впливом відцентрових сил і турбулентного режиму руху. Компоненти суміші подаються у камеру, де потрапляють у зону дії ротора, який розбиває згустки, знищує грудки й забезпечує рівномірний розподіл

частинок у потоці. Завдяки цьому досягається дуже висока однорідність готової маси навіть за короткий проміжок часу. Такий тип змішування особливо ефективний для роботи з сухими і сухо-вологими сумішами, які вимагають делікатного, але водночас інтенсивного оброблення [57].

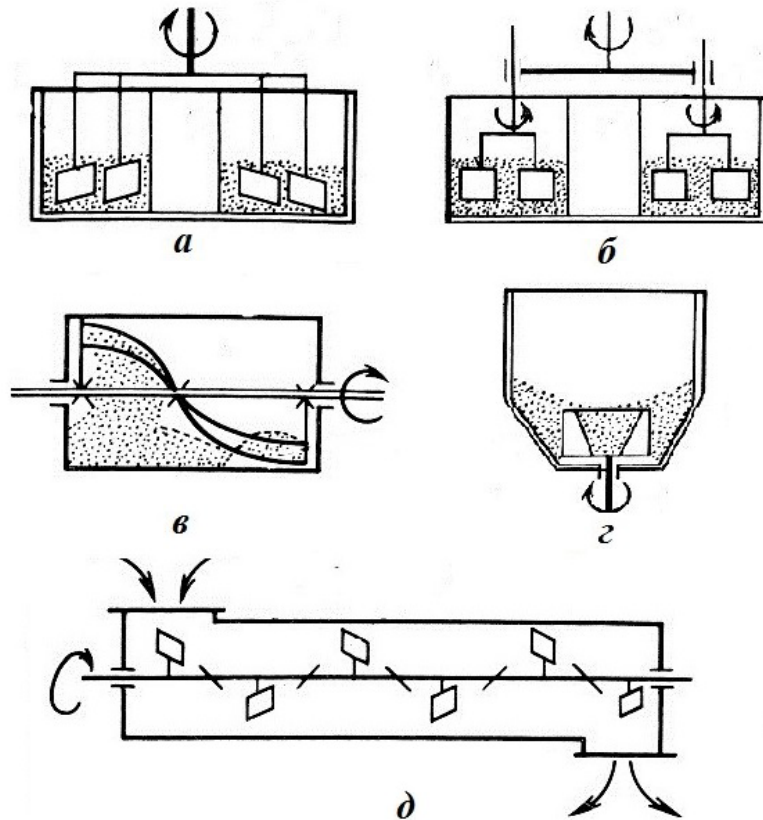


Рисунок 1.4 – Змішувачі примусової дії: а – роторні, б – планетарно-роторні, в – лопатеві, г – турбулентні, д – лоткові

До основних переваг роторних змішувачів належать висока швидкість досягнення однорідності, компактність конструкції, можливість точно регулювати інтенсивність перемішування та широке використання в автоматизованих виробничих лініях. Крім того, такі змішувачі ефективно забезпечують перемішування дрібнодисперсних або легких матеріалів, обробка яких у змішувачах інших типів характеризується меншою ефективністю. Роторні змішувачі дозволяють зменшити загальний цикл підготовки суміші, що є важливим для підвищення продуктивності на промислових підприємствах.

Водночас роторні змішувачі мають і певні недоліки. Через високу швидкість обертання робочого органа обладнання має підвищене енергоспоживання, а також потребує точного балансування ротора для уникнення вібрацій і швидкого зносу. Конструкція змішувальної камери має бути досить міцною та стійкою до динамічних навантажень. До недоліків можна також віднести обмежену ефективність при роботі з дуже жорсткими або великофракційними матеріалами, які потребують сильного механічного зминання – у таких випадках доцільніше застосовувати інші типи примусових змішувачів. Попри це, роторні змішувачі залишаються незамінними для приготування високоякісних, однорідних сумішей у стислі терміни.

Планетарно-роторний змішувач (рис. 1.4, б) є складнішим та більш універсальним обладнанням примусової дії, який поєднує у своїй конструкції переваги роторного й планетарного принципів перемішування. Конструкція такого змішувача включає центральний приводний вал, навколо якого обертаються один або декілька додаткових обертових робочих органів. Кожен із цих роторів також обертається навколо своєї осі з високою швидкістю. Завдяки такій траєкторії руху робочих органів досягається інтенсивне перемішування матеріалів, яке забезпечує повне охоплення всього об'єму змішувальної камери без утворення «мертвих зон» [58].

Робочий процес у планетарно-роторному змішувачі відбувається надзвичайно динамічно: матеріал одночасно захоплюється лопатями або дисками, що обертаються, піддається дії зсуву, турбулентного збурення, а також постійному зміщенню по об'єму змішувального барабана. Такий режим забезпечує рівномірне перемішування навіть складних або багатокомпонентних сумішей, у тому числі тих, що містять пігменти, фібру, модифікуючі добавки або наповнювачі з різною щільністю. Крім того, можливість налаштування швидкості обертання як основного валу, так і роторів, дозволяє точно керувати процесом змішування відповідно до заданої рецептури й властивостей компонентів [59].

До переваг планетарно-роторних змішувачів належать забезпечення високої однорідності готової суміші та можливість ефективного перемішування як пластичних, так і жорстких будівельних розчинів. Таке обладнання широко застосовується під час виготовлення архітектурного бетону, сухих будівельних сумішей, декоративних розчинів та інших композицій, до яких висуваються підвищені вимоги щодо рівномірності розподілу компонентів. Завдяки складній траєкторії руху робочих органів забезпечується інтенсивне перемішування матеріалу по всьому робочому об'єму змішувача, що мінімізує утворення застійних зон і сприяє очищенню робочих лопатей у процесі роботи.

Водночас до недоліків цих змішувачів можна віднести складність конструкції, що потребує високої точності виготовлення та балансування рухомих частин. Вартість виробництва, монтажу та сервісу планетарно-роторних змішувачів є значно вищою порівняно з класичними примусовими моделями, що обмежує їх широке використання в дрібному або малобюджетному будівництві. Також підвищені навантаження на приводні вузли вимагають використання якісних матеріалів і надійних підшипників, а це збільшує експлуатаційні витрати. Проте при дотриманні норм експлуатації планетарно-роторні змішувачі забезпечують виняткову якість перемішування, яка компенсує більшість технічних і економічних обмежень.

Лопатеві змішувачі примусової дії (рис. 1.4, в) є одними з найпоширеніших та найпростіших за конструкцією машин для приготування будівельних сумішей. В основі їхньої роботи лежить механічне перемішування матеріалів за допомогою лопатей, закріплених на горизонтальному або вертикальному валу, що обертається в змішувальній камері. Лопаті можуть мати різну форму – прямолінійну, зігнуту, спіральну або стрічкову, що дозволяє адаптувати конструкцію до консистенції суміші та технологічних вимог. Основна функція лопатей – здійснення зсувного руху матеріалу, руйнування згустків, переміщення компонентів і забезпечення їх рівномірного розподілу по всьому об'єму [60].

Процес перемішування у лопатевих змішувачах здійснюється переважно за рахунок контактної взаємодії лопатей із сумішшю. Обертаючись, вони захоплюють компоненти та пересувають їх у змішувальній камері, спричиняючи перемішування за рахунок тертя, тиску й зсуву. Такий механізм добре працює як із пластичними, так і з жорсткими сумішами, особливо в тих випадках, коли досягання максимальної однорідності не потребує надвисокої інтенсивності впливу. Конструкція змішувача, зазвичай, передбачає можливість реверсу (зміни напрямку обертання), що дозволяє підвищити ефективність процесу й уникнути утворення мертвих зон [61].

Серед основних переваг лопатевих змішувачів варто відзначити простоту конструкції, технологічну доступність, надійність в експлуатації та низьку вартість виготовлення. Завдяки цим характеристикам вони широко використовуються в будівництві малого та середнього масштабу, на підприємствах, у майстернях, фермерських господарствах тощо. Вони потребують мінімального обслуговування, легко очищуються після роботи та допускають виготовлення у різних об'ємах. Крім того, такі змішувачі добре підходять для адаптації під механічний або гідравлічний привід, що є важливою перевагою в автономних умовах [62].

До недоліків лопатевих змішувачів слід віднести відносно триваліший час перемішування порівняно з роторними або турбулентними аналогами, а також меншу ефективність при роботі з дрібнодисперсними або високов'язкими сумішами. Через обмежену інтенсивність впливу лопаті можуть не забезпечити повної дисперсії добавок або рівномірного розподілу в'язучих у складних багатокомпонентних системах. Також при недосконалій геометрії або зношених елементах можливе утворення застійних зон у кутах камери або між лопатями, що знижує загальну якість готової суміші. Втім, при правильному конструктивному виконанні лопатеві змішувачі залишаються ефективним і надійним рішенням у більшості практичних випадків.

Турбулентні змішувачі примусової дії (рис. 1.4, з) належать до високоефективного обладнання, в якому інтенсивне перемішування досягається

шляхом створення у змішувальній камері потужних турбулентних потоків. Конструктивною особливістю таких змішувачів є наявність швидкообертового робочого органа – ротора з системою лопатей, сопел або дисків, що обертаються на великій швидкості та викликають багаторазові зіткнення частинок, збурення й хаотичне переміщення компонентів суміші. У результаті виникають високошвидкісні вихори, які забезпечують не лише механічне перемішування, але й мікродиспергування, що особливо важливо при роботі з тонкодисперсними матеріалами або сумішами з полімерними добавками.

Принцип дії турбулентних змішувачів ґрунтується на інтенсивному зсуві, який виникає внаслідок великої різниці швидкостей руху в різних зонах робочого простору. Це сприяє швидкому руйнуванню агломератів, перемішуванню навіть компонентів з різною густиною, а також рівномірному розподілу в'язучих, пігментів, модифікаторів або мінеральних наповнювачів. На відміну від класичних роторних змішувачів, у турбулентних машинах перемішування відбувається не стільки за рахунок прямої дії лопатей, скільки через інтенсивні гідродинамічні процеси, подібні до тих, що виникають у реакційних середовищах [63].

До основних переваг турбулентних змішувачів належить висока інтенсивність процесу перемішування, що забезпечує досягнення необхідної однорідності суміші протягом короткого часу та дозволяє скоротити тривалість технологічного циклу приготування до 1–3 хв. Відсутність значних контактних механічних навантажень між робочими органами та стінками змішувальної камери сприяє зменшенню зношування елементів конструкції та спрощує процес очищення обладнання. Турбулентні змішувачі доцільно застосовувати під час приготування легких будівельних сумішей, теплоізоляційних матеріалів, тонкошарових штукатурних розчинів, а також сумішей із підвищеним вмістом повітря, зокрема аерованих складів.

Водночас турбулентні змішувачі характеризуються певними обмеженнями застосування. Ефективність їх роботи істотно залежить від консистенції суміші, зокрема вони менш придатні для перемішування густих і малорухомих розчинів,

що потребують значних зсувних деформацій у процесі оброблення. Крім того, підвищена швидкість обертання робочого органа зумовлює збільшення енерговитрат порівняно з лопатевими та комбінованими змішувачами. До особливостей таких установок також належать підвищені вимоги до точності виготовлення елементів конструкції, балансування обертових вузлів і забезпечення їх надійної роботи. Незважаючи на зазначені обмеження, турбулентні змішувачі є ефективними для швидкісного приготування легких і пластичних будівельних сумішей із заданими технологічними властивостями[64].

Лоткові змішувачі примусової дії (рис. 1.4, д) представляють собою окремий клас обладнання, призначеного переважно для перемішування жорстких, густих або малорухомих будівельних сумішей, зокрема тих, що використовуються при виготовленні тротуарної плитки, бордюрів, бетонних блоків і сухих розчинів. Їх конструкція складається зі змішувальної камери у вигляді відкритого жолоба (лотка), всередині якої розміщується один або два обертові вали з закріпленими на них лопатями або шнеками. Завдяки такому форм-фактору лоткові змішувачі забезпечують зручність завантаження та вивантаження суміші, а також візуальний контроль за процесом перемішування.

Принцип дії базується на активному перемішуванні за рахунок обертання лопатей або шнеків, які занурюються в матеріал і викликають його пересування по лотку, з подальшим перемішуванням і руйнуванням згустків. У випадку двовального виконання лопаті можуть обертатися назустріч одна одній, створюючи зустрічні потоки, які посилюють зсувну дію і сприяють рівномірному розподілу компонентів. Також часто передбачається реверсивна робота валів, що підвищує ефективність і запобігає налипанню матеріалу на стінки. Через відкриту форму лотка такі змішувачі дозволяють візуально оцінити ступінь готовності суміші та легко очищуються після завершення циклу.

Серед основних переваг лоткових змішувачів слід виділити здатність працювати з дуже жорсткими або напівсухими сумішами, які не піддаються ефективному перемішуванню у гравітаційних або навіть деяких примусових

змішувачах. Вони ідеально підходять для виробництва бетонів з низьким водоцементним відношенням, де важливо забезпечити максимальне ущільнення без втрати однорідності. Також лоткові змішувачі дозволяють використовувати грубозернисті заповнювачі та наповнювачі з великою фракцією, що може створювати труднощі в обладнанні з обмеженим об'ємом камери.

Втім, лоткові змішувачі мають і свої недоліки. До них належать відносно великі габарити, особливо в разі необхідності обробки великих об'ємів матеріалу, а також відкритість конструкції, яка потребує захисту від пилу, атмосферних впливів та забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу. Крім того, енерговитрати при перемішуванні густих сумішей можуть бути високими, оскільки опір матеріалу значний, а ефективність процесу залежить від конструкції лопатей і правильного розрахунку швидкості обертання. Незважаючи на зазначені обмеження, лоткові змішувачі залишаються ефективними в специфічних умовах приготування жорстких сумішей, забезпечуючи необхідну якість перемішування та надійність реалізації технологічного процесу.

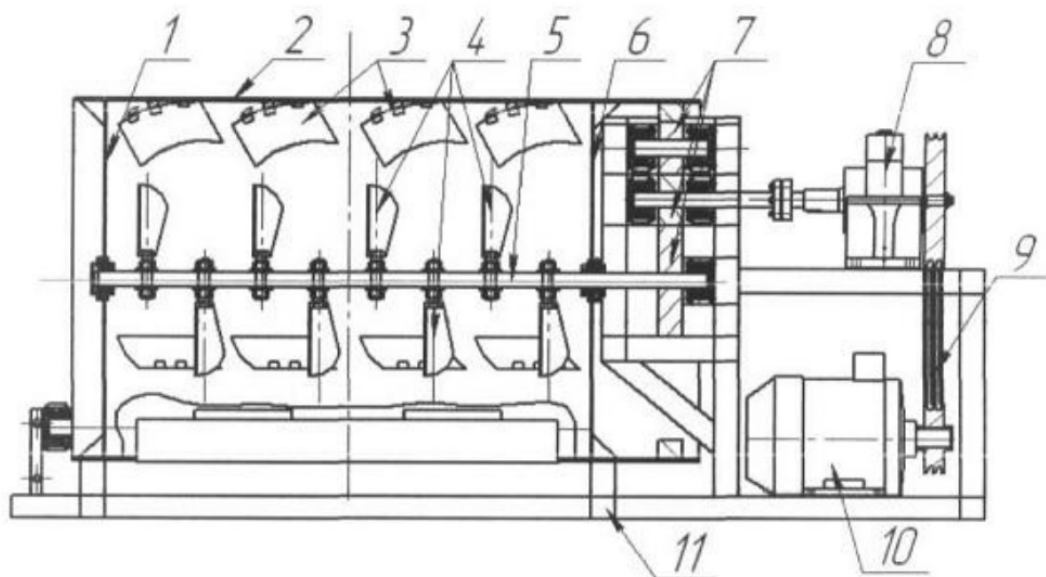


Рисунок 1.5 – Змішувач гравітаційно-примусової дії: 1 – ліва торцева стінка; 2 – барабан; 3, 4 – лопаті; 5 – вал; 6 – права торцева стінка; 7 – зубчаста передача; 8 – редуктор; 9 – клинопасова передача; 10 – двигун; 11 – рама

Окрему групу становлять комбіновані змішувачі (рис. 1.5), які поєднують у собі елементи як гравітаційного, так і примусового змішування. У таких установках компоненти перемішуються під дією обертання барабана (гравітаційний ефект), а також за допомогою додаткових лопатей або валів, що здійснюють примусову механічну дію на суміш. Така комбінація дозволяє досягти більш рівномірного змішування при збереженні конструктивної простоти та певної економічності у порівнянні з повноцінними змішувачами примусової дії [65-66].

Комбіновані змішувачі добре підходять для умов, де потрібно забезпечити високу якість при відносно низькому енергоспоживанні. Вони особливо ефективні при роботі з розчинами середньої рухомості або змінного складу, коли на різних етапах робіт виникає потреба у варіативності режимів змішування. З конструктивної точки зору такі змішувачі можуть мати складніші кінематичні схеми, що вимагає ретельного технічного обґрунтування та злагодженої взаємодії між гравітаційним і примусовим механізмом дії.

#### **1.3.4 Аналіз конструкцій робочих органів змішувачів**

Робочий орган є головним елементом будь-якої конструкції розчинозмішувача, оскільки саме він безпосередньо виконує функцію механічного перемішування компонентів будівельного розчину. Від форми, геометрії, розташування та кінематичних характеристик робочого органу залежать інтенсивність і якість перемішування, однорідність готової суміші, а також ефективність подачі розчину до зони вивантаження. Різноманітність конструкцій розчинозмішувачів зумовила й широку номенклатуру робочих органів, які адаптовані під різні типи сумішей, режими роботи, умови експлуатації та технічні можливості приводу [67].

Найбільш поширеною формою робочого органу в конструкціях горизонтальних змішувачів примусової дії є лопатевий вал. Лопаті можуть мати

різну геометрію – плоскі, гвинтові, еліптичні, стрічкові або комбіновані. Кожен із типів має свої конструктивні переваги та недоліки, що визначають доцільність їхнього застосування в конкретних умовах [68].

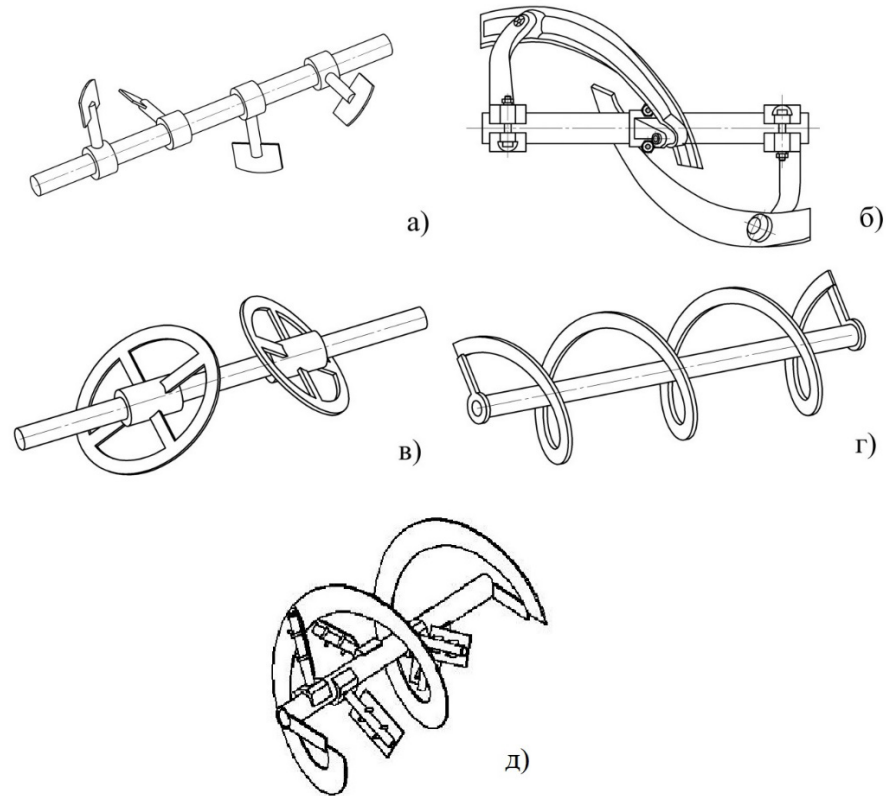


Рисунок 1.6 – Конструкції робочих органів розчинозмішувачів: а – плоскі лопаті; б – гвинтовий; в – еліптичний; г – шнековий; д – стрічково-лопатевий

Плоскі лопаті (рис. 1.6, а) відзначаються простою формою, технологічністю виготовлення та легкістю в обслуговуванні. Їх можна встановлювати під різними кутами до вала, що дозволяє регулювати інтенсивність перемішування, мінімізувати споживання електроенергії та досягати оптимального режиму роботи. Важливою перевагою є також можливість захисту лопатей від руйнування за допомогою пружних амортизаторів, що пом'якшують навантаження у випадку попадання твердих включень у масу суміші. Однак варто зазначити, що такі лопаті не забезпечують ефективного перемішування у периферійних зонах барабана, особливо біля

стінок, а також мають обмежену здатність до транспортування суміші у напрямку вивантаження.

Гвинтові робочі органи (рис. 1.6, б) є одним із напрямів розвитку лопатевих систем. Їх конструкція передбачає використання двох або більше гвинтових лопатей, розташованих у зустрічному напрямі. Така конфігурація забезпечує інтенсивне перемішування та циркуляцію розчинної суміші в змішувальній камері, а також дає змогу одночасно поєднувати процеси перемішування і переміщення матеріалу в напрямі розвантаження. Водночас гвинтові лопаті відзначаються порівняно простою конструкцією, ремонтпридатністю та можливістю заміни окремих елементів. До їх недоліків належать складність ущільнення вала в місцях виходу через корпус, що потребує застосування зносостійких ущільнювальних вузлів. Крім того, подібно до плоских лопатей, гвинтові робочі органи можуть бути менш ефективними в центральній частині змішувальної камери, де розташований вал.

Робочі органи еліптичної форми (рис. 1.6, в) використовуються переважно в розчинозмішувачах застарілих або спеціалізованих конструкцій. Їх перевагою є проста форма, зручність у виготовленні та ремонтпридатність, а також помірна енергоємність процесу змішування. Еліптична траєкторія руху лопатей дозволяє інтенсивно змішувати компоненти, однак у таких системах відсутнє цілеспрямоване транспортування суміші до виходу, що обмежує їх ефективність у безперервному або циклічному режимах з підвищеною продуктивністю. Крім того, традиційною проблемою таких змішувачів є потреба в складних ущільненнях і порівняно нерівномірне охоплення усього об'єму змішувальної маси.

У більш сучасних моделях широко застосовується шнековий (стрічковий) робочий орган (рис. 1.6, г), який являє собою металеву стрічку, закручену у формі гвинта (коноїдальна спіраль), жорстко з'єднану з обертовим валом. Така конструкція забезпечує рівномірне перемішування по всьому об'єму, активне переміщення розчину в напрямку вивантаження, а також мінімізацію зон застою матеріалу. Завдяки безперервній гвинтовій дії, шнекові змішувачі добре

працюють із жорсткими та густими сумішами, особливо у випадках, коли потрібно досягти високої щільності та однорідності за короткий проміжок часу. До переваг цієї системи відносять також компактність, надійність і можливість адаптації до різних об'ємів змішувальних камер. Основними недоліками залишаються необхідність точного дотримання геометрії спіралі, складність балансування та ті ж самі проблеми із сальниковими вузлами при виході вала назовні.

У ряді прогресивних конструкцій передбачається комбіноване використання лопатей і стрічки (рис. 1.6, д), що дозволяє об'єднати переваги обох типів: інтенсивне перемішування по всьому об'єму та ефективне спрямоване транспортування суміші. Така конструкція забезпечує високий рівень універсальності – змішувачі з комбінованими робочими органами здатні працювати з широким діапазоном розчинів: від пластичних до жорстких, від однорідних до багатокomпонентних, включно з армованими сумішами або такими, що містять спеціальні хімічні добавки.

#### **1.4 Аналіз приводів змішувального обладнання та можливості використання мотоблоків**

Одним із визначальних конструктивних параметрів розчинозмішувального обладнання є тип приводу робочого органа, який суттєво впливає на мобільність установки, енергоефективність процесу змішування та умови її експлуатації. Тип приводу визначає можливості застосування змішувача в різних виробничих умовах, рівень експлуатаційних витрат, а також конструктивну складність машини.

У сучасній практиці найбільш поширеними є розчинозмішувачі з електричним приводом, у яких як джерело енергії використовуються однофазні або трифазні асинхронні електродвигуни. Такі приводи характеризуються конструктивною простотою, зручністю керування та відносно невисокими витратами на експлуатацію. Разом із тим їх застосування ефективно переважно

за наявності стаціонарного джерела електропостачання, що обмежує використання електроприводних змішувачів у польових умовах або на будівельних майданчиках.

У випадках виконання будівельних робіт в умовах обмеженого доступу до електричних мереж застосовуються технічні рішення, що передбачають використання автономних джерел механічної енергії або приводу від мобільних енергетичних засобів. Такі підходи дозволяють забезпечити роботу змішувального обладнання незалежно від стаціонарних систем електропостачання та підвищують його мобільність під час виконання робіт у змінних виробничих умовах.

У цьому зв'язку актуальним є аналіз можливостей використання трансмісії мобільних енергетичних засобів малої потужності, зокрема мотоблоків, як джерела механічної енергії для приводу змішувального обладнання, що може забезпечити підвищення мобільності установок та розширення умов їх застосування у маломасштабному будівництві.

Різноманітність конструктивних виконань сучасних мотоблоків обумовлює доцільність їх систематизації за основними класифікаційними ознаками, що безпосередньо впливають на можливість їх використання як джерела приводу технологічного обладнання. До основних класифікаційних характеристик належать масогабаритні показники та потужність силового агрегату, тип двигуна і система його охолодження, а також конструктивні особливості передачі крутного моменту від двигуна до ходової частини та валу відбору потужності. Аналіз зазначених параметрів дозволяє обґрунтовано визначити раціональний тип мотоблока з точки зору забезпечення ефективних режимів роботи розчинозмішувального обладнання [69-70].

Легкі мотоблоки (рис. 1.7) є найменшими за розмірами і потужністю представниками мотоблочного класу техніки. Їхня маса зазвичай не перевищує 50–70 кг, а двигуни мають потужність у межах 3–5 кінських сил. Такі мотоблоки призначені переважно для виконання нескладних сільськогосподарських операцій на невеликих ділянках, включаючи обробіток ґрунту, підгортання,

посів та інші легкі механізовані роботи. Завдяки своїй компактності, маневреності та низькій вартості, легкі мотоблоки набули значного поширення серед індивідуальних користувачів та власників присадибних господарств.



Рисунок 1.7 – Загальний вигляд легкого мотоблока

Конструктивно легкі мотоблоки обладнані бензиновими двигунами з повітряним охолодженням і мають просту трансмісію, що передає обертання через ремінну або ланцюгову передачу. Часто така техніка не має активного валу відбору потужності або має обмежені можливості підключення навісного обладнання. Робоча швидкість і тягові характеристики легких мотоблоків обмежені, що зумовлює їхню придатність лише для робіт із невисокими механічними навантаженнями. Водночас невелика маса агрегата забезпечує легкість у транспортуванні, зручність зберігання та мінімальні витрати палива при експлуатації [71].

До основних переваг легких мотоблоків належать доступність за ціною, простота експлуатації та ремонту, економічність у використанні палива, а також висока маневреність на обмежених площах. Їх можна легко запускати вручну, транспортувати в багажнику автомобіля або використовувати в умовах, де більша техніка просто недоцільна. Однак через обмежену потужність і незначну

масу легкі мотоблоки характеризуються недостатньою здатністю до буксирування важкого навісного обладнання та забезпечення необхідного рівня крутного моменту під час тривалих навантажень.

При використанні легких мотоблоків як джерела приводу розчинозмішувального обладнання їх застосування обмежується недостатньою потужністю силового агрегату та відсутністю активного валу відбору потужності, що ускладнює агрегування зі змішувачами середнього та великого об'єму. Разом із тим такі мотоблоки можуть бути використані як енергетична основа малогабаритних розчинозмішувальних установок невеликої продуктивності, призначених для виконання локальних ремонтно-будівельних робіт.

Середні мотоблоки (рис. 1.8) є проміжним класом між легкими та важкими моделями та набули найбільшого поширення серед техніки цього типу. Їх маса зазвичай становить 70–120 кг, а потужність двигуна – від 5 до 8 к. с. Завдяки раціональному співвідношенню маси, потужності та габаритних розмірів такі мотоблоки характеризуються універсальністю і можуть використовуватися для виконання різних технологічних операцій – від обробітку ґрунту до транспортування вантажів і роботи з навісним обладнанням [72].



Рисунок 1.8 – Загальний вигляд середнього мотоблоку

Конструктивно середні мотоблоки оснащуються як бензиновими, так і дизельними двигунами з повітряним охолодженням. Багато моделей цієї групи мають активний вал відбору потужності, що значно розширює їх функціональні можливості та дозволяє працювати з більш енергомістким навісним обладнанням. Передача крутного моменту здійснюється через пасову, ланцюгову або редукторну системи, що забезпечує достатню надійність при експлуатації у важких умовах порівняно з легкими моделями. Наявність декількох передач вперед і назад підвищує маневреність і дозволяє краще адаптувати роботу мотоблока під конкретні завдання.

До головних переваг середніх мотоблоків належать їх універсальність, помірне споживання палива при високій продуктивності, здатність до роботи з важчим навісним обладнанням та прийнятна вартість у порівнянні з важкими моделями. Вони добре пристосовані для роботи на ділянках середніх розмірів, виконання механізованих будівельних або сільськогосподарських робіт, а також для перевезення вантажів на короткі відстані. При правильній експлуатації середні мотоблоки демонструють високу надійність та довговічність навіть при інтенсивних навантаженнях.

З огляду на потребу створення мобільного приводу для розчинозмішувача, середні мотоблоки є найбільш перспективним класом техніки. Достатній рівень потужності, наявність активного валу відбору потужності, здатність працювати під тривалими навантаженнями та пристосованість до різних режимів експлуатації дозволяють розглядати такі мотоблоки як ефективну енергетичну основу для організації автономного змішування будівельних розчинів на об'єктах, де використання стаціонарного або великогабаритного обладнання є економічно чи технічно недоцільним.

Важкі мотоблоки (рис. 1.9) є найбільш потужним і функціонально насиченим класом серед усіх мотоблочних агрегатів. Їх маса зазвичай перевищує 120 кг, а потужність двигунів становить від 8 до 15 і більше кінських сил. Такі мотоблоки конструктивно наближаються до мінітракторів, зберігаючи при цьому принцип ручного керування. Вони призначені для виконання широкого

спектра робіт у важких умовах – оранка, культивація, транспортування вантажів, робота з активним навісним обладнанням високої енергомісткості. Завдяки великій масі важкі мотоблоки мають високий коефіцієнт зчеплення з ґрунтом, що дозволяє ефективно передавати тягове зусилля без пробуксовування [73].



Рисунок 1.9 – Загальний вигляд важкого мотоблоку

У конструктивному плані важкі мотоблоки здебільшого оснащуються дизельними двигунами з повітряним або водяним охолодженням, що забезпечує їхню тривалу роботу під великими навантаженнями. Передача крутного моменту на ходову частину зазвичай здійснюється через редуктор або ланцюгову передачу підвищеної міцності. Важкі моделі стандартно комплектуються валом відбору потужності (ВВП), що дозволяє підключати широкий спектр активного навісного обладнання, включно з роторними косарками, фрезами, насосами, бетонозмішувачами та іншими механізмами. Деякі модифікації передбачають навіть перехід на гусеничний хід для роботи в складних умовах.

Основними перевагами важких мотоблоків є їхня висока потужність, здатність працювати з важким і енергомістким обладнанням, довговічність при правильній експлуатації, а також універсальність застосування в аграрній і будівельній сферах. Завдяки значній масі та підвищеній стійкості такі мотоблоки

забезпечують надійну роботу навіть на складних ґрунтах і дозволяють здійснювати ефективне перемішування великих об'ємів суміші шляхом підключення відповідного обладнання до валу відбору потужності.

Водночас важкі мотоблоки характеризуються низкою конструктивних та експлуатаційних обмежень, які необхідно враховувати під час їх використання як джерела приводу технологічного обладнання. До таких обмежень належать значні масогабаритні показники, що ускладнюють транспортування без застосування допоміжних транспортних засобів. Крім того, підвищена вартість придбання та експлуатаційного обслуговування, а також більші витрати пального порівняно з мотоблоками меншої потужності можуть обмежувати доцільність їх застосування в умовах індивідуального будівництва або під час виконання локальних ремонтних робіт. Слід також враховувати, що експлуатація важких мотоблоків потребує відповідної підготовки оператора через значну масу машини та особливості керування нею в робочому режимі.

За типом силового агрегату мотоблоки поділяються на бензинові та дизельні. Бензинові мотоблоки набули широкого поширення в системах малої механізації завдяки відносній простоті конструкції, зручності запуску та доступності в експлуатації. Як правило, вони комплектуються двигунами внутрішнього згоряння з повітряним охолодженням потужністю від 3 до 8 к. с., що забезпечує достатній рівень енергетичних можливостей для виконання широкого спектра технологічних операцій на об'єктах малого та середнього масштабу.

Конструктивно бензинові мотоблоки мають невелику масу в порівнянні з дизельними аналогами. Порівняно з дизельними аналогами бензинові мотоблоки характеризуються меншою масою, що позитивно впливає на їх маневреність, зручність транспортування та експлуатації. Такі машини ефективно застосовуються під час виконання робіт на ділянках із м'якими ґрунтами, при обслуговуванні присадибних територій, а також під час виконання допоміжних будівельних операцій. Бензинові двигуни забезпечують надійну роботу в умовах короткочасних навантажень, відзначаються спрощеним запуском за знижених

температур та меншим рівнем вібраційних навантажень порівняно з дизельними силовими агрегатами.

До основних переваг бензинових мотоблоків належать відносно невисока вартість, конструктивна простота технічного обслуговування, нижчий рівень шуму порівняно з дизельними моделями, а також достатній рівень ремонтпридатності. Використання системи повітряного охолодження дозволяє зменшити масу силового агрегату та спростити його конструкцію, що позитивно впливає на надійність роботи в змінних умовах експлуатації.

Водночас бензинові мотоблоки характеризуються обмеженим моторесурсом порівняно з дизельними аналогами та меншою ефективністю при тривалих режимах роботи під значним навантаженням, що пов'язано з конструктивними особливостями двигуна та можливостями системи охолодження. Під час використання бензинових мотоблоків як джерела приводу розчинозмішувального обладнання доцільно враховувати їх придатність переважно для роботи в умовах середніх навантажень і періодичних режимів перемішування

Дизельні мотоблоки з повітряним охолодженням є важливою категорією техніки, що поєднує економічність дизельного двигуна з відносною простотою системи охолодження. Такі мотоблоки зазвичай мають потужність у діапазоні від 5 до 8 кінських сил і масу, що коливається в межах 90–130 кг залежно від моделі та комплектації. Їх застосовують як у сільському господарстві, так і в будівельних роботах, де потрібна надійна і витривала техніка для виконання тривалих операцій із середнім або підвищеним навантаженням.

Дизельний двигун із повітряним охолодженням забезпечує економну витрату палива, що особливо важливо при тривалих роботах у польових умовах. Повітряне охолодження здійснюється завдяки потужному вентилятору та системі ребер на циліндрі, що забезпечують відведення тепла навіть при інтенсивній експлуатації. Така система проста за конструкцією, не потребує складного технічного обслуговування і менш схильна до пошкоджень при механічних впливах або температурних перепадах, що робить мотоблоки з

повітряним охолодженням доволі стійкими в експлуатаційних умовах, далеких від ідеальних.

До основних переваг дизельних мотоблоків з повітряним охолодженням належить їх економічність, довговічність дизельних двигунів, висока тягово-зчіпна здатність за рахунок більшої ваги агрегату та стійкість до навантажень у порівнянні з бензиновими аналогами. Вони здатні працювати на паливі різної якості та забезпечувати необхідний рівень частоти обертання за змінних режимів навантаження, що позитивно впливає на ефективність виконання робіт.

Втім, дизельні мотоблоки з повітряним охолодженням мають і певні недоліки. Найбільш суттєвим з них є підвищений рівень шуму і вібрацій під час роботи, що може негативно впливати на комфорт оператора. Крім того, при надзвичайно високих температурах навколишнього середовища ефективність повітряного охолодження може знижуватися, що потребує перерв у роботі для запобігання перегріву двигуна. Незважаючи на ці недоліки, дизельні мотоблоки з повітряним охолодженням залишаються одним із найпопулярніших варіантів у сегменті універсальної малогабаритної техніки завдяки своїй простоті, економічності та витривалості.

Дизельні мотоблоки з водяним охолодженням належать до важчого і потужнішого класу техніки, яка призначена для виконання тривалих робіт у складних умовах експлуатації. Вони зазвичай оснащуються двигунами потужністю від 8 до 15 кінських сил, а маса таких агрегатів може сягати 150 кг і більше. Система водяного охолодження передбачає використання радіатора, циркуляційного насоса та трубопроводних елементів для відведення тепла від двигуна, що забезпечує підтримання допустимого теплового режиму його роботи навіть за умов інтенсивних тривалих навантажень.

Основною перевагою дизельних мотоблоків із водяним охолодженням є їхня здатність до безперервної роботи протягом тривалого часу без ризику перегріву. Завдяки ефективному охолодженню двигун працює в оптимальному тепловому режимі, що сприяє збільшенню його ресурсу та забезпечує необхідний рівень потужності навіть за підвищених температур навколишнього

середовища. Це робить мотоблоки з водяним охолодженням особливо придатними для застосування в промисловому та дорожньому будівництві, на великих земельних ділянках, а також у тривалих технологічних процесах, де потрібна стійкість до тривалих навантажень.

Додатковими перевагами є високий обертовий момент дизельного двигуна, низька витрата палива при роботі на середніх і максимальних навантаженнях, а також можливість працювати на важких ґрунтах або з великогабаритним навісним обладнанням. Водяне охолодження значно знижує рівень шуму двигуна в порівнянні з повітряними аналогами, що підвищує комфорт роботи оператора і робить використання техніки більш безпечним у тривалих виробничих циклах.

Разом із тим дизельні мотоблоки з водяним охолодженням характеризуються певними конструктивними та експлуатаційними обмеженнями. Їх конструкція є складнішою порівняно з моделями з повітряним охолодженням, що призводить до збільшення маси агрегату, ускладнює технічне обслуговування та потребує постійного контролю стану системи охолодження, зокрема герметичності її елементів і рівня охолоджувальної рідини. Крім того, такі мотоблоки мають вищу вартість порівняно з аналогами меншої потужності, що обмежує доцільність їх застосування в умовах індивідуального будівництва. Водночас у випадках виконання тривалих робіт за підвищених навантажень дизельні мотоблоки з водяним охолодженням забезпечують необхідний рівень надійності та ресурсу роботи.

За конструктивними особливостями передавання крутного моменту мотоблоки також класифікуються залежно від типу трансмісії, зокрема з використанням пасової або ланцюгової передачі. Пасова передача є однією з найпоширеніших схем передавання крутного моменту в конструкції мотоблоків, особливо легкого та середнього класів. Вона реалізується за допомогою паса, що передає обертання між шківками двигуна та редуктора або елементів трансмісії. Така передача характеризується конструктивною простотою, відносно малою

масою та невисокою вартістю виготовлення, що обумовлює її широке застосування в побутових і напівпрофесійних моделях мотоблоків.

Основною перевагою мотоблоків із пасовою передачею є конструктивна простота такої схеми, що забезпечує зручність технічного обслуговування та ремонту. Заміна паса може виконуватися без застосування спеціалізованого обладнання або залучення кваліфікованого технічного персоналу. Пасова передача також сприяє реалізації плавного пуску двигуна та зменшенню динамічних навантажень на елементи трансмісії, що позитивно впливає на довговічність вузлів мотоблока. Крім того, передачі цього типу ефективно працюють за умов невисоких і середніх навантажень, забезпечуючи надійну роботу агрегату в широкому діапазоні експлуатаційних режимів.

До недоліків пасової передачі належить обмежена здатність передавати значні крутні моменти, що знижує ефективність її застосування в умовах підвищених навантажень. Під час тривалої роботи або експлуатації у вологому та забрудненому середовищі можливе пробуксовування паса та прискорене його зношування, що призводить до зменшення ефективності передавання крутного моменту. Крім того, пасова передача потребує регулярного контролю натягу паса та його технічного стану, оскільки зменшення натягу негативно впливає на працездатність трансмісії.

Під час використання мотоблока як джерела приводу розчинозмішувального обладнання застосування пасової передачі є доцільним у випадках роботи за середніх навантажень, коли важливими є конструктивна простота трансмісії, зручність технічного обслуговування та можливість оперативного ремонту. Водночас у разі приводу розчинозмішувачів із підвищеним енергоспоживанням або за умов тривалих безперервних режимів роботи необхідно передбачати додаткові конструктивні заходи щодо забезпечення необхідного натягу паса або розглядати можливість використання альтернативних схем передавання крутного моменту.

Ланцюгова передача є однією з основних альтернатив пасовій системі в конструкції мотоблоків, особливо у середніх і важких моделях, де необхідно

передавати значний крутний момент без втрат. Принцип її роботи базується на передаванні енергії від двигуна до ходових коліс або робочого органа за допомогою ланцюга, що обертається між ведучою та веденою зірочками. Така конструкція забезпечує високу механічну ефективність, надійність і здатність працювати під великими навантаженнями протягом тривалого часу.

Серед головних переваг мотоблоків із ланцюговою передачею варто відзначити високу здатність передавати великі обертові моменти без прослизання, що робить такі агрегати особливо ефективними при обробці важких ґрунтів, транспортуванні вантажів або при використанні активного навісного обладнання. Ланцюгова передача характеризується стійкістю до короточасних перевантажень і забезпечує надійну роботу мотоблока навіть у складних умовах експлуатації, зокрема під час роботи на пересіченій місцевості або за нерівномірних навантажень.

Проте ланцюгові передачі мають і певні недоліки. Вони потребують регулярного технічного обслуговування, зокрема змащування ланцюга, контролю натягу і періодичної заміни зношених елементів. При недостатньому обслуговуванні можливе прискорене зношування як самого ланцюга, так і зірочок, що може призводити до втрати ефективності передавання крутного моменту. Крім того, внаслідок відкритої або напівзакритої конструкції ланцюгова передача є більш уразливою до забруднення пилом, брудом чи водою, що може негативно впливати на її ресурс.

З точки зору використання мотоблока як джерела приводу розчинозмішувального обладнання ланцюгова передача характеризується підвищеною здатністю передавати значні крутні моменти та забезпечувати надійну роботу за тривалих навантажень із мінімальними втратами енергії. Забезпечення стійкої передачі обертового руху за умов підвищеного опору змішуванню та працездатність у режимах інтенсивної експлуатації визначають доцільність застосування мотоблоків із ланцюговою передачею під час розроблення мобільних енергетичних систем для будівельних технологічних процесів.

Проведений аналіз конструктивних особливостей і технічних характеристик різних типів мотоблоків показує, що для використання у складі приводу розчинозмішувального обладнання найбільш придатними можуть розглядатися мотоблоки важкого класу з дизельними двигунами та системою водяного охолодження. Такі машини характеризуються достатнім рівнем потужності для забезпечення ефективного приводу змішувального органа, паливною економічністю, конструктивною надійністю та ремонтпридатністю, що є важливими чинниками їх застосування в умовах автономної роботи на будівельному майданчику. Їх масогабаритні та тягові характеристики створюють передумови для ефективного використання механічної енергії трансмісії під час приводу робочих органів розчинозмішувача.

### **1.5 Обґрунтування напрямів підвищення ефективності розчинозмішувачів**

Підвищення ефективності процесів приготування будівельних розчинів є одним із пріоритетних напрямів удосконалення сучасного змішувального обладнання. Це зумовлено необхідністю одночасного забезпечення високої продуктивності, енергоефективності та необхідної якості готової суміші за мінімальної тривалості технологічного циклу. Скорочення часу приготування розчину та забезпечення необхідної однорідності суміші є визначальними чинниками, які безпосередньо впливають на темпи виконання будівельних робіт, ритмічність виробничого процесу та загальні витрати на їх виконання.

Одним із головних напрямів підвищення ефективності обладнання є оптимізація енергоспоживання, яка передбачає зменшення втрат енергії на перемішування без зниження інтенсивності процесу. Це може бути реалізовано завдяки використанню новітніх приводних систем, зокрема гідроприводів, бензинових або дизельних двигунів або механічних систем із передачею від валу відбору потужності. У поєднанні з правильною геометрією робочого органа, регульованою частотою обертання та інерційною компенсацією навантаження

можливо значно зменшити споживання палива або електроенергії, одночасно досягнувши скорочення тривалості змішування. Таким чином, обладнання працює в більш економічному режимі, не втрачаючи при цьому здатності формувати однорідну суміш з відповідними технічними властивостями [74].

Наступним чинником, що визначає ефективність процесу приготування будівельних розчинів, є тривалість циклу змішування. Вона залежить від конструкції змішувального вузла, типу робочого органа, режиму роботи привода, а також швидкості й точності дозування компонентів. Найменшу тривалість циклу забезпечують конструкції, у яких стрічкові або лопатеві робочі органи поєднуються зі спрямованим переміщенням розчинної суміші до зони вивантаження. Це сприяє зменшенню застійних зон, більш рівномірному розподілу енергії перемішування в робочому об'ємі та інтенсифікації процесу змішування. За таких умов тривалість повного циклу становить 3–5 хв, що забезпечує необхідну однорідність суміші та збереження її технологічних властивостей [75].

Поряд із енергетичною та часовою ефективністю необхідно враховувати якісні характеристики готової суміші. Обладнання повинно забезпечувати необхідну однорідність розчину незалежно від його складу, типу заповнювачів або наявності добавок. Для цього важливими є конструктивна точність змішувального вузла, рівномірність подачі води, цементу та інертних матеріалів, а також наявність систем контролю, які дозволяють в реальному часі регулювати параметри змішування [76].

Ще одним важливим аспектом підвищення ефективності є адаптація обладнання до конкретних умов експлуатації. Йдеться про можливість роботи на об'єктах, де відсутнє електропостачання, є обмежений доступ до інфраструктури або спостерігаються складні погодні чи географічні умови. У таких випадках особливої актуальності набуває використання обладнання з приводом від ДВЗ або від сільськогосподарської техніки, що дозволяє не лише уникнути залежності від електромережі, але й забезпечити автономність роботи та гнучкість розгортання. Обладнання, здатне швидко запускатися, працювати в

автономному режимі та переміщуватися між об'єктами без потреби в спеціальній техніці, автоматично стає більш ефективним у порівнянні з важкими стаціонарними системами.

Крім технічних факторів, важливим елементом підвищення ефективності є простота обслуговування і технічна надійність. Чим менше часу потрібно на підготовку до роботи, запуск, очищення або заміну зношених елементів, тим більше часу обладнання проводить у продуктивному режимі. Застосування знімних змішувальних лопатей, антикорозійних покриттів, легких і зносостійких матеріалів, а також інтуїтивно зрозумілих систем керування дозволяє не лише зменшити навантаження на персонал, а й продовжити термін експлуатації установки без суттєвих витрат на технічне обслуговування.

## **1.6 Висновки до розділу 1**

1. Встановлено, що існуючі розчинозмішувачі циклічної та безперервної дії мають різну ефективність залежно від умов застосування, при цьому мобільні установки забезпечують технологічну автономність і оперативність виконання робіт безпосередньо на будівельному майданчику, але характеризуються обмеженими енергетичними можливостями та продуктивністю.

2. Встановлено, що якість будівельного розчину визначається сукупністю технологічних параметрів процесу змішування, серед яких визначальними є інтенсивність перемішування компонентів, тривалість циклу змішування, рівномірність розподілу в'язучого матеріалу та точність дозування складових суміші, що безпосередньо впливає на фізико-механічні властивості розчину.

3. Виявлено, що застосування традиційних розчинозмішувачів з електричним приводом є обмеженим в умовах будівельних майданчиків із недостатнім рівнем енергозабезпечення, що обумовлює необхідність використання автономних механічних джерел приводу змішувального обладнання.

4. Встановлено, що використання мобільних енергетичних засобів малої механізації як джерела приводу змішувачів створює передумови для підвищення енергоефективності технологічного процесу приготування будівельних розчинів і розширення можливостей застосування змішувального обладнання в умовах індивідуального та маломасштабного будівництва.

5. Виявлено, що серед існуючих типів мобільних енергетичних засобів найбільш придатними для використання як джерела приводу розчинозмішувача є мотоблоки важкого класу потужності, які забезпечують необхідні енергетичні параметри приводу змішувального органа та можливість роботи в автономних умовах.

6. За результатами проведеного аналізу обґрунтовано доцільність розроблення розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока, який забезпечує підвищення технологічної автономності процесу приготування будівельних розчинів та зниження енерговитрат у порівнянні з традиційними конструкціями змішувального обладнання.

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу приготування будівельних розчинів шляхом обґрунтування конструктивно-кінематичних і енергетичних параметрів розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблоку.

Для досягнення поставленої мети передбачається вирішити такі завдання:

- проаналізувати сучасний стан технічних засобів приготування будівельних розчинів та визначити напрямки підвищення ефективності мобільного змішувального обладнання;

- обґрунтувати доцільність використання мотоблока як енергетичної бази приводу розчинозмішувача;

- визначити оптимальні конструктивні та технологічні параметри змішувача, які забезпечують однорідність суміші та скорочення часу змішування;

- розробити конструктивну схему розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока;

- побудувати математичну модель процесу змішування будівельних розчинів у змішувачі мобільного типу;
- встановити закономірності впливу конструктивних і режимних параметрів робочого органа на якість перемішування та енергоємність процесу;
- обґрунтувати раціональні параметри змішувального органа та режимів роботи обладнання;
- провести експериментальні дослідження та перевірити адекватність теоретичних залежностей;
- провести експериментальні дослідження та перевірити адекватність теоретичних залежностей.

## РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОБОТИ РОЗЧИНОЗМІШУВАЧА З ПРИВОДОМ ВІД ВАЛУ ТРАНСМІСІЇ МОТОБЛОКА

### 2.1 Аналіз кінематичної схеми приводу від валу трансмісії мотоблока

Мотоблок є універсальним обладнанням, яке широко застосовується в сільському господарстві, дорожньо-будівельній справі та побуті. Основною його функцією є забезпечення приводу для різноманітного навісного або причіпного обладнання, що дозволяє виконувати механізовані операції без використання повноцінної техніки. В умовах малої механізації та обмеженого енергопостачання, саме мотоблок виступає доступним і ефективним джерелом механічної енергії. У запропонованій конструкції розчинозмішувача використання мотоблока як джерела є одним з ключових конструктивних рішень, що дозволяє забезпечити автономність, мобільність і простоту експлуатації установки.

Принцип роботи мотоблока ґрунтується на перетворенні енергії згоряння палива в обертальний рух за допомогою дизельного двигуна внутрішнього згоряння. Вісь коліс мотоблока приводиться в обертання через систему передач, яка, як правило, складається з багатоступеневого редуктора, зчеплення та трансмісійного валу. Зазвичай мотоблоки оснащуються шестеренчастими або ланцюговими коробками передач, які дозволяють змінювати швидкість руху в межах кількох режимів. Це створює передумови для адаптації швидкості обертання вихідного валу до конкретних вимог навісного обладнання. У даному випадку така адаптація дозволяє забезпечити оптимальні умови роботи змішувального барабана розчинозмішувача.

Потужність мотоблоків зазвичай знаходиться в межах 8–15 к.с., а швидкість обертання коліс при звичайному русі коливається до 120 об/хв. Такі параметри є достатніми для забезпечення обертального руху валу змішувача, з урахуванням відповідного передавального числа.

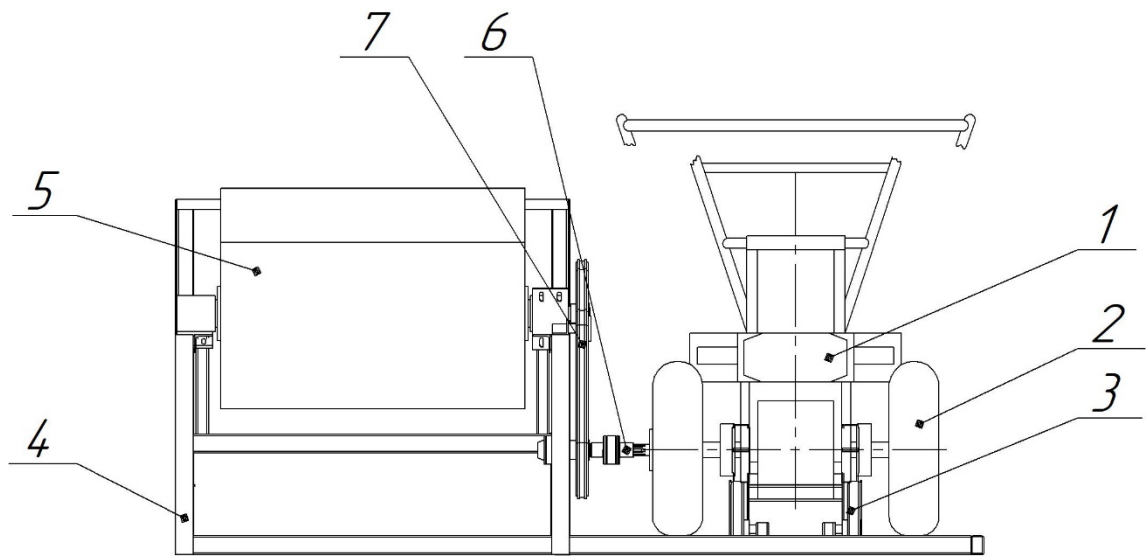


Рисунок 2.1 – Конструктивна схема розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока

Узагальнена кінематична схема включає такі основні елементи: мотоблок (1), його ведене колесо (2), проміжну опору або стійку (3), на якій фіксується мотоблок у нерухомому положенні; загальну раму установки (4), на якій змонтовано змішувальний барабан (5); проміжний вал (6), що встановлений на підшипникових опорах і механічно зв'язаний з колесом за допомогою ланцюгової передачі (7). Рух від колеса передається на ведучу зірочку, закріплену на валу, після чого цей вал обертає робочий орган розчинозмішувача.

Вал трансмісії мотоблока виконує функцію ведучого елемента ланцюгової передачі. На проміжний вал закріплюється додатковий шків або інший елемент, що дозволяє утримувати ланцюг у робочому положенні. У свою чергу, проміжний вал, на якому змонтовано ведучу зірочку з'єднує ланцюг з валом трансмісії. Цей вал передає обертання на робочий орган змішувального барабану через ланцюгову передачу та ведену зірочку, залежно від необхідного передавального числа. Завдяки цьому досягається необхідна частота обертання змішувального органа для забезпечення якісного перемішування розчинів [77].

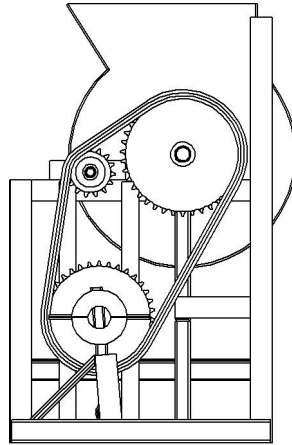


Рисунок 2.2 – Конструктивна схема розчинозмішувача, вигляд збоку

Всередині змішувального барабану на валу закріплені гвинтові лопатки, що виконують функцію перемішування. Обертання валу забезпечує рух суміші по гвинтовій траєкторії з одночасним підняттям і перевертанням частинок, що сприяє утворенню однорідної маси. Конструкція дозволяє працювати з різними типами розчинів, включаючи вапняно-піщані, цементні та полімерні суміші.

Для забезпечення ефективної роботи розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока необхідно здійснити точне визначення передавальних чисел у кінематичній схемі. Від цього параметра безпосередньо залежить частота обертання вала у змішувальному барабані [78].

Передавальне число у механічній системі визначається як відношення кутової швидкості ведучого елемента до кутової швидкості веденого елемента. У випадку ланцюгової передачі між мотоблоком та валом змішувача, передавальне число можна розрахувати як відношення діаметра веденої зірочки, закріпленій на валу змішувача, до діаметра ведучої зірочки, встановленій на проміжному валу. Формально це можна записати у вигляді:

$$i = \frac{D_{\text{ведений}}}{D_{\text{ведучий}}}, \quad (2.1)$$

де  $i$  – передавальне число,

$D_{\text{ведений}}$  – діаметр веденої зірочки на валу змішувача,

$D_{\text{ведучий}}$  – діаметр ведучої зірочки на проміжному валу мотоблока.

У даній системі передача обертання виконується за допомогою ланцюгової передачі, що дозволяє забезпечити надійне зчеплення та передавання моменту навіть за змінного навантаження. При розрахунках слід враховувати, що швидкість обертання валу трансмісії може змінюватись в межах 30–60 об/хв, залежно від передачі у редукторі мотоблока.

Для ефективного перемішування цементних і вапняних розчинів раціональною вважається частота обертання змішувального барабана в межах 15–30 об/хв. Тому необхідно підібрати таке передавальне число, яке забезпечить зменшення обертів від валу трансмісії мотоблока до зазначеного діапазону. Наприклад, якщо вал трансмісії обертається зі швидкістю 45 об/хв, а необхідна частота обертання робочого органу складає 18 об/хв, то передавальне число має бути:

$$i = \frac{45}{18} = 2,5. \quad (2.2)$$

Функціонування розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока ґрунтується на передаванні крутного моменту до змішувального органу через елементи кінематичної передачі. При цьому визначальне значення має узгодження кінематичних параметрів усіх ланок привода, оскільки від характеру їх взаємодії залежать частота обертання змішувального валу, інтенсивність перемішування та однорідність будівельного розчину.

Для реалізації приводу розчинозмішувача використовується кінематична схема, в якій обертальний момент з трансмісії мотоблока передається через вал. Мотоблок встановлюється стаціонарно на спеціальній стійці, що запобігає його переміщенню під час роботи. При запуску двигуна обертання від валу трансмісії передається на проміжний вал. Це обертання передається через шків, закріплений співвісно з віссю валу трансмісії, а далі через ланцюгову передачу – на приводний вал розчинозмішувача.

У конструкції використовується стаціонарний барабан із гвинтовими лопатками примусової дії, які встановлені всередині барабана і обертаються навколо його осі. Ці лопатки забезпечують інтенсивне перемішування

розчинової маси за рахунок її переміщення вздовж осі барабана та циркуляції по об'єму. Напрямок обертання лопаток визначає вектор руху матеріалу: при правому обертанні суміш підіймається по спіралі з однієї сторони і опускається з іншої, забезпечуючи необхідний змішувальний ефект. У разі зміни напрямку обертання вектор переміщення змінюється, що може бути корисним для реверсивного або ступінчастого режиму змішування.

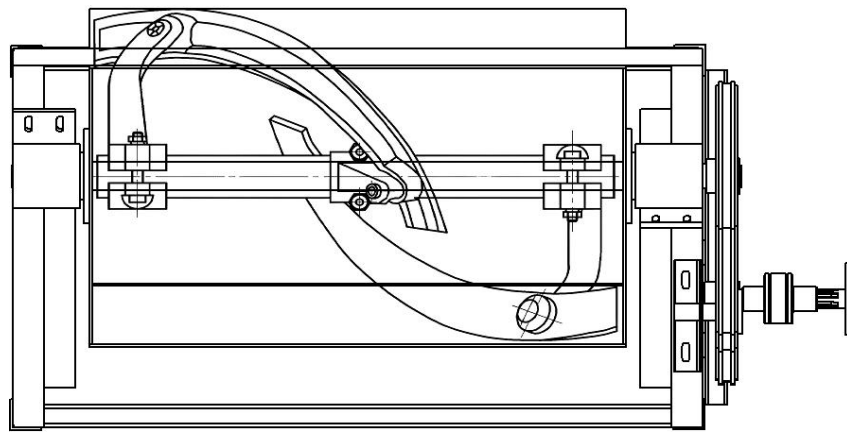


Рисунок 2.3 – Схема розчинозмішувача, вигляд згори

Характер руху всіх елементів кінематичної системи можна охарактеризувати як періодичний обертальний, що залежить від швидкості руху мотоблока.

Розрахунок кутових швидкостей і частот обертання дозволяє зрозуміти, як саме енергія, отримана від обертання колеса, перетворюється в обертальний рух робочого органу.

Початковим елементом системи є вал трансмісії мотоблока, який має лінійну швидкість руху  $v$ , що визначається під час реальної роботи мотоблока.

Кутова швидкість валу трансмісії визначається за формулою:

$$\omega_k = \frac{v}{r_k}, \quad (2.3)$$

де  $\omega_k$  – кутова швидкість валу трансмісії, рад/с;

$v$  – лінійна швидкість валу трансмісії, м/с;

$r_k$  – радіус валу трансмісії, м.

Частота обертання валу трансмісії визначається за формулою:

$$n_k = \frac{\omega_k \cdot 60}{2\pi}, \quad (2.4)$$

де  $n_k$  – частота обертання валу трансмісії, об/хв.

Передача обертового моменту від валу трансмісії до вала змішувача здійснюється за допомогою ланцюгової передачі. Для визначення частоти обертання валу змішувача, що з'єднаний з робочим органом розчинозмішувача, використовується передавальне число:

$$i = \frac{d_6}{d_k}, \quad (2.5)$$

де  $i$  – передавальне число;

$d_6$  – діаметр веденої зірочки, м;

$d_k$  – діаметр ведучої зірочки, м.

Відповідно, частота обертання змішувача визначається як:

$$n_3 = \frac{n_k}{i}, \quad (2.6)$$

де  $n_3$  – частота обертання вала змішувача, об/хв.

Також враховується ККД ланцюгової передачі, позначений як  $\eta$ . З урахуванням втрат, частота обертання змішувача буде дещо меншою:

$$n_{\text{факт}} = \eta \cdot n_3, \quad (2.7)$$

де  $n_{\text{факт}}$  – фактична частота обертання вала змішувача, об/хв;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії передачі.

Аналогічно, можна визначити кутову швидкість вала змішувача:

$$\omega_3 = \frac{2\pi \cdot n_{\text{факт}}}{60}, \quad (2.8)$$

де  $\omega_3$  – кутова швидкість вала змішувача, рад/с.

У разі багатоступінчастої передачі, передавальне число визначається як добуток передавальних чисел кожного етапу:

$$i_{\text{заг}} = i_1 \cdot i_2 \cdot \dots \cdot i_n, \quad (2.9)$$

де  $i_{заг}$  – загальне передавальне число в системі;

Кожен елемент кінематичної схеми, включаючи вал трансмісії мотоблока, шків, ланцюг, вал змішувача та сам змішувальний барабан, має момент інерції, який чинить опір зміні швидкості обертання. Момент інерції колеса можна оцінити за класичною формулою:

$$J = \frac{1}{2}mr^2, \quad (2.10)$$

де  $m$  – маса колеса, кг,

$r$  – його радіус, м.

Ще одним важливим аспектом є врахування моментів опору, які виникають у підшипниках, втулках, шківках і ланцюгової передачі. Вони також формують загальний баланс потужностей і впливають на ефективність передачі. У загальному випадку момент опору  $M_{on}$  можна подати як суму моментів тертя, інерційних моментів та реакційних моментів від навантаження. Рівняння динамічної рівноваги системи можна записати у вигляді:

$$M_{об} - M_{on} = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (2.11)$$

де  $M_{об}$  – момент, що розвивається двигуном, Н·м;

$J$  – сумарний момент інерції системи, кг·м<sup>2</sup>.

Проведений аналіз кінематичної схеми приводу розчинозмішувача від валу трансмісії мотоблока дозволив встановити взаємозв'язок між параметрами елементів привідної системи та режимами роботи змішувального органа. Отримані аналітичні залежності дають змогу визначати передавальні числа, частоту обертання та кутову швидкість змішувального вала з урахуванням конструктивних особливостей приводу і втрат у передачі. Урахування моментів інерції та моментів опору дає можливість оцінити вплив параметрів привідної системи на роботу змішувача.

## 2.2. Кінематичні та енергетичні закономірності роботи змішувального органа

Процес змішування в обладнанні з обертальним робочим органом базується на фізичних принципах перемішування різнорідних компонентів, зокрема піску, цементу та води, з метою отримання однорідної суміші з заданими властивостями. Механізм змішування реалізується завдяки валу з лопатками та сили тяжіння, тертя, інерції й міжчастинкової взаємодії. У випадку досліджуваного обладнання змішування забезпечується шляхом передачі обертального руху від мотоблока на вал із гвинтовими лопатками, що спричиняє активну циркуляцію компонентів усередині робочої камери змішувача.

Під час запуску приводу, що передає крутний момент від двигуна мотоблока до вала змішувача, починається обертання гвинтових лопаток у змішувачі. Частинки піску, цементу та вода захоплюються лопатками і переміщуються вздовж внутрішньої поверхні барабана. Завдяки формі лопаток (гвинтову) матеріал одночасно здійснює поступальний та обертальний рух, що створює багаторазові зміщення компонентів у різних напрямках.

Фізичний змішувальний процес можна умовно поділити на три основні фази: захоплення матеріалу лопаткою, підйом і переміщення частинок по гвинтовій траєкторії, та випадіння суміші під дією сили тяжіння. Повторюваність цих фаз протягом обертання забезпечує численні акти перемішування. Гвинтова геометрія робочих органів формує потоки, які сприяють турбулізації руху частинок, що прискорює процес руйнування локальних конгломератів цементу або піску та сприяє кращому розподілу вологи.

Крім механічного переміщення, важливу роль у процесі змішування відіграють фізичні взаємодії між частинками. Під час зіткнення зерен піску та цементу між ними відбувається передача імпульсу, що сприяє мікропереміщенням частинок і руйнуванню їх початкової структури. Додатковим чинником є формування в'язкопластичного цементного тіста при контакті цементу з водою. Це середовище обволікає частинки заповнювача та

забезпечує передачу енергії через зсувні деформації, що виникають під дією руху лопаток змішувача.

Режим змішування у розчинозмішувачі визначає характер руху частинок у суміші та ефективність формування однорідної маси. В залежності від реологічних властивостей суміші, конструкції робочих органів та швидкості їх обертання, процес може протікати в різних режимах – ламінарному, турбулентному або в середовищі з псевдопластичними властивостями. Кожен з них має свої переваги й обмеження та суттєво впливає на кінцеву якість змішаного матеріалу.

Для ламінарного режиму характерний впорядкований рух потоку, за якого суміжні шари середовища переміщуються без суттєвого взаємного перемішування [79]. Такий режим спостерігається за малих швидкостей обертання робочих органів або у випадках, коли суміш має високу в'язкість. Для визначення, використовують критерій Рейнольдса ( $Re$ ):

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu}, \quad (2.12)$$

де  $\rho$  – густина суміші, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – лінійна швидкість руху частинок, м/с;

$d$  – діаметр змішувача або валу, м;

$\mu$  – динамічна в'язкість суміші, Па·с.

Псевдопластичні рідини мають властивість знижувати в'язкість при зростанні швидкості зсуву. Така поведінка описується законом Оствальда-де Вааля:

$$\tau = k \cdot \gamma^n, \quad (2.13)$$

де  $\tau$  – дотичне напруження зсуву, Па;

$k$  – консистенційна стала матеріалу, Па·с<sup>n</sup>;

$\gamma$  – швидкість зсуву, 1/с;

$n$  – показник течії (для псевдопластичних середовищ  $0 < n < 1$ ).

При зростанні швидкості обертання змішувального вала в'язкість суміші зменшується, що сприяє активнішому перемішуванню без надмірного навантаження на привід.

Режим змішування в системі залежить від сукупності параметрів – геометрії лопаток, швидкості обертання, фізико-механічних характеристик компонентів суміші, температури, вологості тощо. У розчинозмішувачі, де передача руху відбувається через колесо мотоблока, частіше реалізується змішування в умовах псевдопластичного середовища з переходом до турбулентного в разі використання вищих передач та відповідного передавального числа.

Для ідентифікації режиму змішування можна використовувати узагальнений критерій консистенції – модифікований Рейнольдс для псевдопластичних середовищ:

$$Re_m = \frac{\rho \cdot v^{2-n} \cdot d^n}{k}. \quad (2.14)$$

Фізично процес досягнення однорідності будівельної суміші можна розглядати як поступове зменшення масштабу структурних неоднорідностей до рівня, за якого їх неможливо виявити в межах контрольного об'єму матеріалу. Це забезпечується багаторазовим переміщенням і взаємною переорієнтацією частинок цементу та заповнювача у водному середовищі, яке бере участь у процесах гідратації цементу та формуванні в'язкопластичної дисперсної системи. Основним механізмом досягнення однорідності є диспергування, що полягає у руйнуванні агрегованих частинок і їх рівномірному перерозподілі в об'ємі суміші. У лопатевих змішувачах цей процес реалізується внаслідок різниці швидкостей руху робочих органів і матеріалу в змішувальному об'ємі, що приводить до виникнення зон підвищених градієнтів швидкості, які є найбільш ефективними для інтенсифікації диспергування компонентів суміші.

Інтенсивність диспергування залежить від швидкості зсуву в середовищі, яка описується величиною:

$$\gamma = \frac{dv}{dy}, \quad (2.15)$$

де  $dv$  – зміна швидкості потоку, м/с;

$dy$  – зміна координати в напрямку, перпендикулярному до потоку, м.

Однорідність розчину також залежить від кількості циклів змішування, протягом яких відбувається перекриття потоків різної концентрації компонентів. Чим більше таких перекриттів, тим краще відбувається усереднення складу. Це явище можна описати з точки зору теорії перемішування частинок, яка припускає, що ступінь однорідності зростає експоненційно зі збільшенням кількості циклів перемішування:

$$U = 1 - e^{-k \cdot n}, \quad (2.16)$$

де  $U$  – ступінь однорідності;

$k$  – коефіцієнт ефективності перемішування;

$n$  – кількість циклів перемішування.

Робочий орган розчинозмішувача, що працює за принципом гвинтового змішування визначає характер руху та ступінь перемішування компонентів у барабані. Основою його конструкції є гвинтові лопатки, закріплені на обертовому валу вздовж його осі, які забезпечують як радіальне, так і осьове переміщення частинок суміші. Таке поєднання рухів сприяє формуванню складних тривимірних потоків усередині робочої камери, що значно підвищує ефективність перемішування.

Конфігурація гвинтових лопаток суттєво впливає на напрямок та інтенсивність руху матеріалів. Лопатки мають гвинтову форму з певним кроком  $S$ , який визначає швидкість осьового переміщення частинок уздовж барабана. Формально це можна виразити як:

$$S = \frac{2\pi R}{\tan(\alpha)}, \quad (2.17)$$

де  $S$  – крок гвинтової лопатки, м;

$R$  – радіус розташування лопатки відносно осі обертання, м;

$\alpha$  – кут нахилу лопатки до осі вала, рад.

Зв'язок між обертанням вала та переміщенням суміші в барабані можна описати через гвинтову кінематику. Припустимо, що частинка суміші

переміщується уздовж гвинтової траєкторії з радіусом  $R$  та кроком  $S$ , тоді її швидкість має дві складові – тангенціальну (обертальну) і осьову:

$$v_{рез} = \sqrt{v_{\theta}^2 + v_z^2}, \quad (2.18)$$

де  $v_{рез}$  – результуюча швидкість частинки, м/с;

$v_{\theta}$  – обертальна швидкість, м/с;

$v_z$  – осьова швидкість, м/с.

При обертанні вала гвинтові лопатки створюють в барабані умови переміщення суміші з периферії до центру і вздовж осі змішувача. Цей ефект формує складну картину потоків, де компоненти багаторазово змінюють своє положення у просторі, що є необхідною умовою для інтенсивного диспергування та гомогенізації. Особливо ефективно це відбувається у випадку, коли частота обертання змішувального вала знаходиться в діапазоні, що забезпечує турбулентний режим.

Основним фізичним критерієм початку зсуву частинок суміші є перевищення дії тангенціальної сили над силами зчеплення між частинками. Зсув у середовищі виникає тоді, коли дотичне напруження  $\tau$  перевищує межу зсуву  $\tau_{кр}$ . Формально це описується наступною умовою:

$$\tau = \mu \cdot \sigma, \quad (2.19)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт внутрішнього тертя суміші,

$\sigma$  – нормальний тиск на частинки, Па.

Якщо  $\tau > \tau_{кр}$ , тобто сили тертя долають опір зчеплення частинок, починається зсувний рух. У зоні, де зусилля прикладене гвинтовими лопатками, виникає локальний зсув, що дозволяє розривати агломерати та переміщати частинки в нові положення, формуючи об'ємне перемішування.

Іншим важливим механізмом є перевертання – циклічний процес, при якому маса матеріалу піднімається гвинтовою лопаткою вгору по стінці барабана, а потім під дією власної ваги падає вниз. Це явище реалізується завдяки суміщенню відцентрових і гравітаційних сил. Умовою виникнення перевертання є наявність достатнього радіального прискорення, яке задається як:

$$a_r = R \cdot \omega^2, \quad (2.20)$$

де  $a_r$  – відцентрове прискорення, м/с<sup>2</sup>,

$R$  – відстань від осі обертання до частинки, м.

Частинки починають відриватися від поверхні, коли відцентрове прискорення перевищує гравітаційне:

$$a_r > g \Rightarrow R \cdot \omega^2 > g, \quad (2.21)$$

З цієї умови можна визначити критичну кутову швидкість, при якій починається активне перевертання:

$$\omega_{кр} = \sqrt{\frac{g}{R}}, \quad (2.22)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Ще одним важливим аспектом є зсув за рахунок в'язкості середовища. Для опису цього процесу використовується закон Ньютона або узагальнені моделі для неньютонівських рідин. Для псевдопластичних середовищ, до яких належать цементні розчини, часто використовується степенева модель:

$$\tau = k \cdot \left( \frac{dv}{dy} \right)^n, \quad (2.23)$$

де  $k$  – коефіцієнт консистенції, Па·с <sup>$n$</sup> ,

$dv$  – градієнт швидкості зсуву, с<sup>-1</sup>,

$n$  – показник степеня псевдопластичності.

Передача енергії від обертового вала до матеріалу забезпечує механічний вплив на компоненти суміші шляхом створення зусиль зсуву, переміщення та диспергування. Основним елементом, який реалізує передачу енергії, є гвинтова лопатка, закріплена на валу, що обертається. При цьому механічна енергія, яку виробляє двигун, трансформується в кінетичну енергію руху частинок матеріалу.

Процес починається з генерації обертового моменту на валу. Цей момент передається гвинтовим лопаткам, які занурені в суміш. Лопатки рухаються у в'язкому середовищі та створюють сили, що змушують частинки суміші

змінювати своє положення. Кількість енергії, що передається від вала до суміші, залежить від обертового моменту та кутової швидкості вала.

Передача енергії залежить також від реологічних властивостей суміші. В'язкі й псевдопластичні середовища чинять різний опір руху, що впливає на ефективність перемішування. Щоб охарактеризувати силу, яку чинить суміш на лопатку, можна використовувати формулу для сили гідродинамічного опору:

$$F = C_R \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot v^2}{2}, \quad (2.25)$$

де  $F$  – гідродинамічна сила опору, Н,

$C_R$  – коефіцієнт опору,

$A$  – площа поперечного перерізу лопатки, м<sup>2</sup>,

$v$  – відносна швидкість переміщення лопатки в середовищі, м/с.

Важливо зазначити, що енергія, яка передається суміші під час перемішування, забезпечує не лише її макроскопічне переміщення в робочому об'ємі змішувача, але й руйнування злежаних скупчень частинок, що утворюються внаслідок грудкування цементу або взаємного зчеплення зерен заповнювача. Руйнування таких структур відбувається під дією локальних ударних навантажень і зсувних напружень, які виникають у зоні контакту робочих органів із матеріалом під час проходження лопаток через суміш.

За збільшення частоти обертання змішувального вала в робочому об'ємі можуть виникати турбулентні потоки, які суттєво інтенсифікують процес перемішування. Турбулентний режим забезпечує швидший перерозподіл компонентів суміші та прискорює досягнення необхідної однорідності. У цьому випадку енергія, передана робочими органами суміші, перерозподіляється по всьому її об'єму за рахунок утворення вихрових структур різного масштабу. Питома енергія, що підводиться до одиниці об'єму суміші в турбулентному режимі, визначається залежністю:

$$\varepsilon = \frac{P}{V}, \quad (2.26)$$

де  $\varepsilon$  – питома потужність, Вт/м<sup>3</sup>,

$P$  – загальна потужність, Вт,

$V$  – об’єм змішувальної камери, м<sup>3</sup>.

Встановлено, що ефективність змішування будівельних розчинів у змішувачі з гвинтовими лопатками визначається поєднанням осьового та тангенціального переміщення частинок, що забезпечує формування просторових циркуляційних потоків у робочому об’ємі. Показано, що інтенсивність диспергування компонентів залежить від швидкості зсуву, кількості циклів перемішування та реологічних властивостей середовища, яке проявляє псевдопластичні властивості. Визначено умови виникнення зсувних деформацій і перевертання матеріалу в барабані, що забезпечують руйнування злежаних скупчень частинок і підвищення однорідності суміші. Обґрунтовано, що передача енергії від робочого органа до матеріалу характеризується залежністю від кутової швидкості вала, геометричних параметрів лопаток і гідродинамічного опору середовища, що дозволяє оцінювати енергетичну ефективність процесу змішування.

## **2.3 Теоретичне визначення силових і енергетичних параметрів приводу змішувача**

### **2.3.1 Визначення сили взаємодії робочих органів із сумішшю та моменту опору змішуванню**

Сила опору, що діє на робочу лопатку в процесі її руху в суміші, розглядається як результат гідродинамічного тиску середовища, який чинить спротив відносному переміщенню. В основі розрахунку лежить узагальнене рівняння для сили гідродинамічного опору плоскій поверхні, зануреної в текуче середовище, що рухається з відносною швидкістю  $v$ . У класичному вигляді воно записується так:

$$F_{on} = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A_{ef} \cdot v^2. \quad (2.27)$$

Ефективну площу  $A_{ef}$  доцільно подати як функцію геометричних параметрів:

$$A_{ef} = b \cdot h \cdot \beta, \quad (2.28)$$

де  $b$  – ширина лопатки, м;

$h$  – довжина лопатки в площині руху, м;

$\beta$  – коефіцієнт занурення, який враховує, яка частина лопатки занурена у суміш ( $0 < \beta \leq 1$ ).

Таким чином, повний вираз для сили опору можна записати у вигляді:

$$F_{on} = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot b \cdot h \cdot \beta \cdot v^2. \quad (2.29)$$

Це рівняння дозволяє точно враховувати вплив змін геометрії робочих органів і параметрів середовища на силу, яка виникає під час змішування. Також слід зауважити, що коефіцієнт  $C_d$  є функцією числа Рейнольдса, що дозволяє пов'язати силу опору із режимом течії навколо лопатки:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\eta}. \quad (2.30)$$

Сила зсуву, з іншого боку, описує реологічні властивості середовища. У випадку пластичних або псевдопластичних розчинів, вона залежить від напруження зсуву  $\tau$ , що діє на елементарний шар суміші, і визначається за рівнянням:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}. \quad (2.31)$$

Гradient швидкості зсуву в реальних умовах експлуатації визначити безпосередньо складно, тому його доцільно оцінювати наближено через різницю швидкостей у шарі суміші на певній відстані від поверхні лопатки. Під час обертання вала відбувається взаємодія робочого органа з компонентами суміші, які проявляють одночасно ознаки твердоподібної та рідкоподібної поведінки, унаслідок чого ефективна в'язкість середовища не є сталою величиною та залежить від режиму змішування і структури потоку. За таких умов збільшення швидкості руху лопатки не завжди супроводжується пропорційним зростанням

сили опору, особливо для будівельних сумішей із нелінійними реологічними властивостями, в'язкість яких змінюється залежно від швидкості зсуву.

У цілому вся реакція середовища на рух лопатки проявляється у вигляді результуючої сили, спрямованої проти напрямку руху, яка й визначає момент опору на валу. В подальшому ця сила буде використана для обчислення моменту  $M_{on}$ , що розвивається на валу:

$$M_{on} = F_{on} \cdot r. \quad (2.32)$$

Цей момент буде протидіяти моменту, який подається від колеса мотоблока через трансмісію, і визначає фактичне навантаження на привід.

Переходячи від сили опору до розрахунку моменту сили на валу змішувача, необхідно враховувати фундаментальні закони механіки, зокрема, поняття моменту сили відносно осі обертання. Момент сили  $M$  визначається як добуток сили, прикладеної до тіла, на плече цієї сили відносно центра обертання. У загальному вигляді момент сили обчислюється за формулою:

$$M = F \cdot r \cdot \sin(\theta), \quad (2.33)$$

де  $M$  – момент сили, Н·м,

$F$  – сила, прикладена до лопатки, Н,

$r$  – відстань від осі обертання до точки прикладання сили, м,

$\theta$  – кут між вектором сили та плечем сили, рад.

У випадку розчинозмішувача гвинтові лопатки розташовані вздовж осі обертання і сила опору в основному прикладена перпендикулярно до напрямку обертання. Тому для спрощення моделі можна прийняти  $\theta \approx 90^\circ$ , а отже  $\sin(\theta) = 1$ . Це дає спрощену форму:

$$M = F \cdot r, \quad (2.34)$$

де  $F$  – сила опору, що визначається як:

$$F = C \cdot \rho \cdot A \cdot h. \quad (2.35)$$

Підставивши у вираз для моменту:

$$M = C \cdot \rho \cdot A \cdot h \cdot r, \quad (2.36)$$

де  $h$  – глибина занурення лопатки в суміш, м,

$r$  – радіус до центру тиску на лопатку, м.

Цей момент є визначеним для однієї лопатки. Для реального змішувача, який має кілька лопаток, загальний момент на валу обчислюється як сума моментів від кожної лопатки. Якщо геометрія симетрична та сили рівномірні, можна скористатися множенням на кількість лопаток  $n$ :

$$M_{заг} = n \cdot C \cdot \rho \cdot A \cdot h \cdot r. \quad (2.37)$$

Кожна лопатка створює власний момент сили внаслідок дії сили опору перемішуванню суміші. Так як всі лопатки мають однакові геометричні параметри, однакову глибину занурення, розташовані на однаковій відстані від осі обертання та діють в однаковому середовищі, можна вважати, що значення моментів від кожної лопатки є рівними. У такому разі сумарний момент визначається як:

$$M_{заг} = \sum_{i=1}^n M_i = n \cdot M_1, \quad (2.38)$$

де  $M_{заг}$  – загальний момент на валу, Н·м,

$M_i$  – момент сили, створений  $i$ -тою лопаткою, Н·м,

$n$  – кількість лопаток, шт.

### 2.3.2 Визначення крутного моменту приводу змішувача

Визначення моменту, що подається від приводу розчинозмішувача, слід розглянути особливості використання енергії обертального руху колеса мотоблока, яка передається через трансмісійну систему до вала змішувача. Цей тип приводу має специфічну кінематику та механічні характеристики, тому потребує ретельного теоретичного обґрунтування та перерахунку моментів сили з урахуванням коефіцієнтів передачі.

Основна ідея полягає у використанні обертального моменту, що формується трансмісією мотоблока та передається на шків, закріплений на осі ведучого колеса. Обертання цього шківа використовується як привід для розчинозмішувача за допомогою ланцюгової передачі.

Після визначення моменту на колесі, розглядається передача обертального моменту до вала змішувача через систему трансмісії. Для цього необхідно врахувати коефіцієнт передавання трансмісії  $i$ , який визначає зміну швидкості та моменту:

$$M_{вал} = M_{кол} \cdot i \cdot \eta, \quad (2.39)$$

де  $M_{вал}$  – момент на валу змішувача, Н·м,

$i$  – передавальне число трансмісії ,

$\eta$  – ККД трансмісії.

Кінцеве значення моменту на валу змішувача  $M_{вал}$  можна використати для порівняння з опірним моментом  $M_{оп}$ , який був визначений раніше. Таким чином, для забезпечення стійкого змішування необхідно, щоб:

$$M_{вал} \geq M_{оп}, \quad (2.40)$$

Визначення крутного моменту на змішувальному валу дозволяє оцінити можливість передачі необхідної потужності від привода до робочого органа. Отримані залежності дають змогу перевірити відповідність параметрів привідної системи умовам стійкої роботи розчинозмішувача та є вихідними даними для подальшого визначення потужності привода.

### 2.3.3 Визначення потужності привода змішувача з урахуванням втрат у трансмісії

Розрахунок потужності, яка необхідна для забезпечення роботи змішувача, базується на зв'язку між моментом, що прикладається до вала, та кутовою швидкістю його обертання. Основна формула для визначення потужності при обертovому русі має вигляд:

$$P = M \cdot \omega, \quad (2.41)$$

де  $P$  – потужність на валу, Вт ,

$M$  – момент, що діє на вал, Н·м.

Кутову швидкість  $\omega$  можна виразити через частоту обертання  $\omega$ :

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}. \quad (2.42)$$

Підставляючи це у загальну формулу, отримаємо:

$$P = M \cdot \frac{2\pi n}{60}. \quad (2.43)$$

Загальний підхід до врахування втрат полягає у введенні коефіцієнта корисної дії трансмісії, який позначається як  $\eta$ . Зв'язок між потужністю на вході в трансмісію і потужністю на виході (на валу змішувача) задається наступним чином:

$$P_{вих} = P_{вх} \cdot \eta, \quad (2.44)$$

де  $P_{вх}$  – потужність, що надходить на вхід трансмісії, Вт;

$P_{вих}$  – потужність на виході трансмісії (на валу змішувача), Вт;

$\eta$  – загальний коефіцієнт корисної дії трансмісії.

У разі, якщо трансмісія складається з декількох послідовно з'єднаних елементів, загальний ККД трансмісії визначається як добуток коефіцієнтів корисної дії кожного з елементів:

$$\eta_{заг} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \dots \cdot \eta_n, \quad (2.45)$$

де  $\eta_n$  – коефіцієнти корисної дії окремих компонентів передачі.

Якщо частота обертання змінюється в передачі, то окрім втрат необхідно врахувати і передавальне число трансмісії  $i$ , що змінює як кутову швидкість, так і момент:

$$\omega_{вал} = \frac{\omega_{двигун}}{i}, \quad (2.46)$$

$$M_{вал} = M_{двигун} \cdot i \cdot \eta_{заг}. \quad (2.47)$$

Момент інерції враховується у випадку нестаціонарного режиму, тобто при розгоні чи гальмуванні:

$$M_{інерц} = J_{сум} \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (2.48)$$

де  $J_{сум}$  – сумарний момент інерції всіх обертових мас, кг·м<sup>2</sup>;

$\frac{d\omega}{dt}$  – кутове прискорення, рад/с<sup>2</sup>.

Момент тертя в підшипниках та опорах моделюється як:

$$M_{\text{тертя}} = f_{\text{тр}} \cdot N \cdot r_{\text{опори}}, \quad (2.49)$$

де  $f_{\text{тр}}$  – коефіцієнт тертя в підшипниках;

$N$  – нормальна сила навантаження на опору, Н;

$r_{\text{опори}}$  – радіус дії сили в опорі, м.

Основне рівняння динамічної рівноваги моментів на валу має вигляд:

$$M_{\text{двигун}} \cdot \eta_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^n M_{\text{лоп},i} + M_{\text{інерц}} + M_{\text{тертя}}. \quad (2.50)$$

Отримані залежності дозволяють визначити необхідну потужність привода з урахуванням передавального числа, втрат у трансмісії, моментів інерції та сил тертя. Урахування зазначених чинників дає можливість більш обґрунтовано оцінити навантаження на елементи привідної системи та виконати подальші розрахунки режимів роботи розчинозмішувача.

## 2.4 Стохастична модель процесу змішування

### 2.4.1 Формалізація просторової структури змішувача та початкового розподілу компонентів

У рамках побудови стохастичної моделі процесу змішування в розчинозмішувачі необхідним етапом є формалізація внутрішнього простору барабана. Основна мета цієї формалізації полягає у можливості дискретного представлення об'єму змішувача як системи комірок, кожна з яких є елементарною зоною, що може містити певну кількість матеріалу, і в яку з певною ймовірністю можуть переміщуватися частинки з інших зон.

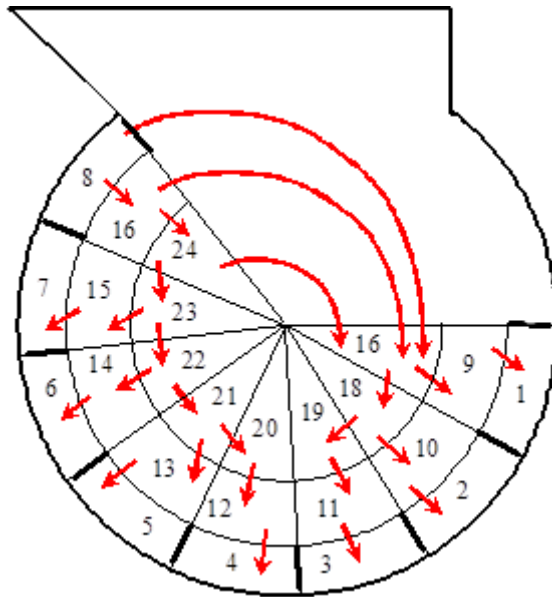


Рисунок 2.4 – Схема поперечного перерізу змішувача з комірками

Враховуючи геометричну форму барабана, його зручно розбити на кілька сегментів по довжині (вздовж осі) та по колу. Для спрощення математичної моделі та забезпечення симетрії обертання у цій роботі приймається умовне розбиття змішувального простору на 24 рівноцінні комірки, що охоплюють увесь внутрішній об'єм барабана.

Кожна комірка позначається індексом  $i \in \{1, 2, \dots, 24\}$ . При цьому комірки вважаються елементарними одиницями простору, в яких може зберігатись певна частка розчину.

Весь стан змішувача в певний момент часу описується вектором розподілу компоненту по комірках:

$$E(t) = \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ \vdots \\ e_{24}(t) \end{bmatrix}, \quad (2.51)$$

де  $e_i(t)$  – відносна кількість розчину, що міститься в комірці  $i$  на момент часу  $t$ .

Нормування вектора розподілу накладає умову збереження загальної маси розчину в системі:

$$\sum_{i=1}^{24} e_i(t) = 1. \quad (2.52)$$

Це означає, що весь об'єм розчину залишається в системі й лише переміщується між комірками. Відповідно, на кожному оберті барабана модель описує, яка частина розчину переходить із кожної комірки в інші, і з якою ймовірністю.

Кожна комірка пов'язана з кількома сусідніми комірками. У нашій просторовій моделі сусідство визначається структурою потоку всередині змішувача – за рахунок гвинтових лопаток матеріал рухається поступально-вздовжньо та радіально-поперечно, а отже, зв'язки між комірками не є рівновіддаленими. Матеріал з комірки 1 може потрапити до комірок 2, 3, 4 або 5 з різними ймовірностями, залежно від форми лопаток, напрямку обертання та швидкості руху [80].

У змішувачі перемішування відбувається під впливом геометрії гвинтових лопаток, сили тяжіння, інерційних сил та зсувних деформацій, що формуються при обертанні барабана. Ці чинники зумовлюють напрямки, інтенсивність і зв'язки між просторовими зонами, які можна розбити на комірки.

Основний рух частинок у барабані відбувається у трьох напрямках:

1. Осьовий – уздовж довжини барабана. Такий рух створюється за рахунок гвинтових лопаток, які виконують функцію шнека, переміщуючи частки суміші від однієї сторони барабана до іншої.

2. Тангенціальний (по колу) – навколо осі обертання. Він утворюється безпосередньо за рахунок обертання барабана, коли матеріал рухається по коловій траєкторії.

3. Радіальний – у напрямку від центра до периферії і навпаки. Такий рух зазвичай є наслідком інерції частинок, відштовхування від лопаток та сили тяжіння при падінні матеріалу в порожнинах між лопатками.

Початковий стан системи описується через вектор  $E_0$ , де кожен елемент вектора  $e_i(0)$  відображає відносну частку розчину, що міститься в комірці і на момент часу  $t=0$ .

Початковий розподіл розчину залежить від кількох факторів, таких як метод подачі матеріалу в змішувач, геометрія і конфігурація лопаток, а також інші технологічні параметри. У загальному випадку, для зручності моделювання, припускається, що розчин у момент початку роботи змішувача подається нерівномірно по комірках, з більшою концентрацією в декількох зонах барабана [81].

Для спрощення і математичного опису початковий розподіл можна записати у вигляді вектора  $E_0$ , елементи якого мають значення, що відповідають частці розчину в кожній комірці змішувача. Припустимо, що 20% розчину припадає на перші 5 комірок, а решта рівномірно розподіляється на наступні комірки:

$$E_0 = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.2 \\ 0.2 \\ 0.2 \\ 0.2 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.53)$$

У цьому випадку  $e_1(0) = e_2(0) = e_3(0) = e_4(0) = e_5(0) = 0.2$ , а всі інші значення вектора  $e_i(0)$  дорівнюють нулю. Це умовний початковий стан, який забезпечує концентрацію розчину в перших п'яти комірках.

У цьому випадку розчин початково розподілений по всьому барабану, але з більшою концентрацією в деяких зонах, що може бути характерним для більш складних технологічних умов.

Ймовірність потрапляння розчину в певну комірку залежить від геометрії та положення лопаток, які мають здатність переміщувати матеріал через радіальні та осьові компоненти потоку. Коли лопатки розташовані по спіралі або

в інших геометричних формах, деякі частини змішувача можуть отримувати більшу кількість матеріалу з початку подачі, а інші – залишатимуться майже порожніми, що зумовлює нерівномірне розподілення компонента.

В залежності від геометрії і типу лопаток розподіл розчину може бути більш рівномірним або сильно зосередженим у певних зонах. У таких випадках вектор початкового стану може бути наступним:

$$E_0 = \begin{bmatrix} 0.15 \\ 0.1 \\ 0.1 \\ 0.1 \\ 0.1 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ 0.05 \\ 0.05 \end{bmatrix} . \quad (2.54)$$

Тому початковий розподіл  $E_0$  є лише першою апроксимацією, що характеризує початкову умову для моделювання. Від цього стану система буде

еволюціонувати за рахунок переміщення розчину між комірками, що відображається в переходах, описаних у матриці переходів  $N$ , що є основою для подальшого використання стохастичної моделі змішування.

Крім того, у змішувачах примусового типу, завдяки геометрії гвинтових лопаток, переміщення матеріалу в осьовому напрямку відбувається поступово. Це означає, що одразу після завантаження розчин практично не перемішується по всій довжині барабана – він зосереджений локально. З точки зору стохастичної моделі, така концентрація матеріалу у кількох початкових комірках створює максимальний градієнт розподілу, і дає змогу дослідити ефективність змішування як процесу згладжування цього градієнта через багаторазові переходи часток між комірками.

Саме нерівномірність на початковому етапі є головною причиною невисокої однорідності суміші, якщо процес змішування недостатній за часом. Таким чином, вибір такої умови дозволяє проаналізувати, скільки обертів змішувача потрібно, щоб розподіл розчину по комірках наблизився до рівномірного, тобто:

$$e_1(t) \approx e_2(t) \approx \dots \approx e_{24}(t) \approx \frac{1}{24}. \quad (2.55)$$

Окрім суто фізичних міркувань, вибір нерівномірного початкового розподілу мотивується також чисельно-моделювальними цілями. Він створює найгірший сценарій із точки зору перемішування, що дає можливість протестувати модель у складних умовах. Якщо при такій умові система показує ефективне вирівнювання розподілу за певну кількість кроків, можна стверджувати, що при більш рівномірному початковому розподілі змішування буде ще ефективнішим.

#### 2.4.2 Побудова матриці ймовірностей переходів між комірками

Фізична суть переходів у моделі пов'язана з локальними зрушеннями маси під дією обертального руху. Частинки розчину зміщуються у найближчі зони

внаслідок штовхального ефекту лопаток, гравітаційного просідання та зсувних напружень. Саме тому модель передбачає локальність переходів – з кожної комірки частки можуть переходити лише в сусідні (комірки  $i-1$  та  $i+1$ ) або залишатися в тій самій  $i$ . Це означає, що матриця переходів має стрічкову, або трьохдіагональну структуру, де ненульовими є лише елементи на головній діагоналі та поряд із нею [82].

Позначимо такі ймовірності переходу як:

–  $p = P_{i-1,i}$  – ймовірність переходу в попередню комірку (рух назад),

–  $q = P_{i,i}$  – ймовірність залишитись у поточній комірці (без переміщення),

–  $r = P_{i+1,i}$  – ймовірність переходу в наступну комірку (рух вперед).

Для збереження нормованості системи, сума ймовірностей для кожної комірки повинна дорівнювати одиниці:

$$p + q + r = 1. \quad (2.56)$$

З фізичної точки зору, це означає, що вся маса розчину з кожної комірки на кожному такті розподіляється між трьома станами: залишок, перехід назад, перехід вперед. Це обмеження визначає стохастичність матриці переходів  $N$ , тобто:

$$\sum_{i=1}^n N_{ij} = 1 \quad \forall j, \quad (2.57)$$

де  $n$  – кількість комірок,

$N_{ij}$  – ймовірність переходу з комірки  $j$  у комірку  $i$ .

У конструкціях зі спрямованими гвинтовими лопатками, які створюють осьовий потік матеріалу, ймовірності переходів будуть асиметричними. Це означає:

$$p \neq r, \quad q = 1 - p - r. \quad (2.58)$$

Якщо гвинтові лопатки штовхають суміш переважно вперед, то  $r > p$ , і розчин швидше просувається у напрямку осі барабана. Така ситуація призводить до несиметричної матриці  $N$ , що забезпечує швидше досягнення рівномірності в

одному напрямку, але може створювати зони накопичення матеріалу в інших частинах об'єму [83].

Після просування в один кінець барабана суміш, під дією обертання та спрямованих потоків, знову повертається до початкової частини об'єму. Таке повторне перемішування може відбуватись як через складну циркуляцію, так і через завихрення в закритому корпусі. Тому для моделі доцільно вважати, що після досягнення останньої комірки ( $i=24$ ) частина розчину повертається у першу комірку ( $i=1$ ), і навпаки.

Періодичні умови означають, що матеріал з останньої комірки може переходити в першу і навпаки – модель замкнена по циклу.

Це формалізується наступним чином:

$$P_{1,n} = p, \quad P_{n,1} = r, \quad (2.59)$$

тобто ймовірність переходу з останньої комірки  $j = n$  у першу  $i=1$  дорівнює  $p$ , а з першої у останню –  $r$ . Якщо матриця має симетричну стрічкову структуру, і  $p=r$ , то крайові елементи мають однакову вагу, і модель дійсно є циклічною. У такій реалізації модель забезпечує замкнений ланцюг станів, який не має кінця і початку, що ідеально підходить для моделювання безперервного перемішування в обмеженому об'ємі.

Це означає, що для комірки  $j=n$ :

$$N_{n,n} = q, \quad N_{n-1,n} = p, \quad N_{1,n} = r. \quad (2.60)$$

Вибір коефіцієнтів ймовірностей переходу  $p$ ,  $q$ ,  $r$  – дають змогу визначити динаміку розподілу матеріалу всередині барабана змішувача, і кожен із них має чітке фізичне трактування. Тобто:

–  $p = P_{i-1,i}$  – ймовірність переходу частки розчину з комірки  $i$  у попередню комірку  $i-1$  (рух назад),

–  $q = P_{i,i}$  – ймовірність залишитися в тій самій комірці,

–  $r = P_{i+1,i}$  – ймовірність переходу в наступну комірку  $i+1$  (рух вперед).

Для збереження маси в системі виконується нормувальна умова:

$$p + q + r = 1. \quad (2.61)$$

Ці коефіцієнти моделюють ступінь взаємодії між частками суміші та характеризують фізичну рухомість системи. Відповідно, їх вибір повинен базуватись на реологічних властивостях середовища, що змішується, а саме: густині, в'язкості, структурній міцності тощо. У загальному випадку коефіцієнти залежать від типу суміші, швидкості обертання барабана, форми та кута нахилу лопаток, наявності додаткових вібрацій або осциляцій, однак у межах аналітичної моделі вони можуть бути представлені як узагальнені параметри, що характеризують інтенсивність змішування.

Для сухих, сипких матеріалів, які мають малу в'язкість і низьке міжчасткове зчеплення, характерна висока мобільність. Такі суміші легко переміщуються від лопаток, тому значна частина маси змінює положення в просторі з кожним обертом. Для таких умов доцільно використовувати такі коефіцієнти:

$$p = 0.35, \quad q = 0.3, \quad r = 0.35. \quad (2.62)$$

Тобто понад 70% матеріалу переміщується між комірками, і лише 30% залишається в поточному об'ємі. Це відповідає активному змішуванню з високою швидкістю наближення до рівномірного розподілу. При моделюванні таких умов коефіцієнт варіації  $K_{var}$  знижується експоненційно вже протягом перших 10–15 ітерацій.

Для вологих розчинів, які містять воду та мають підвищену в'язкість і густину, переміщення компонентів ускладнюється. Частки мають тенденцію утримуватись у своїй області, особливо за наявності глинистих або дрібнодисперсних фракцій. У такому випадку переважає залишкова ймовірність  $q$ , і модель стає менш динамічною. Для такого типу середовища типові значення:

$$p = 0.25, \quad q = 0.5, \quad r = 0.25. \quad (2.63)$$

Тобто лише половина маси переміщується, а інша залишається в поточній комірці. Це призводить до повільнішого зменшення варіації, і модель вимагає більшу кількість обертів, щоби досягти статистичної рівномірності.

Для тиксотропних або структурованих середовищ, властива нелінійна реакція на зусилля: у стані спокою такі суміші ведуть себе як тверді, але під дією

обертання – «розріджуються». У таких випадках коефіцієнти переходів повинні залежати від номера ітерації  $t$ , тобто мати вигляд:

$$q(t) = q_0 \cdot e^{-kt}, \quad p(t) = r(t) = \frac{1 - q(t)}{2}, \quad (2.64)$$

де  $q_0$  – початкова в'язкість,

$k$  – тиксотропна чутливість.

На початку процесу  $q$  є великим (суміш не рухається), але з кожним обортом зменшується, і система поступово переходить у режим активного змішування. Це потребує реалізації адаптивної матриці  $N_t$ , яка оновлюється на кожному кроці.

Коефіцієнти  $p$ ,  $q$ ,  $r$  можуть також бути асиметричними, якщо форма лопаток або рух робочого органу створює напрямлений потік. Тому у змішувачах з гвинтовими лопатками:

$$p = 0.2, \quad q = 0.4, \quad r = 0.4, \quad (2.65)$$

що відображає переважний рух розчину вперед по осі барабана. Така асиметрія сприяє транспортуванню матеріалу та прискорює змішування в одному напрямку, що важливо при моделюванні конструкцій із подачею в одну сторону.

Матриця переходів  $N$  формалізує логіку переміщення компонентів суміші у просторі змішувача, відображаючи, з якою ймовірністю частинки з однієї комірки потрапляють у сусідні під час одного оборту барабана.

Отже:

$$N = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & \cdots & N_{1n} \\ N_{21} & N_{22} & \cdots & N_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{n1} & N_{n2} & \cdots & N_{nn} \end{bmatrix}, \quad (2.66)$$

де  $N$  – квадратна матриця розмірності  $n \times n$ .

Кожен елемент  $N_{ij}$  описує ймовірність того, що частина матеріалу з комірки  $j$  потрапить у комірку  $i$  за один оберт змішувача. Важливою умовою є те, що сума ймовірностей у кожному стовпці матриці дорівнює одиниці, тобто:

$$\sum_{i=1}^n N_{ij} = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, n\}. \quad (2.67)$$

Це відображає принцип збереження маси компоненту: увесь матеріал з комірки  $j$  повинен залишитись у системі, але може частково перейти в інші комірки, включно із залишком у самій  $j$ -тій.

Побудова матриці  $N$  базується на фізичних принципах переміщення матеріалу у змішувачі. У нашій моделі передбачається, що з кожної комірки частинки розчину можуть переходити в сусідні, а також залишатися частково на місці. Це відповідає структурі локального змішування, де за один оберт матеріал зміщується незначно. Наприклад, з комірки  $j$  матеріал розподіляється таким чином:

- частина  $p \rightarrow$  у комірку  $j-1$ ,
- частина  $q \rightarrow$  залишається в комірці  $j$ ,
- частина  $r \rightarrow$  переходить у комірку  $j+1$ ,

де  $p+q+r=1$ . Зазвичай приймають рівномірні значення  $p=r=0.25$ ,  $q=0.5$  – це відповідає тому, що лише 50% матеріалу зміщується, а решта залишається.

У такому разі структура кожного стовпця матриці буде триелементною: кожна комірка передає частини матеріалу у дві сусідні з нею та залишає частину в собі. Таким чином, матриця  $N$  має вигляд трьохдіагональної (стрічкової) стохастичної матриці, яка моделює локальне перемішування. Для прикладу, комірка  $j=5$  матиме такі переходи:

$$N_{4,5} = 0.25, \quad N_{5,5} = 0.5, \quad N_{6,5} = 0.25. \quad (2.68)$$

Важливо зазначити, що оскільки барабан має циклічну геометрію, то остання комірка пов'язана з першою, і навпаки. Тобто:

$$N_{1,24} = 0.25, \quad N_{24,1} = 0.25. \quad (2.69)$$

Таким чином, матриця переходів має періодичні граничні умови, які дозволяють коректно змоделювати циклічний характер обертання змішувача. У випадку, коли перемішування має переважний напрямок, ймовірності можуть бути асиметричними:  $p = 0.3$ ,  $r = 0.2$ ,  $q = 0.5$  – тоді більше маси переміщується в одному напрямку.

Загальна структура матриці виглядає як розріджена, діагонально домінантна матриця, що відображає локальний характер перемішування. Загальний вигляд для кількох перших рядків та стовпців матриці виглядатиме так:

$$N = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.25 & 0 & \dots & 0 & 0.25 \\ 0.25 & 0.5 & 0.25 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0.25 & 0.5 & 0.25 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0.25 & 0 & 0 & \dots & 0.25 & 0.5 \end{bmatrix}. \quad (2.70)$$

Ця структура зберігає масу, відображає реальні зв'язки між комірками та дозволяє легко виконувати множення  $E_{t+1} = N \cdot E_t$  для кожного наступного кроку моделювання.

### 2.4.3 Побудова матриці переходів для конкретного випадку

Матриця  $N \in R^{24 \times 24}$  є стохастичною (сумарна ймовірність для кожної комірки дорівнює одиниці), стрічковою (трьохдіагональною) та періодичною (граничні комірки з'єднані між собою). Принцип її заповнення ґрунтується на тому, що з кожної комірки  $j \in \{1, 2, \dots, 24\}$  частки розчину можуть:

- залишитися в тій самій комірці з імовірністю  $q$ ,
- перейти у попередню комірку  $i=j-1$  з імовірністю  $p$ ,
- перейти в наступну комірку  $i=j+1$  з імовірністю  $r$ .

Оскільки реалізація періодичних граничних умов, для крайових комірок  $j=1$  та  $j=24$  індекси циклічно замикаються:

- якщо  $j=1$ , то  $j-1=24$ ;
- якщо  $j=24$ , то  $j+1=1$ .

Це гарантує, що модель не має «мертвих» крайових станів і відповідає фізичній картині безперервного рециркуляційного перемішування.

Загальна формула для заповнення матриці:

$$N_{i,j} = \begin{cases} p, & \text{якщо } i = (j-1+n) \pmod n; \\ q, & \text{якщо } i = j; \\ r, & \text{якщо } i = (j+1) \pmod n; \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (2.71)$$

де  $\pmod n$  – операція взяття залишку по  $n$ , яка забезпечує правильне з'єднання індексів на краях.

Для комірки  $j=1$ :

$$- i=24: N_{24,1} = p$$

$$- i=1: N_{1,1} = q$$

$$- i=2: N_{2,1} = r$$

Для комірки  $j=24$ :

$$- i=23: N_{23,24} = p$$

$$- i=24: N_{24,24} = q$$

$$- i=1: N_{1,24} = r$$

Решта елементів у стовпцях 1 і 24 дорівнюють нулю, як і в усіх інших комірках поза локальними переходами. Аналогічно заповнюються всі проміжні стовпці  $j$ , для яких переходи реалізуються у три комірки – попередню, поточну та наступну.

Для цього конкретного випадку, можна використати такі значення коефіцієнтів:

$$p = 0.3, \quad q = 0.4, \quad r = 0.3. \quad (2.72)$$

Ці значення відповідають ізотропному змішуванню із сильно вираженою локальністю. З урахуванням  $n=24$ , матриця  $N$  матиме 24 рядки і 24 стовпці, з яких кожен стовець міститиме лише три ненульові значення, які відповідають коефіцієнтам  $p$ ,  $q$ ,  $r$ .

У результаті формується розріджена матриця переходів, у якій переважна частина елементів набуває нульових значень. Для наочності подальшого викладення нижче наведено фрагмент матриці, що включає перші п'ять рядків і стовпців з урахуванням періодичних переходів між граничними комірками. У

подальшому коефіцієнти переходів прийнято позначати відповідно:  $P - p$ ,  $Q - q$ ,  $R - r$ , а нульові елементи матриці позначаються як відсутність переходу між відповідними станами.

Таблиця 2.1 Таблиця переходів матриці

	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$	$j=6$	$j=7$	$j=8$	$j=9$	$j=10$	$j=11$	$j=12$	$j=13$	$j=14$	$j=15$	$j=16$	$j=17$	$j=18$	$j=19$	$j=20$	$j=21$	$j=22$	$j=23$	$j=24$	
$i=1$	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	
$i=2$	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=3$	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=4$	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=5$	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=6$	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=7$	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=8$	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=9$	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=10$	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=11$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=12$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=13$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=14$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=15$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=16$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0
$i=17$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0	0
$i=18$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0	0
$i=19$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0	0
$i=20$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0	0
$i=21$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0	0
$i=22$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0	0
$i=23$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	0,3	0
$i=24$	0,3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,4	

У цьому фрагменті видно, як елементи  $p$ ,  $q$ ,  $r$  з'являються на головній діагоналі та сусідніх діагоналях. Перший стовпець ( $j=1$ ) має значення:

- $N_{24,1} = p$  – перехід із  $j=1$  у  $i=24$  (періодичний),
- $N_{1,1} = q$  – залишок у комірці,
- $N_{2,1} = r$  – перехід у наступну комірку.

Для внутрішніх комірок (наприклад,  $j=12$ ) заповнення буде класичним:

- $N_{11,12} = p$ ,
- $N_{12,12} = q$ ,
- $N_{13,12} = r$ .

#### 2.4.4 Адаптація матриці до змінних умов змішування

У звичайній, стаціонарній стохастичній моделі припускається, що матриця переходів  $N$  є сталою в часі, тобто для всіх  $t \in N$ :

$$N_t = N \quad \forall t. \quad (2.73)$$

Однак у випадку зміни властивостей матеріалу, доцільно перейти до нестаціонарної моделі, в якій матриця переходів є функцією ітерації  $t$ . Це означає, що:

$$N_t = f(t), \quad (2.74)$$

де  $N_t$  оновлюється на кожному кроці.

У моделі адаптації тиксотропного середовища, у якому з часом зменшується опір змішуванню, і відповідно зростає мобільність часток початково велика ймовірність залишитись у своїй комірці ( $q(t)$ ) поступово зменшується, а ймовірності переходів  $p(t)$ ,  $r(t)$  – зростають. Формально це описується рівняннями:

$$q(t) = q_0 \cdot e^{-kt}, \quad p(t) = r(t) = \frac{1 - q(t)}{2}, \quad (2.75)$$

де  $t$  – номер ітерації (оберт барабана).

Цей підхід дозволяє формувати на кожному такті свою матрицю  $N_t$ , у якій з кожним кроком частки цементу отримують все більшу свободу переміщення. Що повністю відповідає фізичному змісту: спочатку цемент є в'язким і погано

перемішується, однак з часом внаслідок дії гвинтових лопаток він стає більш текучим і здатен ефективно перемішуватись по всьому об'єму змішувача [84].

Як приклад, при  $q_0=0.9$  і  $k=0.1$ , значення  $q(t)$  на перших кроках будуть:

$$\begin{aligned} q(0) &= 0.9, \\ q(1) &= 0.9 \cdot e^{-0.1} \approx 0.814, \\ q(5) &= 0.9 \cdot e^{-0.5} \approx 0.546, \\ q(10) &= 0.9 \cdot e^{-1.0} \approx 0.331. \end{aligned} \tag{2.76}$$

Відповідно,  $p(t) = r(t) = (1 - q(t)) / 2$  на кроках 0, 5, 10 зростають від  $\approx 0.05$  до  $\approx 0.33$ , тобто система змінює характер з "нерухомої" до майже повністю мобільної.

У цьому випадку матриця переходів набуває вигляду:

$$N_t = \begin{bmatrix} q(t) & p(t) & 0 & \dots & r(t) \\ r(t) & q(t) & p(t) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ p(t) & 0 & \dots & r(t) & q(t) \end{bmatrix}. \tag{2.77}$$

з динамічно змінними значеннями в кожному такті. У програмній реалізації це означає, що перед кожною ітерацією  $E_{t+1} = N_t \cdot E_t$  матриця  $N_t$  оновлюється відповідно до нового значення  $t$ .

## 2.5 Аналіз динаміки процесу змішування

### 2.5.1 Аналіз адаптивного стану системи

Адаптивна система в цьому контексті описується не сталою матрицею  $N$ , а послідовністю матриць  $N_0, N_1, N_2, \dots, N_t$ , де кожна з них є стохастичною, але має часозалежні коефіцієнти переходів. Загальна формула стохастичного оновлення стану системи набуває вигляду:

$$E_{t+1} = N_t \cdot E_t, \tag{2.78}$$

де  $E_t \in R^n$  – вектор розподілу цементу по  $n$  комірках у момент часу  $t$ ,

$N_t \in R^{n \times n}$  – матриця ймовірностей переходу для цього ж моменту часу.

На відміну від класичної моделі, де:

$$E_{t+1} = N \cdot E_t, \quad \text{де } N = \text{const}, \quad (2.79)$$

адаптивна модель враховує зміну реологічних властивостей розчину, динаміку лопаток, зміни в потужності або частоті обертів, що зумовлює зміну ефективності перемішування з часом [85].

Найбільш поширеним і фізично обґрунтованим варіантом є опис цих залежностей через експоненційну функцію згасання для  $q(t)$ :

$$q(t) = q_0 \cdot e^{-kt}. \quad (2.80)$$

Оскільки сумарна ймовірність має залишатись сталою, тобто:

$$p(t) + q(t) + r(t) = 1, \quad (2.81)$$

і приймається симетрія між переходами вліво та вправо ( $p(t)=r(t)$ ), то:

$$p(t) = r(t) = \frac{1 - q(t)}{2}. \quad (2.82)$$

Таким чином, для кожного кроку  $t$  можемо записати повну систему:

$$\begin{cases} q(t) = q_0 \cdot e^{-kt}, \\ p(t) = \frac{1 - q(t)}{2}, \\ r(t) = \frac{1 - q(t)}{2}. \end{cases} \quad (2.83)$$

Ці функції мають природну фізичну інтерпретацію. Спочатку, при  $t=0$ ,  $q(0) = q_0$ , і  $p(0) = r(0) = \frac{1 - q_0}{2}$ , тобто перемішування майже не відбувається – частинки залишаються в тих зонах, де були розміщені. Проте з кожною наступною ітерацією  $q(t)$  зменшується, а  $p(t)$ ,  $r(t)$  зростають, що означає активізацію змішування. Наприклад, при  $q_0=0.9$  і  $k=0.1$ , отримаємо:

- $t=0$ :  $q=0.9$ ,  $p=r=0.05$  – слабке перемішування
- $t=5$ :  $q \approx 0.55$ ,  $p=r \approx 0.225$  – активне перемішування
- $t=10$ :  $q \approx 0.33$ ,  $p=r \approx 0.335$  – майже рівномірне

Таким чином, на 10-му оберті система переходить у майже симетричний режим, у якому ймовірності переходу в кожному напрямку (вліво, на місці, вправо) близькі до третини. Цей режим можна інтерпретувати як наближення до умовної стаціонарності, коли перемішування відбувається максимально інтенсивно, а в'язкість уже не перешкоджає розподілу частинок.

Графічне представлення залежностей  $q(t)$ ,  $p(t)$ ,  $r(t)$  демонструє експоненційну динаміку процесу адаптації. Такий підхід дозволяє моделі враховувати складні внутрішні процеси у матеріалі, не порушуючи при цьому математичної структури стохастичної моделі. Кожна з матриць  $N_t$ , що формується на основі цих коефіцієнтів, залишається стохастичною, трьохдіагональною, періодичною і локальною – всі ті властивості, які забезпечують її збіжність, фізичну реалістичність та обчислювальну ефективність.

Ця експоненційна залежність описує фізичне явище тиксотропії: на початку процесу матеріал є дуже в'язким, частинки майже не переміщуються (велике  $q$ ), але з кожним новим обертом валу матеріал "розганяється", ймовірності перемішування зростають, а  $q(t)$  експоненційно зменшується.

У матричній формі адаптивна система виглядає так:

$$N_t = \begin{bmatrix} q(t) & p(t) & 0 & \dots & r(t) \\ r(t) & q(t) & p(t) & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ p(t) & 0 & \dots & r(t) & q(t) \end{bmatrix}. \quad (2.84)$$

З урахуванням періодичних граничних умов: крайні комірки замикаються в кільце. Кожна матриця  $N_t$  зберігає властивості стохастичності (сума кожного стовпця дорівнює 1), але відрізняється від попередньої за значеннями елементів.

Адаптивна модель не має класичного стаціонарного розв'язку виду  $N \cdot \pi = \pi$ , оскільки матриця змінюється на кожному кроці. Замість цього, досліджується слабка збіжність системи: чи прямує вона з часом до розподілу, у якому коливання концентрацій стають незначними.

З точки зору фізики, тиксотропія є наслідком розриву міжчасткових структур під дією зсувних деформацій. При цьому в'язкість можна умовно уявити як функцію часу:

$$\eta(t) = \eta_0 \cdot e^{-kt}, \quad (2.85)$$

де  $\eta_0$  – початкова ефективна в'язкість, що пропорційна коефіцієнту  $q_0$ . Зменшення  $\eta(t)$  з часом пояснює, чому ймовірність залишитися на місці ( $q(t)$ ) зменшується: менша в'язкість  $\rightarrow$  менший опір переміщенню  $\rightarrow$  вища мобільність частинок  $\rightarrow$  активніше змішування.

Цей перехід до більш рівноважного змішувального режиму свідчить про ефективність тиксотропного ефекту: з кожним обертом частинки набувають більшої мобільності, а ймовірності переміщення вирівнюються.

Інтерпретація коефіцієнтів через тиксотропію також дає змогу формувати інженерні рекомендації: наприклад, у системах з високою початковою в'язкістю доцільно передбачити період "розгону" змішувача – тобто не очікувати однорідності на перших 5–10 обертах. Крім того, розрахунок коефіцієнта  $k$  на основі експериментальних даних (наприклад, шляхом апроксимації зміни  $K_{var}(t)$ ) може дати кількісну оцінку тиксотропності конкретної суміші [86].

На початковому етапі змішування (крок  $t=0$ ), вектор  $E_0$  має сильно нерівномірний вигляд. Наприклад, якщо цемент подається у перші п'ять комірок із 24, то:

$$E_0 = [1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, \dots, 0]^T, \quad (2.86)$$

де перші п'ять значень мають максимальну концентрацію, а решта – нульові. Такий вектор свідчить про максимальну неоднорідність, а відповідний коефіцієнт варіації  $K_{var}(0)$  буде найбільшим.

На наступних ітераціях під дією гвинтових лопаток та змінних коефіцієнтів переходів у матриці ймовірностей відбувається поступове вирівнювання просторового розподілу компонентів суміші. Зокрема, вже на ітерації  $t=1$  частина цементу з початково локалізованих зон переміщується до сусідніх комірок, що призводить до початкового згладжування концентраційного

профілю. На ітерації  $t=5$  спостерігається подальше поширення компонентів у напрямку від центральної області до віддаленіших зон змішувача, внаслідок чого формується розподіл із поступовим зменшенням концентрації від центру до периферії. На ітерації  $t=10$  відбувається суттєве вирівнювання концентраційного поля, за якого значення в більшості комірок наближаються до середнього рівня, хоча окремі локальні відхилення ще зберігаються.

У перші ітерації модель показує лише незначне розмивання розподілу через домінування високої ймовірності залишитися на місці ( $q(t) \rightarrow 0.9$ ). Але з кожним наступним кроком, у міру того як  $q(t)$  експоненційно зменшується, а  $p(t)$ ,  $r(t)$  зростають, все більше маси переходить у сусідні комірки. Таким чином, форма розподілу стає більш плавною, охоплює більшу частину простору і врешті наближається до рівномірного стану:

$$E_{\text{рівн}} \approx \left[ \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_t^{(j)} \right]_{1 \times n}. \quad (2.87)$$

Це означає, що всі значення концентрації в різних зонах прагнуть до одного і того ж рівня – розподіл стає умовно однорідним.

Для аналітичної оцінки ступеня однорідності доцільно використовувати коефіцієнт варіації:

$$K_{\text{вар}}(t) = \frac{\sigma_t}{\bar{E}_t}, \quad (2.88)$$

де  $\sigma_t$  – стандартне відхилення розподілу на кроці  $t$ ,

$\bar{E}_t$  – середнє значення концентрації.

Чим нижче  $K_{\text{вар}}(t)$ , тим більш однорідна суміш. Тенденція до вирівнювання проявляється як монотонне зменшення цього коефіцієнта, яке в кінцевому підсумку наближається до порогу.

Тобто, динамічне відстеження зміни розподілу концентрацій у часі та його оцінка за коефіцієнтом варіації дають змогу не лише кількісно описати процес змішування, а й оптимізувати його з практичної точки зору.

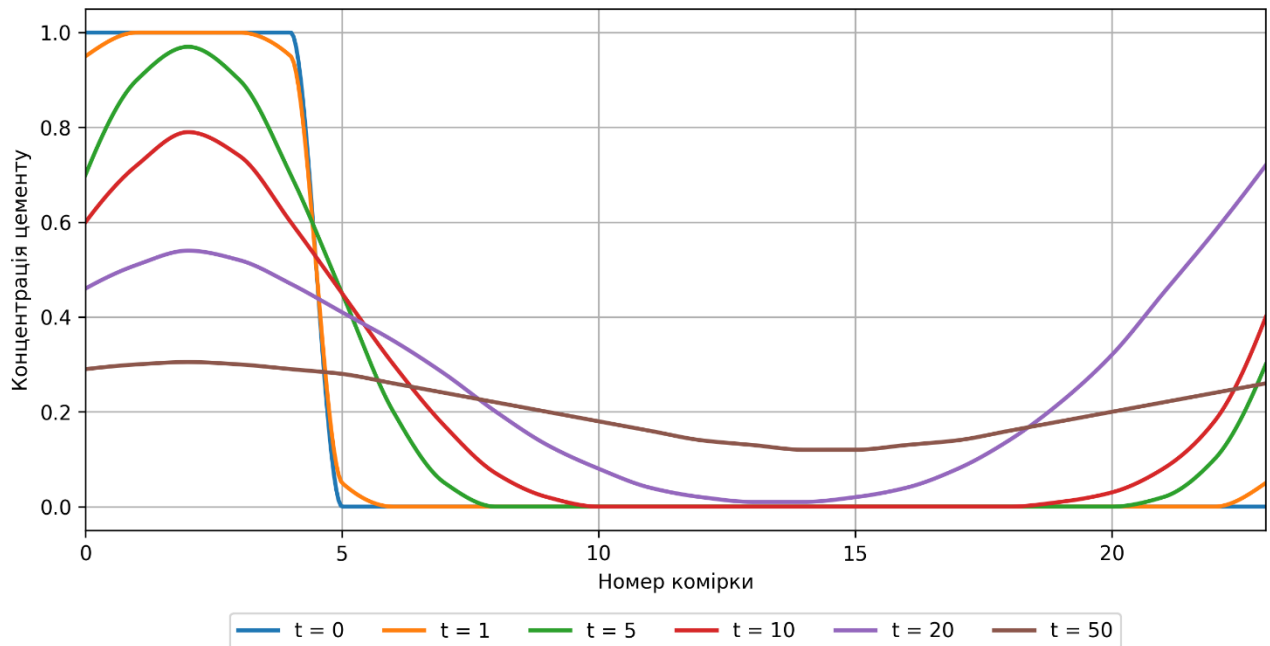


Рисунок 2.5 – Розподіл розчину по комірках на різних ітераціях

Графічно ця тенденція проілюстрована на рисунку 2.5, де наведено зміну розподілу концентрації цементу по комірках на різних ітераціях часу. На початковому кроці ( $t = 0$ ) видно різкий пік у перших п'яти комірках – це зона локалізованої подачі матеріалу. Із кожним наступним кроком розподіл стає плавнішим і ширшим: на  $t = 5$  з'являється симетричний спад, на  $t = 10$ – $20$  – форма наближається до дзвоноподібної, а на  $t = 50$  – перетворюється на майже горизонтальну лінію. Це свідчить про досягнення умовної рівномірності суміші.

### 2.5.2 Динаміка переходів станів у часі

Матриця  $N_t \in R^{n \times n}$  будується згідно з трьохдіагональною стрічковою структурою з періодичними граничними умовами. Це означає, що переміщення можливе тільки:

- з комірки  $j$  у комірку  $j$  (залишитись на місці) з імовірністю  $q(t)$ ,
- з комірки  $j$  у сусідню зліва ( $j-1 \bmod n$ ) з імовірністю  $p(t)$ ,
- з комірки  $j$  у сусідню справа ( $j+1 \bmod n$ ) з імовірністю  $r(t)$ .

Таким чином, для кожного моменту часу  $t$  матриця має вигляд:

$$N_t = \begin{bmatrix} q(t) & p(t) & 0 & \dots & r(t) \\ r(t) & q(t) & p(t) & \dots & 0 \\ 0 & r(t) & q(t) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & p(t) \\ p(t) & 0 & \dots & r(t) & q(t) \end{bmatrix}. \quad (2.89)$$

Еволюція  $N_t$  не лише змінює поточне перемішування, а й впливає на швидкість збіжності системи до умовної однорідності. У перших кроках перемішування йде повільно – розподіл цементу  $E_t$  майже не змінюється, а коефіцієнт варіації  $K_{var}$  знижується повільно. Проте зі зростанням  $t$ , з кожною новою  $N_t$ , система "розганяється", і змішування стає дедалі ефективнішим. Це забезпечує нерівномірний, але прискорений перехід до однорідності.

На рисунку 2.6 зображено динаміку ймовірностей  $q(t)$ ,  $p(t)$ ,  $r(t)$ , які характеризують поведінку частинок цементної суміші в адаптивній стохастичній моделі змішування. Ймовірність  $q(t)$ , що відповідає за залишення частинки у своїй комірці, експоненціально зменшується внаслідок тиксотропного ефекту – втрати внутрішньої в'язкості матеріалу. Натомість ймовірності переходу в сусідні комірки  $p(t)$  та  $r(t)$  симетрично зростають. Це відображає поступовий перехід системи від інертного до активного режиму змішування. При  $t \rightarrow \infty$  усі три ймовірності наближаються до значення 0.33, що відповідає умовній ізотропії та максимально ефективному перемішуванню.

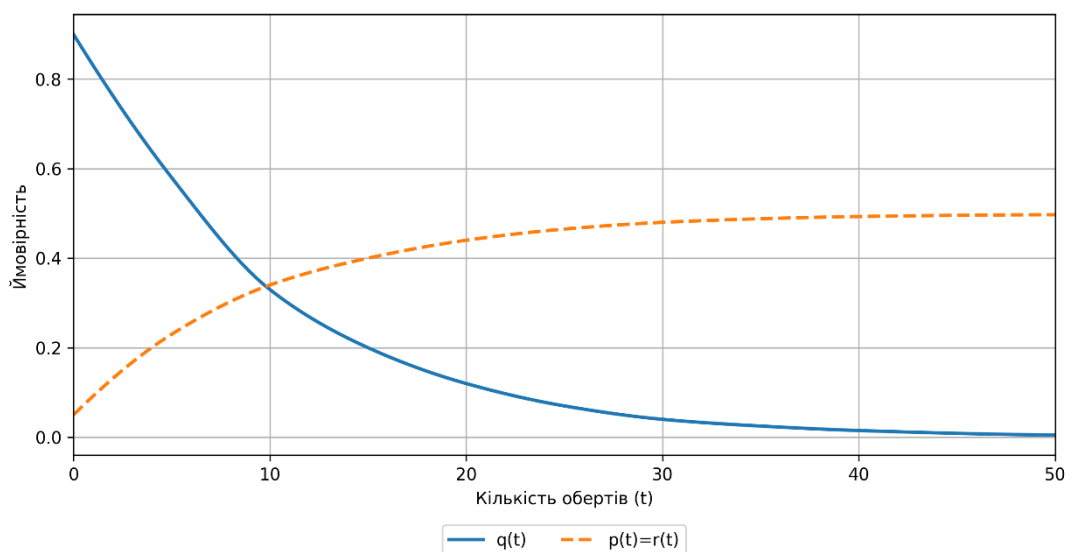


Рисунок 2.6 – Зміна ймовірностей  $q(t)$ ,  $p(t)$ ,  $r(t)$  у часі

На графіку 2.7 показано зменшення коефіцієнта варіації в часі, що відображає поступове зниження неоднорідності цементної суміші під дією адаптивного змішування. На початкових етапах процесу, коли в'язкість ще висока, частинки залишаються переважно в тих самих комірках, що зумовлює повільне зниження варіації. З часом, у міру зменшення  $q(t)$  і зростання  $p(t)$ ,  $r(t)$ , активність перемішування підвищується, і коефіцієнт варіації стрімко спадає. Це свідчить про прискорену збіжність до умовно однорідного стану, що відрізняє адаптивну модель від стаціонарної, де темп змішування лишається сталим.

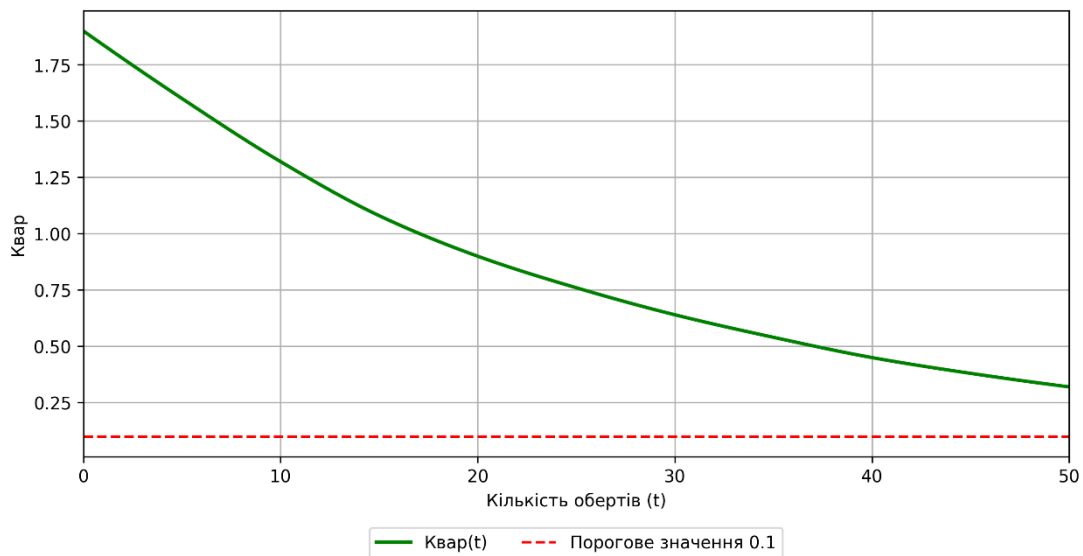


Рисунок 2.7 – Зміна коефіцієнта варіації

Еволюція станів змішування з часом у межах стохастичної моделі описується за допомогою базового рекурсивного рівняння, яке визначає, як змінюється розподіл компонентів суміші по комірках змішувача з кожним оборотом барабана змішувача, протягом якого розчин частково переміщується з одних комірок до інших згідно з імовірнісною структурою, закладеною в матрицю переходів  $N$ .

Основне рівняння стохастичної моделі має вигляд:

$$E_{t+1} = N \cdot E_t, \quad (2.90)$$

де  $E_t \in R^{n \times 1}$  – вектор стану системи в момент часу  $t$ , що відображає розподіл розчину по  $n$  комірках змішувача;

$E_{t+1} \in R^{n \times 1}$  – вектор стану після одного оберту барабана;

$N \in R^{n \times n}$  – матриця ймовірностей переходів, що описує можливості переміщення розчину між усіма комірками.

Це рівняння відображає принцип, згідно з яким стан системи на кожному новому кроці залежить лише від попереднього стану, а не від усієї історії змін – саме ця властивість називається стохастичною. Після кожного оберту змішувача розчин зміщується по внутрішньому об'єму змішувача у відповідності до фіксованих правил перемішування.

Починаючи з початкового стану  $E_0$ , який був сформований згідно з умовами завантаження матеріалу в змішувач, можна обчислювати стан системи після кожного наступного оберту за допомогою повторного множення:

$$\begin{aligned} E_1 &= N \cdot E_0, \\ E_2 &= N \cdot E_1 = N^2 \cdot E_0, \\ E_3 &= N \cdot E_2 = N^3 \cdot E_0. \end{aligned} \quad (2.91)$$

У загальному вигляді стан системи через  $t$  кроків можна виразити як:

$$E_t = N^t \cdot E_0. \quad (2.92)$$

Кожне таке множення відповідає одному повному оберту барабана, упродовж якого відбувається перемішування суміші завдяки обертанню робочого органу – лопаток, закріплених на валу.

Таким чином, між моделлю й фізичним процесом встановлюється прямий зв'язок:

$$t = n_{об}, \quad (2.93)$$

де  $t$  – кількість ітерацій у стохастичній моделі;

$n_{об}$  – кількість обертів вала змішувача.

Це співвідношення дозволяє оцінити, скільки саме обертів змішувача потрібно для досягнення бажаного розподілу розчину, тобто для досягнення однорідності суміші.

Окрім того, з урахуванням частоти обертання барабана  $f$ , можна встановити також зв'язок із часом змішування:

$$t_{\text{сек}} = \frac{60 \cdot t}{f}, \quad (2.94)$$

де  $t_{\text{сек}}$  – тривалість процесу змішування, с;

$f$  – частота обертання барабана, об/хв.

Рівняння ( $E_t = N^t \cdot E_0$ ) дозволяє аналітично або чисельно моделювати, як саме змінюється розподіл розчину у змішувачі з часом. Чим більшим є  $t$ , тим ближче розподіл  $E_t$  до стаціонарного, тобто такого, де всі елементи вектора стають приблизно рівними:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} E_t \approx \begin{bmatrix} \frac{1}{n} \\ \frac{1}{n} \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \end{bmatrix}. \quad (2.95)$$

З формального боку, матриця  $N$  повинна бути стохастичною, незвідною і примітивною. Це означає, що усі її стовпці (або рядки) сумуються до 1; для будь-якої пари комірок ( $i, j$ ) існує ненульова ймовірність переходу за скінчену кількість кроків; певний степінь матриці  $N^k$  має всі додатні елементи, що забезпечує збіжність до стаціонарного розподілу.

За таких умов модель набуває асимптотичної стійкості, тобто незалежно від початкового розподілу  $E_0$ , система з часом переходить до одного й того самого рівномірного стану, що відповідає досягненню однорідності суміші.

Аналіз динаміки процесу змішування у контексті стохастичної моделі дає змогу виявити, наскільки ефективно система досягає однорідного розподілу розчину в розчинозмішувачі в залежності від кількості обертів барабана. Головною метою такого аналізу є визначення оптимальної кількості обертів, яка забезпечує статистичну рівномірність розподілу, але без надмірного споживання енергії чи збільшення тривалості технологічного циклу. Іншими словами, мова йде про знаходження балансу між якістю змішування та ресурсами, що витрачаються [87].

Початково відомо, що розподіл розчину по комірках описується вектором  $E_t$ , який змінюється за формулою ( $E_t = N^t \cdot E_0$ ), де на кожному кроці розраховується коефіцієнт варіації ( $K_{\text{var}}(t) = \sqrt{n \sum_{i=1}^n \left( e_i(t) - \frac{1}{n} \right)^2}$ ).

Завдяки цьому можемо побудувати залежність  $K_{\text{var}} = f(t)$ , яка зазвичай має експоненційно спадний характер. Така крива дозволяє візуально спостерігати процес вирівнювання концентрацій розчину у змішувачі та визначити точку згладжування – момент, коли змішування більше не призводить до суттєвого покращення однорідності. Точка згладжування відповідає мінімально достатній кількості обертів:

$$t_{\text{opt}} = \min \left\{ t : K_{\text{var}}(t) \leq K_{\text{nor}} \right\}, \quad (2.96)$$

де  $K_{\text{nor}}$  – наперед задане допустиме значення коефіцієнта варіації (0,05).

Ця кількість обертів  $t_{\text{opt}}$  і є шуканим значенням – оптимальною кількістю обертів змішувача для заданої конструкції й умов процесу.

Варто відзначити, що зазвичай крива  $K_{\text{var}}(t)$  має точку перегину, після якої темп зменшення коефіцієнта варіації сповільнюється. У цей момент додаткові оберти дають усе менший внесок у покращення однорідності. Якщо позначити похідну  $\frac{dK_{\text{var}}}{dt}$ , то значення, де вона стає менше певного мінімального порогу  $\varepsilon$ , також може використовуватись як додатковий критерій:

$$\left| \frac{dK_{\text{var}}}{dt} \right| < \varepsilon. \quad (2.97)$$

Це дозволяє враховувати не лише досягнення цільового рівня однорідності, але й темп покращення, який може бути неприйнятно малим для технічно обґрунтованого продовження процесу.

Такий аналіз може бути реалізований шляхом послідовного обчислення значень показника однорідності для кожного  $t \in \{1, 2, \dots, T\}$ , що відповідають

окремим етапам процесу змішування. Потім із таблиці чи графіка визначається найменше  $t$ , для якого виконується умова

$$K_{\text{вар}}(t) \leq 0.05. \quad (2.98)$$

Також важливим є співвідношення між  $p$  і  $r$ . Якщо вони симетричні (тобто  $p = r$ ), то перемішування є ізотропним. Якщо ж одна з величин більша, наприклад  $p=0.4$ ,  $r=0.2$ , то виникає анізотропне перемішування з переважним напрямком зміщення. Це може або покращити швидкість вирівнювання, якщо узгоджується з напрямком конструктивної подачі суміші, або створити ефект «перенасичення» одного краю барабана, що затримує досягнення рівномірності.

Для кількісної оцінки швидкості змішування можна використовувати темп зменшення коефіцієнта варіації  $K_{\text{вар}}(t)$  та визначити його похідну за часом:

$$\frac{dK_{\text{вар}}}{dt} \approx \frac{K_{\text{вар}}(t) - K_{\text{вар}}(t-1)}{1}. \quad (2.99)$$

Тоді, чим більший модуль цього значення, тим швидше відбувається змішування. Практичне дослідження показує, що для матриць із значенням  $q < 0.4$  швидкість змішування значно вища, ніж при  $q > 0.6$ .

### 2.5.3 Критерій оцінки однорідності та визначення моменту її досягнення

Ступінь однорідності компонентів безпосередньо впливає на якість готового будівельного розчину. У рамках стохастичної моделі, що описує змішування як послідовність переходів часток розчину між комірками, необхідно ввести формальний математичний критерій, який дозволяє кількісно визначити, наскільки рівномірно розподілений розчин у змішувачі на будь-якому етапі часу. Таким критерієм є коефіцієнт варіації, який широко використовується в статистиці для оцінки відносного рівня розсіювання величин щодо їх середнього значення [88].

У нашій моделі вектор стану системи  $E_t$  на кожному кроці часу  $t$  має вигляд:

$$E_t = \begin{bmatrix} e_1(t) \\ e_2(t) \\ \vdots \\ e_n(t) \end{bmatrix}, \quad (2.100)$$

де  $e_i(t)$  – частка розчину в  $i$ -тій комірці на момент часу  $t$ ,

За визначенням, загальна сума всіх часток дорівнює одиниці:

$$\sum_{i=1}^n e_i(t) = 1. \quad (2.101)$$

Середнє значення частки розчину на комірку, або математичне сподівання, визначається як:

$$\mu = \frac{1}{n}. \quad (2.102)$$

Коефіцієнт варіації  $K_{var}$  визначається як відношення середньоквадратичного відхилення до середнього значення:

$$K_{var} = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (2.103)$$

де  $\sigma$  – стандартне відхилення, що обчислюється за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i(t) - \mu)^2}. \quad (2.104)$$

Таким чином, повна формула коефіцієнта варіації набуває вигляду:

$$K_{var} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( e_i(t) - \frac{1}{n} \right)^2}}{\frac{1}{n}} = \sqrt{n \sum_{i=1}^n \left( e_i(t) - \frac{1}{n} \right)^2}. \quad (2.105)$$

Отже,  $K_{var}$  показує ступінь відхилення від ідеального рівномірного стану.

Вона може інтерпретуватись наступним чином:

- $K_{var} \gg 1$ : суміш сильно неоднорідна;
- $K_{var} \approx 0.2 \div 0.5$ : суміш на стадії активного змішування;
- $K_{var} \leq 0.1$ : суміш вважається добре перемішаною;

- $K_{вар} \rightarrow 0$ : ідеальна однорідність.

При проведенні моделювання з використанням вектора  $E_t$ , на кожному кроці часу можна обчислювати значення  $K_{вар}$ , і за його зміною зростаючий або спадний характер буде показувати прогрес змішування. При досягненні  $K_{вар} \leq 0.05$  суміш можна вважати достатньо однорідною для подальшого використання.

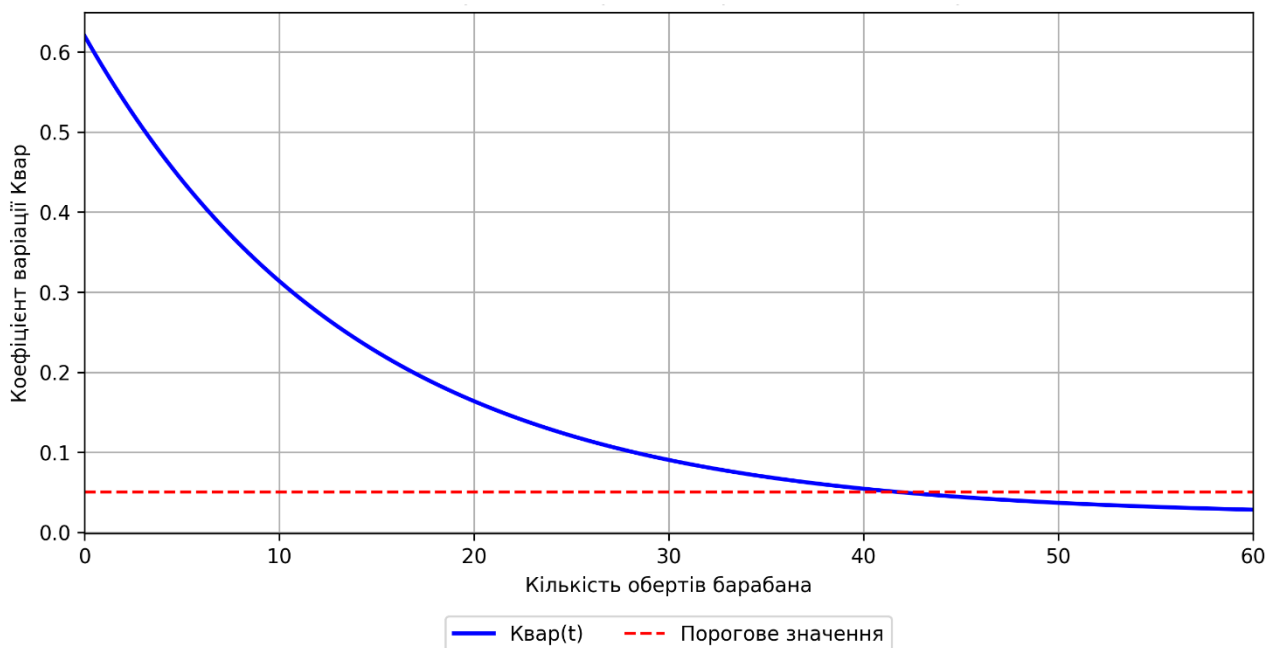


Рисунок 2.8 – Зміна коефіцієнта варіації  $K_{вар}$  від кількості обертів

Умови досягнення статистичної рівномірності під час моделювання процесу змішування розчинів на основі стохастичних процесів визначаються моментом часу (або кількістю обертів барабана), за якого розподіл компонентів суміші між комірками змішувального об'єму наближається до рівномірного настільки, що подальше перемішування не забезпечує суттєвого підвищення ступеня однорідності. У цьому випадку рівномірність розподілу відповідає стану, за якого ймовірності перебування частинок у всіх комірках змішувача є практично однаковими, а їх відхилення мають статистично незначущий характер.

Коефіцієнт варіації визначається як відношення стандартного відхилення до середнього значення концентрації в комірках на момент часу  $t$ :

$$K_{var}(t) = \frac{\sigma_t}{\bar{E}_t} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_t^{(i)} - \bar{E}_t)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_t^{(i)}}, \quad (2.106)$$

де  $E_t^{(i)}$  – концентрація цементу в  $i$ -тій комірці в момент  $t$ ,

$\bar{E}_t$  – середнє значення концентрації на ітерації  $t$ ,

$\sigma_t$  – стандартне відхилення вектора  $E_t$ .

Зі зменшенням розкиду значень у векторі  $E_t$ , тобто зі зростанням рівномірності розподілу, коефіцієнт  $K_{var}(t)$  монотонно зменшується. В момент, коли цей коефіцієнт досягає значення нижчого за певний критичний рівень, система вважається такою, що досягла умовної однорідності. У переважній більшості технологічних процесів таким критичним рівнем вважається:

$$K_{var}(t) \leq 0.1. \quad (2.107)$$

Тобто, якщо стандартне відхилення значень концентрації не перевищує 10% від середнього значення, суміш можна вважати практично однорідною. Такий критерій прийнятний для більшості будівельних і технологічних норм, де допустиме відхилення вмісту цементу чи інших компонентів у межах  $\pm 10\%$  не впливає на міцність і якість кінцевого продукту.

Аналіз графіка  $K_{var}(t)$ , побудованого в попередніх підпунктах, дає змогу визначити момент часу (тобто кількість обертів барабана), після якого досягається це значення. Позначимо цей момент як:

$$T_{opt} = \min \{t \in N : K_{var}(t) \leq 0.1\}. \quad (2.108)$$

Отримане значення  $T_{opt}$  може інтерпретуватися як мінімально необхідна кількість обертів змішувального органа, після досягнення якої подальше перемішування практично не приводить до істотного зменшення неоднорідності суміші. Таким чином, перевищення цього значення не забезпечує помітного

підвищення якості перемішування, але супроводжується додатковими витратами енергії та збільшенням навантаження на елементи приводу змішувача.

Використання такого підходу створює передумови для експериментальної перевірки адекватності теоретичної моделі шляхом визначення фактичного значення  $T_{omm}$  у лабораторних умовах, реалізації систем автоматизованого керування процесом змішування із припиненням роботи змішувача після досягнення порогового значення однорідності, а також зниження енерговитрат за рахунок виключення надлишкової тривалості перемішування при забезпеченні необхідної якості суміші.

Один із найважливіших наслідків адаптивної стохастичної моделі процесу змішування – це можливість встановлення зв'язку між параметрами моделі  $q_0$  і  $k$  та кількістю обертів барабана, необхідною для досягнення умовної однорідності, тобто моменту, коли  $K_{var}(t) \leq 0.1$ . Саме ці два параметри – початкова інертність системи  $q_0$  і темп тиксотропної адаптації  $k$  – визначають швидкість, з якою суміш "відкривається" до перемішування, і відповідно впливають на динаміку згладжування розподілу компонентів.

Параметр  $q_0$  описує ймовірність того, що на першому такті процесу кожна частинка цементу залишиться в поточній комірці. Чим більшим є  $q_0$ , тим вища початкова в'язкість суміші, тим менш інтенсивно відбувається перемішування на перших ітераціях. Це, в свою чергу, уповільнює розтікання частинок і затримує зменшення коефіцієнта варіації. З іншого боку, параметр  $k$  визначає темп згасання інертності: при високому  $k$ , система швидко переходить від інертного стану до активного, і отже – швидше досягає однорідності.

Як наслідок, із кожним обертот барабана ймовірності переходів між комірками зростають, що прискорює вирівнювання вектора стану  $E_t$ . Тому число обертів до однорідності, позначене як  $T_{omm}$ , є функцією двох змінних:

$$T_{omm} = f(q_0, k). \quad (2.109)$$

Хоча точна аналітична формула для  $T_{opt}$  недосяжна через складність внутрішньої структури моделі, можна побудувати її чисельну апроксимацію або табличну залежність шляхом багаторазових симуляцій. Відомо, що:

- при незмінному  $k$ , зростання  $q_0$  веде до логарифмічного зростання  $T_{opt}$ ;
- при незмінному  $q_0$ , зростання  $k$  веде до експоненційного зменшення  $T_{opt}$ .

Побудова функції  $T_{opt} = f(q_0, k)$ , яка відображає залежність оптимальної кількості обертів барабана до досягнення умовної однорідності суміші від параметрів адаптивної моделі, є важливим аналітичним кроком у визначенні ефективності роботи розчинозмішувача. Ця функція дозволяє передбачити час, необхідний для досягнення технологічної якості суміші, виходячи з реологічних властивостей матеріалу та інтенсивності перемішування.

З кожною ітерацією, коли  $q(t)$  знижується, змішування стає ефективнішим, і розподіл частинок цементу в об'ємі змішувача вирівнюється. Досягнення умовної однорідності визначається моментом, коли коефіцієнт варіації  $K_{var}(t) \leq 0.1$ , а це, в свою чергу, трапляється тоді, коли інертність  $q(t)$  зменшується до рівня, що дозволяє вільний обмін між більшістю комірок. За спостереженнями із чисельного моделювання, ця межа приблизно відповідає  $q(t) \leq 0.3$ , а отже:

$$q_0 \cdot e^{-kT_{opt}} \leq 0.3. \quad (2.110)$$

Звідси, логарифмічно розв'язуючи рівняння відносно  $T_{opt}$ , отримаємо:

$$T_{opt} \geq \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{q_0}{0.3}\right). \quad (2.111)$$

Ця оцінка дозволяє побудувати функцію:

$$T_{opt}(q_0, k) = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{q_0}{q_{nor}}\right), \quad (2.112)$$

де  $q_{nor}$  – експериментально визначене значення ймовірності інертності, при якому змішування стає максимально ефективним. Досліджувана функція

характеризується низкою суттєвих властивостей. Зокрема, зі збільшенням параметра  $q_{nop}$ , що характеризує початкову інертність системи, зростає кількість ітерацій, необхідних для досягнення заданого рівня однорідності суміші. Водночас зі збільшенням параметра  $k$ , який відображає інтенсивність структурної перебудови середовища під час перемішування, спостерігається зменшення тривалості процесу досягнення однорідного стану. Це свідчить про істотний вплив швидкості адаптації структури суміші на ефективність процесу змішування.

Аналіз функціональної залежності показує, що вона має гіперболічний характер відносно параметра  $k$  та логарифмічний характер відносно параметра  $q_{nop}$ , що вказує на вищу чутливість процесу до зміни швидкості структурної перебудови суміші порівняно з її початковим станом.

Графічна інтерпретація цієї залежності у просторі змінних  $k$  та  $q_{nop}$  відповідає логарифмічній поверхні, яка характеризується різким зростанням у діапазоні малих значень  $k$  та великих значень  $q_{nop}$ . Це означає, що для сумішей із підвищеним внутрішнім опором перемішуванню та низькою інтенсивністю структурної перебудови необхідна значно більша кількість обертів змішувального органа для досягнення заданого рівня однорідності.

#### **2.5.4 Практичні рекомендації щодо реалізації адаптивного режиму змішування**

Згідно з адаптивною моделлю, тривалість змішування повинна бути не фіксованою, а визначатися за досягненням порогового значення коефіцієнта варіації (2.21) та відповідний момент часу (2.28). Таким чином, перша рекомендація полягає в тому, щоб визначати кількість обертів змішувача за адаптивною моделлю, яка враховує властивості суміші.

Друга рекомендація стосується частоти обертів валу змішувача. Якщо адаптація моделі відображає зменшення в'язкості з часом, то на початкових

етапах доцільно обирати нижчі оберти (щоб уникнути перевантаження приводу), а вже після декількох обертів – поступово збільшувати частоту до максимальної ефективної. Таким чином, формується режим ступінчастого або плавного розгону:

$$n(t) = \begin{cases} n_{\min}, & t < t_{\text{актив}}, \\ n_{\max}, & t \geq t_{\text{актив}}, \end{cases} \quad (2.113)$$

де  $t_{\text{актив}}$  – момент часу, після якого модель передбачає максимальну мобільність суміші, тобто коли  $q(t) \leq 0.4$ .

Третя рекомендація стосується конструктивних параметрів змішувача, зокрема геометрії гвинтових лопаток. Відповідно до результатів математичного моделювання встановлено, що ефективність процесу змішування визначається не лише частотою обертання робочого органа, але й геометричними параметрами лопаток, які впливають на локальний напрямок переміщення компонентів, інтенсивність зсувних деформацій та об'єм охоплення матеріалу змішувальним впливом. Підвищення адаптивності процесу змішування забезпечується вибором кута нахилу лопаток, який формує одночасно окружний та осьовий рух суміші вздовж робочого об'єму змішувача, застосуванням змінної ширини або профілю лопаток у різних зонах змішувальної камери, а також створенням умов для багаторазового руйнування структурних зв'язків матеріалу під час переходу частинок між сусідніми зонами змішування.

Результати аналізу моделі також показують, що кількість лопаток і відстань між ними істотно впливають на параметр інтенсивності перемішування  $k$ : зі зростанням інтенсивності циркуляційних потоків підвищується значення цього параметра, що забезпечує швидше зменшення функції неоднорідності  $q(t)$  і відповідно скорочення часу досягнення необхідного ступеня однорідності суміші.

Таким чином, адаптивна модель процесу змішування дозволяє сформулювати основні принципи раціональної організації режимів роботи змішувача, які полягають у регулюванні частоти обертання барабана залежно від реологічних властивостей суміші, коригуванні швидкісного режиму роботи

змішувального вала на різних стадіях процесу перемішування, оптимізації геометричних параметрів гвинтових лопаток для інтенсифікації руйнування структурних зв'язків матеріалу та застосуванні адаптивних алгоритмів керування процесом змішування, що забезпечують його завершення після досягнення заданого рівня однорідності суміші.

Вплив частоти обертання вала в адаптивній стохастичній моделі проявляється через зміну параметра  $k$  – коефіцієнта, що визначає швидкість зменшення ймовірності інертності  $q(t)$ , тобто частки частинок, які зберігають своє положення в межах відповідної комірки змішувального об'єму. Частота обертання визначає механічну інтенсивність взаємодії лопаток із сумішшю та, відповідно, впливає на швидкість руйнування її внутрішньої структури. Зі збільшенням частоти обертання підвищується інтенсивність зсувних деформацій у матеріалі, що сприяє прискореному зменшенню ефективної структурної в'язкості та активізації процесу перемішування.

В математичній формі це відображається у вигляді функціональної залежності коефіцієнта  $k$  від частоти обертання  $n$  (в об/хв):

$$k(n) = \alpha \cdot n^{\beta}, \quad (2.114)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт пропорційності, що враховує тип розчину, геометрію лопаток і властивості матеріалу;

$\beta$  – показниковий степінь, що відображає характер нелінійної залежності між частотою і темпом адаптації.

Залежність параметра  $k(n)$  від частоти обертання вала має обмежено зростаючий характер. Починаючи з певного значення частоти обертання подальше її підвищення не забезпечує істотного підвищення ефективності змішування, оскільки зростання інтенсивності турбулентних потоків не супроводжується покращенням просторового перерозподілу компонентів суміші, виникає ймовірність ущільнення матеріалу або його налипання на внутрішні поверхні робочої камери, а також можливе часткове руйнування зернистих складових суміші внаслідок надмірного механічного впливу.

У зв'язку з цим існує раціональний діапазон частот обертання змішувального вала, у межах якого забезпечується оптимальне співвідношення між енерговитратами процесу, швидкістю зменшення структурної неоднорідності матеріалу та якістю перемішування. Значення раціонального діапазону частоти обертання змішувального вала може бути визначене на основі емпіричної залежності, що враховує взаємозв'язок між частотою обертання робочого органа та тривалістю процесу змішування. Такий підхід дозволяє розглядати зазначені параметри як узгоджену систему керування процесом досягнення заданого ступеня однорідності суміші, що описується наступною залежністю

$$n_{opt} = \arg \min_n \left\{ \frac{T_{opt}(n)}{n} \right\}. \quad (2.115)$$

Досягнення найкращої ефективності змішування в адаптивному режимі передбачає оптимальне поєднання трьох основних груп параметрів: реологічних властивостей суміші, кінематичних характеристик змішувача та геометричних особливостей робочого органа. Усі ці фактори впливають на темп зменшення в'язкості матеріалу в процесі змішування, інтенсивність порушення внутрішньої структури та швидкість досягнення рівномірного розподілу компонентів. У контексті адаптивної стохастичної моделі ці фактори формалізуються через змінні коефіцієнти ймовірностей переходу  $p(t)$ ,  $q(t)$ ,  $r(t)$ , а досягнення найкращої ефективності – це умова, при якій система за мінімальну кількість обертів досягає умовної однорідності при мінімальних затратах потужності.

З математичної точки зору, умова найкращої ефективності змішування визначається через мінімум узагальненого функціоналу витрат, який враховує як час (кількість обертів), так і енергоспоживання:

$$J = \int_0^{T_{opt}} P(t) dt, \quad (2.116)$$

де  $P(t)$  – миттєва споживана потужність змішувача, Вт;

$T_{opt}$  – час досягнення однорідності, с.

Завдання оптимізації: знайти такі параметри  $q_0$ ,  $k$ ,  $n$  (частота обертів),  $\theta$  (кут лопатки),  $l$  (довжина лопатки), при яких функціонал  $J$  мінімізується:

$$\min_{q_0, k, n, \theta, l} J. \quad (2.117)$$

Згідно з результатами чисельного моделювання встановлено, що найбільш сприятливі умови досягнення ефективного змішування забезпечуються за таких значень параметрів процесу: початкове значення інертності  $q_0 = 0,75 - 0,85$ , що відповідає середньов'язким будівельним сумішам; темп адаптації  $k = 0,08 - 0,12$ , за якого система досягає рівня однорідності  $K_{var} \leq 0.1$  протягом 10–15 обертів; частота обертання вала змішувача  $n = 25 - 35$  об/хв, що забезпечує достатню інтенсивність передачі енергії без перевищення допустимих навантажень на елементи приводу; геометрія гвинтових лопаток з кутом нахилу  $\theta = 30^\circ - 45^\circ$ , яка забезпечує поєднання осьового та радіального переміщення матеріалу; довжина лопаток, що забезпечує охоплення не менше 60–80 % поперечного перерізу змішувального барабана.

## 2.6 Аналіз чутливості моделі

### 2.6.1 Загальні положення аналізу чутливості

Для формалізації поняття чутливості використовується математичне представлення зміни вихідної функції  $F(\theta)$  відносно зміни вектора параметрів  $\theta$ . У нашому випадку  $F$  може означати кількість обертів до досягнення умовної однорідності  $T_{omm}$ , або кінцеве значення коефіцієнта варіації  $K_{var}(t)$ , а  $\theta = \{q_0, k, n, \theta, R, \dots\}$ . Чутливість тоді визначається як частинна похідна або чисельне наближення:

$$S_{\theta_i} = \frac{\partial F}{\partial \theta_i}, \quad \text{або} \quad S_{\theta_i}^{\text{rel}} = \frac{\Delta F / F}{\Delta \theta_i / \theta_i}, \quad (2.118)$$

де  $S_{\theta_i}^{\text{rel}}$  – відносна чутливість. Якщо  $S_{\theta_i}^{\text{rel}} \gg 1$ , то модель є дуже чутливою до параметра  $\theta_i$ , і він повинен бути визначений з високою точністю. Якщо ж  $S_{\theta_i}^{\text{rel}} \ll 1$ , то цей параметр має другорядне значення і може бути оцінений наближено.

У межах стохастичної моделі процесу змішування аналіз чутливості доцільно проводити відносно основних вихідних характеристик, що визначають динаміку досягнення однорідності суміші. До таких характеристик належать кількість ітерацій, необхідних для досягнення умовної однорідності; значення коефіцієнта варіації на заданому кроці процесу змішування; а також вектор стану системи, який описує просторовий розподіл компонентів суміші між комірками змішувального об'єму [89].

Задача аналізу чутливості полягає у побудові функцій виду:

$$T_{omt} = f(q_0), \quad T_{omt} = f(k), \quad T_{omt} = f(n), \quad (2.119)$$

а також у побудові їх похідних та графіків, які дозволяють візуально та кількісно визначити, який з параметрів найбільше впливає на ефективність змішування.

### 2.6.2 Вплив реологічних параметрів суміші

У фізичному сенсі  $q_0$  відображає в'язкість і структурну жорсткість свіжозавантаженої суміші, які обумовлені її складом, співвідношенням в'язучих і заповнювачів, вологістю та температурою. Вищий  $q_0$  означає, що частинки матеріалу практично не зміщуються при першому впливі робочих органів, що відповідає "жорсткій" суміші або слабкій дії мішального механізму на початкових обертах [90].

У математичному описі параметр  $q_0$  входить до експоненційної залежності ймовірності залишення частинки в поточному стані:

$$q(t) = q_0 \cdot e^{-kt}, \quad p(t) = r(t) = \frac{1 - q(t)}{2}. \quad (2.120)$$

Таким чином, на перших кроках змішування  $q(t) \approx q_0$ , і саме це значення визначає початкову швидкість змішування. Високе  $q_0$  веде до уповільнення процесу – розподіл компонентів змінюється повільно, а коефіцієнт варіації  $K_{var}(t)$  зменшується повільніше. Натомість, низьке  $q_0$  означає, що суміш уже на

старті більш "вільна", і переміщення частинок між комірками починається активніше.

Однією з основних метрик для аналізу чутливості до параметра  $q_0$  є залежність оптимальної кількості обертів змішувача до досягнення умовної однорідності:

$$T_{opt}(q_0) = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{q_0}{q_{nor}}\right), \quad (2.121)$$

де  $q_{nor} \approx 0.3$  – емпіричне порогове значення інертності, після якого перемішування набуває високої ефективності.

Аналіз цієї формули показує, що залежність  $T_{opt}$  від  $q_0$  є логарифмічно зростаючою (рис.2.9). Це означає, що для збільшення  $q_0$  на 10% приріст  $T_{opt}$  буде не лінійним, а повільним – проте все ж істотним:

$$\Delta T \approx \frac{1}{k} \cdot \left[ \ln\left(\frac{0.88}{0.3}\right) - \ln\left(\frac{0.80}{0.3}\right) \right] = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(\frac{0.88}{0.80}\right). \quad (2.122)$$

При  $k=0.1$ , це дає приріст приблизно на 1 оберт. Така чутливість виглядає помірною, але в реальному технологічному циклі це може означати перевищення нормативу часу змішування або витрат енергії.

Також варто зазначити, що при надто великому  $q_0 \geq 0.95$ , процес на перших 5–6 ітераціях майже зупиняється, а матриця  $N_t$  наближається до одиничної. Це призводить до утворення «локальних застоїв» у розподілі, коли частина матеріалу перемішується, а інша залишається нерухомою, що затягує процес до 20–30 обертів. Натомість при  $q_0 \leq 0.7$ , однорідність досягається вже за 5–8 ітерацій, і процес є значно ефективнішим.

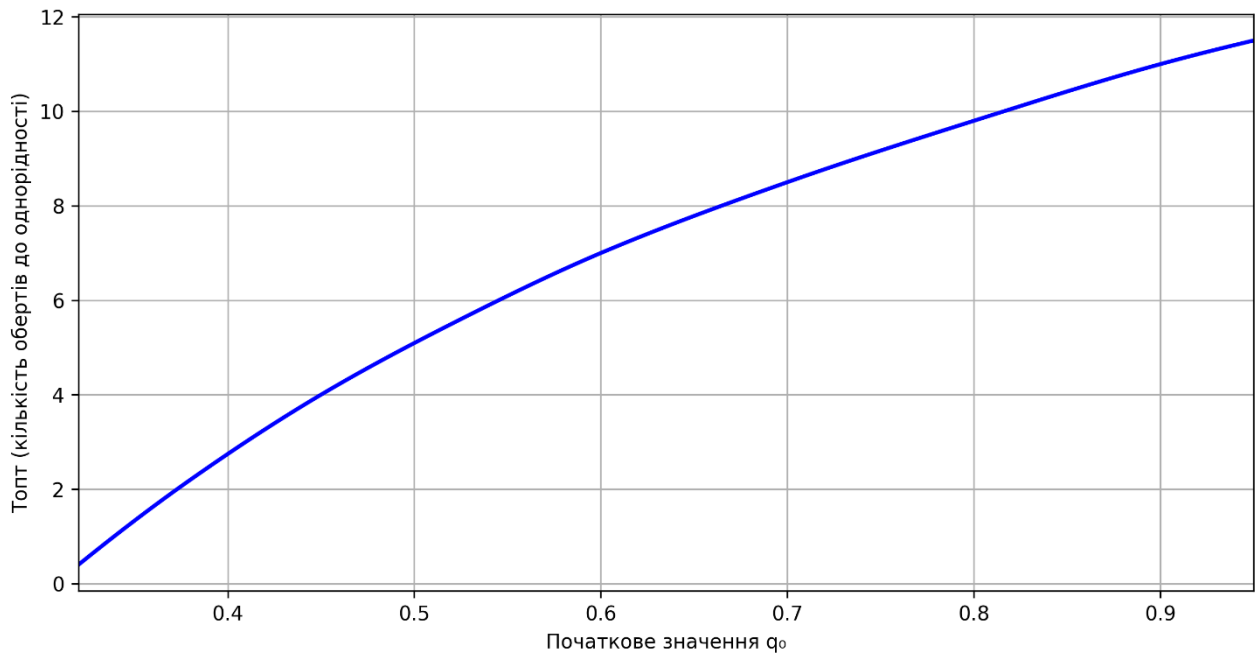


Рисунок 2.9 – Залежність кількості обертів від початкового значення інертності

Параметр  $k$  у структурі адаптивної стохастичної моделі змішування є центральним чинником, який відповідає за темп зменшення інертності системи, а отже – за швидкість переходу суміші від в'язкого, слабо мобільного стану до більш активного, в якому частинки починають вільно переміщуватись між комірками. У фізичному сенсі  $k$  пов'язаний із тиксотропними властивостями матеріалу, здатністю його до «розпушування» під впливом механічного навантаження, і відображає швидкість втрати структурної міцності. Це може бути результатом або зміни в'язкості при змішуванні, або дії гвинтових лопаток, що руйнують крихкі структури суміші, активуючи її подальше перемішування.

Математично параметр  $k$  входить до експоненційного рівняння, що описує ймовірність залишення частинки у своїй комірці:

$$q(t) = q_0 \cdot e^{-kt}, \quad p(t) = r(t) = \frac{1 - q(t)}{2}. \quad (2.123)$$

Очевидно, що при фіксованому  $q_0$ , більший  $k$  призводить до швидшого зниження  $q(t)$ , тобто суміш стає "гнучкішою" до змішування вже після перших обертів. У той же час, при малому  $k$ , процес зменшення  $q(t)$  є повільним, і більша кількість ітерацій витрачається на те, щоб вивести систему зі стану інерції.

Формально це відображено у формулі оптимальної кількості ітерацій до досягнення умовної однорідності:

$$T_{opt} = \frac{1}{k} \cdot \ln \left( \frac{q_0}{q_{nop}} \right). \quad (2.124)$$

Ця залежність є обернено пропорційною до  $k$ , тобто що більший темп адаптації, то менше потрібно обертів змішувача для досягнення технологічного критерію якості. Наприклад, якщо  $k=0.05$ ,  $T_{opt} \approx 20$  обертів; якщо  $k=0.1$ ,  $T_{opt} \approx 10$ ; якщо  $k=0.2$ , то лише 5 обертів. Це означає, що при подвоєнні  $k$  кількість необхідних ітерацій зменшується майже вдвічі.

Графічна залежність між параметром  $k$  та кількістю ітерацій, необхідних для досягнення заданого рівня однорідності суміші, має гіперболічний характер. Це свідчить про суттєве підвищення ефективності процесу змішування при збільшенні значення параметра  $k$  у початковому діапазоні його зміни та поступове зменшення приросту ефекту при подальшому зростанні цього параметра. Зокрема, збільшення  $k$  від 0,05 до 0,10 забезпечує значно інтенсивніше скорочення тривалості процесу змішування порівняно зі зміною цього параметра від 0,10 до 0,15. Таким чином, існує граничне значення параметра  $k$ , перевищення якого не супроводжується істотним зменшенням часу досягнення однорідності суміші, але призводить до зростання механічних навантажень на елементи змішувального обладнання.

У реальних умовах експлуатації змішувача параметр  $k$  визначається сукупністю конструктивних і технологічних чинників, серед яких основними є частота обертання змішувального вала, що може бути описана емпіричною залежністю виду  $k(n) = \alpha \cdot n^\beta$ , геометричні параметри робочих органів (кут нахилу, форма та кількість лопаток), фізико-механічні властивості матеріалу, а також температурні умови процесу, які впливають на зміну ефективної структурної в'язкості суміші під час перемішування.

Графічний вигляд залежності між коефіцієнтом адаптації  $k$  та кількістю ітерацій до досягнення необхідної однорідності наведено на рис. 2.10.

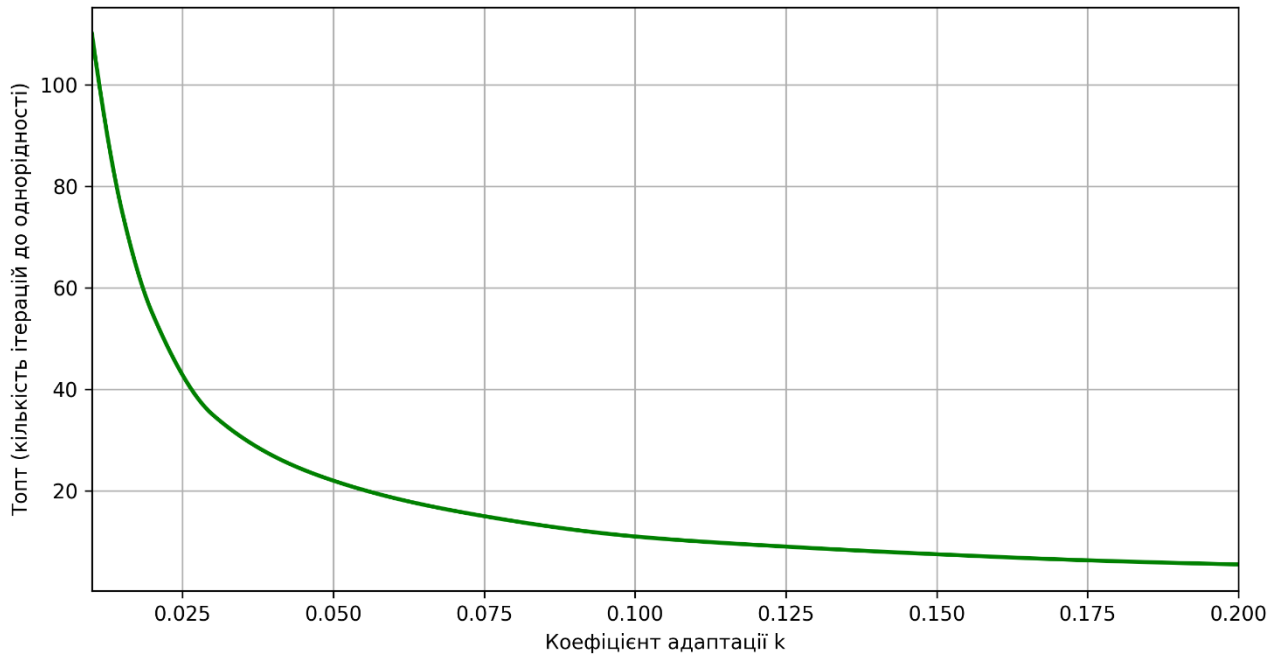


Рисунок 2.10 – Залежність кількості ітерацій від коефіцієнта адаптації

Висока чутливість моделі до зміни  $k$  означає, що цей параметр є критичним для управління процесом змішування. Невелика похибка у визначенні  $k$  може призвести до суттєвого зміщення графіка змішування, завищення тривалості або недосягнення однорідності. Тому в автоматизованих системах бажано реалізовувати адаптивне коригування  $k$  в залежності від властивостей суміші, або використовувати індикатори, які дозволяють непрямо визначити перехід суміші до адаптивної фази.

### 2.6.3 Вплив кінематичних параметрів приводу

В адаптивній стохастичній моделі змішування вплив частоти обертання змішувального вала враховується опосередковано через зміну темпу тиксотропної адаптації матеріалу, який описується параметром  $k$ . Зі збільшенням частоти обертання зростає інтенсивність механічного впливу на суміш, прискорюється руйнування міжчастинкових зв'язків і посилюється взаємодія робочих органів із матеріалом. Це супроводжується зниженням структурної

в'язкості суміші та підвищенням імовірності переходу частинок між комірками моделі [91].

Формально цей вплив описується степеневою функцією:

$$k(n) = \alpha \cdot n^\beta. \quad (2.125)$$

Ця формула показує, що зі зростанням  $n$  темп зменшення інертності  $q(t)$  зростає, а отже – змішування стає ефективнішим. В моделі це проявляється у зменшенні кількості обертів, необхідних для досягнення порогового коефіцієнта варіації  $K_{\text{вар}} \leq 0.1$ . Якщо підставити залежність  $k(n)$  у формулу оптимального часу змішування:

$$T_{\text{opt}}(n) = \frac{1}{k(n)} \cdot \ln\left(\frac{q_0}{q_{\text{пор}}}\right) = \frac{1}{\alpha \cdot n^\beta} \cdot \ln\left(\frac{q_0}{q_{\text{пор}}}\right), \quad (2.126)$$

то отримаємо функцію, яка показує, як саме змінюється ефективність змішування при зміні швидкості обертання. Згідно з цією залежністю, графік  $T_{\text{opt}}(n)$  має вигляд спадної гіперболічної кривої, і чим більші значення  $n$ , тим менше обертів потрібно для досягнення однорідності.

Аналогічно залежності від параметра  $k$ , для частоти обертання змішувального вала  $n$  також спостерігається ефект насичення. За досягнення високих значень частоти обертання подальше її збільшення супроводжується зменшенням приросту ефективності змішування, тоді як негативні супутні явища стають більш вираженими. Зокрема, надмірне підвищення частоти обертання може призводити до розбризкування суміші, налипання її окремих компонентів на внутрішні поверхні змішувального барабана, формування надмірно інтенсивних турбулентних потоків, що не сприяють покращенню просторового перерозподілу матеріалу, а також до зростання навантажень на привід змішувача, що викликає підвищений знос елементів обладнання.

Тому доцільно визначити раціональний діапазон частот обертання змішувального вала  $n_{\text{opt}}$ , у межах якого досягається збалансоване співвідношення між швидкістю набуття сумішшю необхідної однорідності, рівнем енергоспоживання та рівномірністю перебігу процесу змішування.

Значення цього діапазону залежить від реологічних властивостей розчину, конструктивних параметрів змішувача та геометрії робочих органів, зокрема форми й кута нахилу лопаток. Для цементно-піщаних розчинів у барабанних змішувачах із гвинтовими лопатками раціональні значення частоти обертання змішувального вала становлять  $n=25-35$  об/хв.

З точки зору математичного моделювання, варіюючи  $n$ , змінюємо вхідний параметр у функції  $T_{opt}(n)$ . Це дозволяє побудувати графіки та таблиці залежності ефективності змішування від швидкості обертання, які можуть бути використані для формування алгоритмів керування змішувачем у режимі зворотного зв'язку: тобто система буде автоматично підвищувати або знижувати оберти залежно від фази змішування.

#### 2.6.4 Вплив геометричних параметрів робочого органа

Кут нахилу  $\theta$  лопатки визначає напрям і силу зсуву, який створюється при обертанні змішувача. Якщо лопатка розташована перпендикулярно до осі обертання ( $\theta = 90^\circ$ ), вона створює сильний осьовий рух, але не сприяє перемішуванню по об'єму. При менших кутах ( $\theta = 30^\circ \dots 60^\circ$ ) виникає гвинтова траєкторія руху частинок, що поєднує аксіальне й радіальне переміщення. У моделі це означає, що зміна кутів спричинює ріст інтенсивності локальних переходів між комірками, тобто зменшення  $q(t)$  та зростання  $p(t)$ ,  $r(t)$ . Це може бути описано аналітично як:

$$k(\theta) = k_0 \cdot \sin(\theta), \quad (2.127)$$

де  $k_0$  – базовий темп адаптації при максимальному куті. Згідно з цим, кут нахилу наряду визначає темп перемішування через вплив на тиксотропну динаміку.

Довжина лопатки  $l$  відповідає за зону впливу на суміш. Якщо  $l \approx R$ , то лопатка охоплює майже весь поперечний переріз і забезпечує рівномірну дію на об'єм матеріалу. Це призводить до більш однорідного зменшення  $q(t)$  у всіх частинах простору. При зменшенні  $l$  вплив концентрується в центральній або

крайовій частині, і процес стає анізотропним, що в моделі відображається через несиметричність матриці переходів – тобто  $p(t) \neq r(t)$ .

Висота лопатки  $h$  впливає на глибину занурення в матеріал  $i$ , відповідно, на створення зусилля зсуву. Це можна пов'язати з механічною силою опору змішуванню. Згідно з цією формулою, при збільшенні  $h$  зростає зусилля, передане суміші, що також призводить до зменшення  $q(t)$  швидше. Таким чином, висота лопатки впливає на коефіцієнт  $k$  нелінійно, через силу зсуву та її розподіл по об'єму.

Гвинтові лопатки забезпечують поступальний рух частинок по спіралі, що ідеально поєднується з логікою стохастичної моделі – переміщення від комірки до комірки. У моделі гвинтові лопатки можуть бути змодельовані через збалансовані коефіцієнти переходів  $p=r$ , тоді як асиметричні або ламані профілі створюють спрямований рух і викликають  $p \neq r$ . Це дозволяє вводити у модель керовану анізотропію, що є важливою при змішуванні зливкових, шарових або градієнтних матеріалів.

У практичних умовах зазначені геометричні параметри визначають значення коефіцієнта  $k$ , тобто інтенсивність процесу перемішування суміші, що може бути описано залежністю:

$$k = f(\theta, l, h, \varphi), \quad (2.129)$$

У дискретному наближенні можна експериментально або чисельно визначити залежності типу:

$$k(\theta, l) = \alpha \cdot \sin(\theta) \cdot \left(\frac{l}{R}\right)^m, \quad (2.130)$$

У результаті проведеного аналізу чутливості стохастичної моделі процесу змішування встановлено, що швидкість досягнення умовної однорідності суміші істотно залежить від початкових реологічних характеристик середовища, інтенсивності перемішування та геометричних параметрів робочого органа. Показано, що зменшення початкової в'язкості суміші сприяє прискоренню переходу системи до стаціонарного стану змішування, тоді як підвищення частоти обертання вала забезпечує інтенсифікацію міжкоміркових переходів і

скорочення тривалості процесу вирівнювання концентрацій компонентів у робочому об'ємі. Встановлено також, що зміна геометричних параметрів лопаток істотно впливає на структуру матриці переходів і характер еволюції станів системи, визначаючи ефективність перемішування в адаптивному режимі. Отримані результати дозволяють обґрунтувати раціональні параметри роботи змішувача та підтверджують придатність запропонованої моделі для прогнозування динаміки досягнення однорідності будівельних розчинів.

## 2.7 Визначення технічної продуктивності розчинозмішувача

Основний вплив на продуктивність мають геометричні параметри барабана, частота обертання вала, конфігурація гвинтових лопаток, інтенсивність циркуляції компонентів суміші та тривалість робочого циклу. У розчинозмішувачі з приводом від валу трансмісії мотоблока процес змішування реалізується шляхом передачі обертального руху від трансмісії до вала з гвинтовими лопатками, які забезпечують одночасне переміщення, підняття та перевертання компонентів суміші у робочому об'ємі барабана. Це створює умови для формування складних просторових потоків та інтенсивного перемішування компонентів.

Технічна продуктивність змішувача визначається на основі робочого об'єму змішувальної камери з урахуванням впливу гвинтових лопаток, інтенсивності циркуляції суміші та ступеня однорідності матеріалу. Узагальнену залежність технічної продуктивності можна записати у вигляді

$$\Pi = \frac{V_{зм} \cdot k_l \cdot k_u \cdot k_{од}}{t_u}, \quad (2.131)$$

де  $\Pi$  – технічна продуктивність змішувача, м<sup>3</sup>/год;

$V_{зм}$  – робочий об'єм змішувача, м<sup>3</sup>;

$k_l$  – коефіцієнт впливу гвинтових лопаток на інтенсивність перемішування;

$k_u$  – коефіцієнт циркуляції суміші у робочому об'ємі;

$k_{од}$  – коефіцієнт однорідності суміші;

$t_y$  – тривалість робочого циклу, год.

Робочий об'єм змішувача визначається геометричними параметрами змішувального барабана та ступенем його заповнення сумішшю. У процесі роботи частина внутрішнього об'єму барабана залишається вільною для забезпечення переміщення та циркуляції компонентів, тому фактичний робочий об'єм є меншим за повний геометричний об'єм. Розрахунок робочого об'єму виконується за залежністю

$$V_{зм} = \pi R^2 H \cdot k_{зан}, \quad (2.132)$$

де  $R$  – внутрішній радіус барабана, м;

$H$  – довжина робочої частини барабана, м;

$k_{зан}$  – коефіцієнт заповнення барабана сумішшю.

У процесі змішування важливу роль відіграють гвинтові лопатки, які забезпечують формування осьових та радіальних потоків суміші. Їх геометрія визначає інтенсивність циркуляції матеріалу та ефективність перемішування компонентів у робочому об'ємі. Під час обертання вала лопатки створюють умови для багаторазового переміщення компонентів суміші вздовж барабана з одночасним перевертанням та диспергуванням частинок. Для врахування впливу конструкції лопаток вводиться коефіцієнт  $k_n$ , який визначається співвідношенням

$$k_n = 1 + \frac{z \cdot \sin \alpha}{k_2}, \quad (2.133)$$

де  $z$  – кількість гвинтових лопаток;

$\alpha$  – кут нахилу лопаток до осі вала;

$k_2$  – коефіцієнт, що враховує геометричні параметри лопаток.

Збільшення кута нахилу лопаток та їх кількості приводить до інтенсифікації осьового переміщення компонентів суміші та покращення циркуляції матеріалу в барабані. Разом із тим надмірне збільшення кута нахилу

може спричиняти локальне накопичення суміші в окремих зонах барабана та збільшення навантаження на привід змішувача.

Інтенсивність переміщення компонентів у робочому об'ємі визначається також швидкістю циркуляції суміші. Під час обертання гвинтових лопаток частинки суміші здійснюють складний просторовий рух, що супроводжується багаторазовою зміною їх положення у змішувальному об'ємі. Для врахування цього процесу використовується коефіцієнт циркуляції

$$k_y = 1 + \frac{v_z}{\omega R}, \quad (2.134)$$

де  $v_z$  – осьова швидкість переміщення суміші, м/с;

$\omega$  – кутова швидкість вала змішувача, рад/с;

Фізично коефіцієнт циркуляції характеризує інтенсивність осьового переміщення компонентів суміші відносно швидкості обертального руху. Зі збільшенням частоти обертання вала та швидкості циркуляції покращується перемішування компонентів та прискорюється досягнення однорідного стану суміші.

Якість перемішування будівельної суміші оцінюється коефіцієнтом однорідності, який залежить від кількості циклів перемішування та ефективності руйнування локальних скупчень компонентів. У процесі роботи змішувача відбувається поступове зменшення неоднорідності суміші внаслідок багаторазового переміщення частинок та їх диспергування у робочому об'ємі. Для оцінювання цього процесу використовується залежність

$$k_{од} = 1 - e^{-kn}, \quad (2.135)$$

де  $k$  – коефіцієнт ефективності перемішування;

$n$  – кількість циклів перемішування.

Зі збільшенням кількості циклів змішування коефіцієнт однорідності наближається до одиниці, що відповідає формуванню рівномірного розподілу компонентів у робочому об'ємі змішувача. Однак після досягнення певного рівня однорідності подальше збільшення тривалості змішування практично не

впливає на якість суміші та супроводжується лише зростанням енергетичних витрат.

Тривалість робочого циклу визначається сумою часу змішування, завантаження та вивантаження суміші:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{зм}} + t_{\text{зав}} + t_{\text{вив}}, \quad (2.136)$$

де  $t_{\text{зм}}$  – час змішування, с;

$t_{\text{зав}}$  – час завантаження компонентів, с;

$t_{\text{вив}}$  – час вивантаження готової суміші, с.

Підставляючи отримані залежності у загальну формулу продуктивності, отримаємо узагальнену залежність технічної продуктивності розчинозмішувача з гвинтовими лопатками:

$$\Pi = \frac{\pi R^2 H \cdot k_{\text{зан}} \left( 1 + \frac{z \cdot \sin \alpha}{k_2} \right) \left( 1 + \frac{v_z}{\omega R} \right) (1 - e^{-kn})}{t_{\text{зм}} + t_{\text{зав}} + t_{\text{вив}}}. \quad (2.137)$$

Одержана аналітична залежність описує вплив конструктивних параметрів змішувача, геометрії гвинтових лопаток, режимів роботи привода та інтенсивності циркуляції розчинної суміші на технічну продуктивність обладнання. Розрахунки показали, що зі збільшенням частоти обертання змішувального вала продуктивність зростає до досягнення раціонального режиму роботи. Подальше підвищення частоти обертання не забезпечує істотного приросту продуктивності через збільшення енергетичних втрат і зміну характеру циркуляції суміші в робочому об'ємі змішувача.

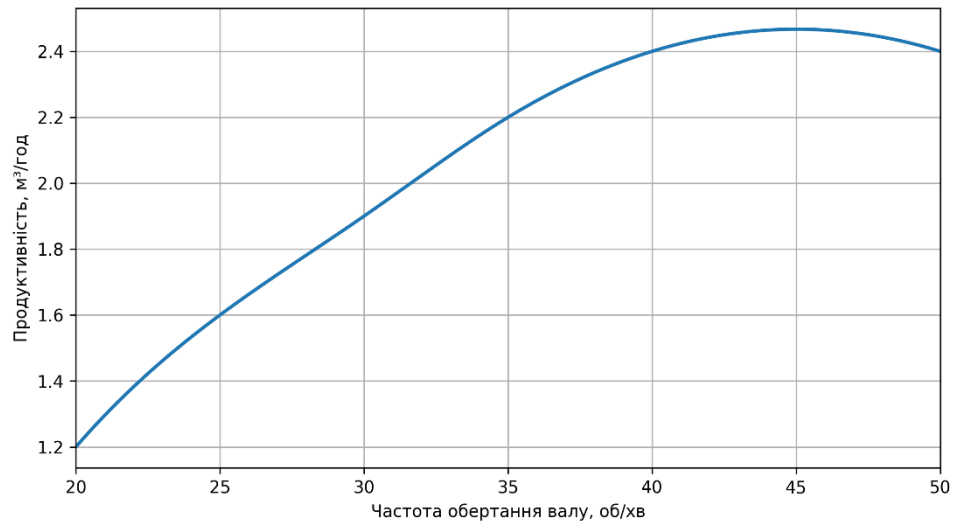


Рисунок 2.11 – Залежність продуктивності від частоти обертання валу

На основі одержаної аналітичної залежності побудовано теоретичну залежність технічної продуктивності розчинозмішувача від частоти обертання змішувального вала (рис. 2.11). Із графіка видно, що зі збільшенням частоти обертання від 20 до 40 об/хв продуктивність змішувача зростає найбільш інтенсивно, що пояснюється активізацією циркуляції розчинної суміші та підвищенням інтенсивності процесу перемішування. Подальше збільшення частоти обертання практично не супроводжується підвищенням продуктивності, що свідчить про досягнення раціонального режиму роботи змішувача. Отримані результати дають підстави вважати діапазон 35–40 об/хв раціональним для роботи розчинозмішувача з гвинтовими лопатками.

## 2.8 Теоретичне визначення загальних енерговитрат процесу змішування

У процесі роботи змішувача енергія витрачається не лише на обертання робочого органа, але й на переміщення компонентів суміші у робочому об'ємі, подолання внутрішнього тертя середовища, підняття матеріалу гвинтовими лопатками та руйнування локальних скупчень компонентів. У зв'язку з цим загальні енерговитрати процесу змішування доцільно розглядати як суму

окремих енергетичних складових, кожна з яких характеризує певний фізичний процес, що відбувається у змішувальному об'ємі.

У розчинозмішувачі з гвинтовими лопатками процес перемішування супроводжується складним просторовим рухом компонентів суміші. Під час обертання вала матеріал переміщується в осьовому, радіальному та тангенціальному напрямках, формуючи циркуляційні потоки всередині барабана. Кожен із цих процесів супроводжується витратами енергії, величина яких залежить від конструктивних параметрів змішувача, режимів роботи приводу та фізико-механічних властивостей будівельної суміші.

Загальні енерговитрати процесу змішування можна представити як суму окремих складових:

$$E_{\Sigma} = E_{\text{ц}} + E_{\text{тер}} + E_n + E_{\text{мех}}, \quad (2.138)$$

де  $E_{\Sigma}$  – загальні енерговитрати процесу змішування, Дж;

$E_{\text{ц}}$  – енергія циркуляційного переміщення суміші, Дж;

$E_{\text{тер}}$  – енергія подолання внутрішнього тертя компонентів суміші, Дж;

$E_n$  – енергія підняття компонентів суміші, Дж;

$E_{\text{мех}}$  – механічні втрати приводу змішувача, Дж.

Однією з основних складових загальних енерговитрат є енергія циркуляційного переміщення суміші у робочому об'ємі. Під час роботи змішувача гвинтові лопатки забезпечують інтенсивне переміщення компонентів уздовж барабана та створення складних просторових потоків. Для формування циркуляційного руху необхідно витратити певну кількість енергії, яка залежить від маси суміші та швидкості її переміщення. Енергія циркуляційного руху визначається залежністю

$$E_{\text{ц}} = k_{\text{ц}} m v_z^2, \quad (2.139)$$

де  $k_{\text{ц}}$  – коефіцієнт циркуляції;

$m$  – маса суміші, кг;

$v_z$  – швидкість осьового переміщення компонентів суміші, м/с.

Фізично ця складова характеризує енергію, яка витрачається на забезпечення безперервного переміщення суміші між окремими зонами робочого об'єму. Зі збільшенням швидкості циркуляції інтенсивність перемішування підвищується, однак одночасно зростають і витрати енергії на переміщення матеріалу.

У процесі перемішування значна частина енергії витрачається також на подолання внутрішнього тертя будівельної суміші. Для бетонних та розчинних сумішей характерною є наявність складної внутрішньої структури, що створює опір переміщенню частинок відносно одна одної. Особливо суттєво вплив внутрішнього тертя проявляється під час змішування густих та малорухомих сумішей. Енергія, необхідна для подолання внутрішнього тертя, визначається залежністю

$$E_{тер} = \mu \cdot m \cdot g \cdot l, \quad (2.140)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт внутрішнього тертя суміші;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$l$  – характерний шлях переміщення компонентів суміші, м.

Величина цієї складової суттєво залежить від фізико-механічних властивостей суміші, її густини, вологості та консистенції. Зі збільшенням в'язкості середовища зростає опір переміщенню компонентів, що супроводжується підвищенням загальних енерговитрат процесу змішування.

У процесі роботи змішувача гвинтові лопатки забезпечують не лише осьове переміщення компонентів, але й їх підняття у верхню частину робочого об'єму. Після підняття частинки суміші під дією сили тяжіння опускаються вниз, формуючи циркуляційний рух матеріалу. Для підняття компонентів необхідно витратити додаткову енергію, яка визначається як

$$E_n = m \cdot g \cdot h, \quad (2.141)$$

де  $h$  – середня висота підняття компонентів суміші, м.

Дана складова безпосередньо залежить від маси суміші та геометричних параметрів змішувального органа. Зі збільшенням радіуса барабана та висоти підняття компонентів енерговитрати на виконання цього процесу зростають.

Крім енерговитрат безпосередньо на процес змішування, частина енергії витрачається у приводі змішувача внаслідок механічних втрат у передачах, підшипниках та рухомих з'єднаннях. Для врахування цих втрат використовується залежність

$$E_{\text{мех}} = P(1 - \eta)t, \quad (2.142)$$

де  $P$  – потужність приводу, кВт;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії приводу;

$t$  – тривалість процесу змішування, с.

Механічні втрати зростають зі збільшенням навантаження на привід та частоти обертання вала змішувача. Особливо суттєвий вплив вони мають під час роботи обладнання з густими будівельними сумішами, коли навантаження на робочий орган значно зростає.

Підставляючи отримані залежності у загальне рівняння енерговитрат, отримаємо узагальнену залежність загальних енерговитрат процесу змішування:

$$E_{\Sigma} = k_y m v_z^2 + \mu m g l + m g h + P(1 - \eta)t. \quad (2.143)$$

Отримана залежність дозволяє враховувати вплив конструктивних параметрів змішувача, режимів роботи приводу та фізико-механічних властивостей будівельної суміші на загальні енерговитрати процесу змішування. Встановлено, що найбільший вплив на величину енерговитрат мають швидкість циркуляції компонентів суміші, в'язкість середовища, частота обертання вала та інтенсивність диспергування матеріалу у робочому об'ємі. Зі збільшенням частоти обертання вала покращується інтенсивність перемішування та скорочується час досягнення однорідного стану суміші, однак одночасно зростають енерговитрати на циркуляцію матеріалу та подолання внутрішнього тертя середовища.

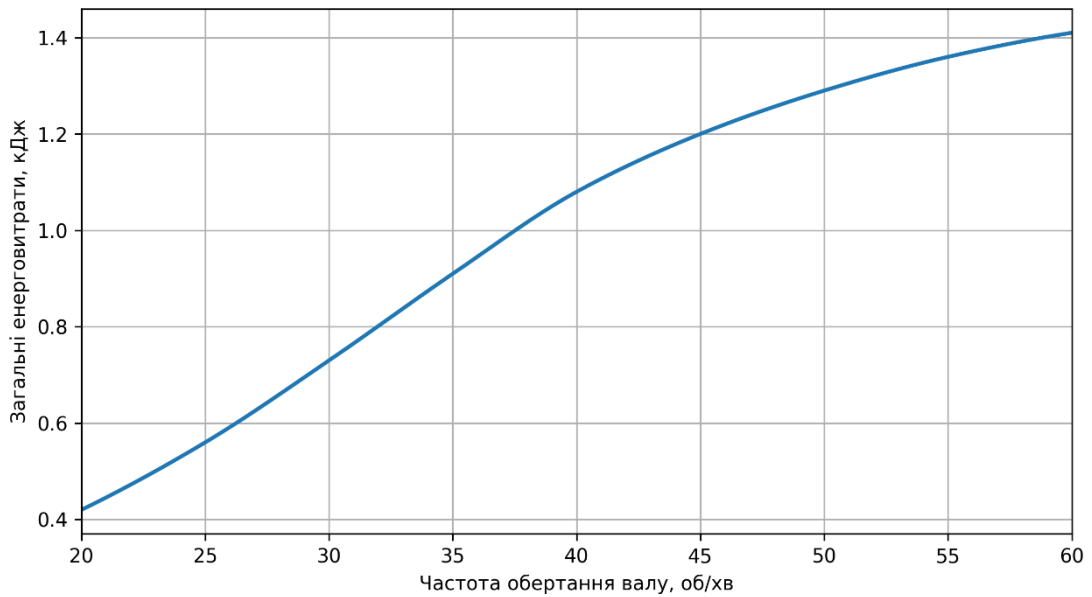


Рисунок 2.12 – Залежність загальних енерговитрат процесу змішування від частоти обертання валу

На основі одержаної аналітичної залежності побудовано графік зміни загальних енерговитрат процесу змішування залежно від частоти обертання змішувального вала (рис. 2.12). Із графіка видно, що в діапазоні частот 20–40 об/хв енерговитрати поступово зростають унаслідок інтенсифікації циркуляції розчинної суміші та збільшення втрат енергії на її перемішування. Подальше підвищення частоти обертання практично не впливає на величину енерговитрат, що свідчить про досягнення граничного режиму процесу змішування, за якого додаткове збільшення швидкості обертання не забезпечує істотного енергетичного ефекту.

## 2.9 Висновки до розділу 2

1. Встановлено, що використання приводу від валу трансмісії мотоблока забезпечує передавання достатнього крутного моменту для ефективного перемішування будівельних розчинів та створює умови автономної роботи розчинозмішувача в польових умовах.

2. Визначено, що гвинтова геометрія лопаток формує комбінований осьовий і тангенціальний рух частинок суміші, що забезпечує інтенсифікацію процесу перемішування та прискорення досягнення однорідного стану.

3. Встановлено закономірності силової взаємодії робочих органів зі сумішшю з урахуванням інерційних, гравітаційних і гідродинамічних сил, які визначають ефективність процесу змішування.

4. Отримано аналітичні залежності для визначення сили опору перемішуванню, крутного моменту на валу та потужності приводу з урахуванням втрат у трансмісії.

5. Встановлено, що процес змішування будівельних розчинів може бути описаний як стохастичний процес переходів частинок між дискретними комірками робочого об'єму змішувача, для чого сформовано матрицю ймовірностей переходів станів системи.

6. Отримано залежності зміни показника однорідності суміші від параметрів матриці переходів, частоти обертання змішувального органа та тривалості перемішування, що дозволяє визначати момент досягнення умовної однорідності.

7. Визначено, що найбільший вплив на швидкість досягнення однорідності мають початкові реологічні властивості суміші, частота обертання вала та геометричні параметри лопаток, які визначають структуру матриці переходів і динаміку процесу змішування.

## **РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ РОЗЧИНОЗМІШУВАЧА З ПРИВОДОМ ВІД ВАЛУ ТРАНСМІСІЇ МОТОБЛОКА**

### **3.1 Програма досліджень**

Експериментальні дослідження розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока спрямовані на встановлення раціональних умов його експлуатації під час приготування будівельних розчинів різного складу та рухомості. Основною метою досліджень є визначення параметрів режиму роботи, за яких забезпечується висока якість змішування при мінімальних енерговитратах і надійному перебігу технологічного процесу. Для досягнення поставленої мети передбачено аналіз діапазонів зміни швидкості обертання робочих органів, тривалості змішування та об'ємного завантаження змішувача з визначенням їх оптимальних співвідношень залежно від фізико-механічних властивостей компонентів розчину.

Особливістю досліджуваної конструкції є використання приводу від валу трансмісії мотоблока, що принципово відрізняє її від традиційних стаціонарних електричних або гідравлічних змішувальних установок. Це зумовлює необхідність оцінювання впливу змінної швидкості обертання приводу, яка визначається режимом роботи мотоблока, на процес формування будівельного розчину. При цьому досліджуються сталість передавання крутного моменту, рівень вібраційних навантажень, дія динамічних збурень у системі приводу та їх вплив на однорідність розчину.

Програма експериментальних досліджень передбачає послідовне виконання кількох етапів. На першому етапі здійснюється підготовка експериментальної установки, що включає адаптований розчинозмішувач із приводом від трансмісії мотоблока, вимірювальні засоби та допоміжне обладнання. Проводиться перевірка працездатності вузлів установки та

визначаються контрольовані параметри процесу. На другому етапі виконується серія експериментів із варіюванням технологічних режимів роботи, зокрема складу будівельних розчинів, їх рухомості, тривалості змішування та швидкості обертання робочих органів. При цьому фіксуються показники однорідності розчину, енергоспоживання, навантаження на привід і продуктивність установки.

Заключний етап досліджень передбачає порівняння результатів експериментальних вимірювань із теоретичними залежностями, отриманими на попередніх етапах роботи. Особлива увага приділяється зіставленню фактичних значень споживаної потужності з розрахунковими даними, оцінюванню відхилень продуктивності та коефіцієнта корисної дії. Це дозволяє встановити межі застосовності розроблених моделей, визначити коригувальні коефіцієнти та сформулювати рекомендації щодо подальшого вдосконалення конструкції змішувача. Таким чином, програма досліджень забезпечує комплексне оцінювання впливу конструктивних і режимних факторів на ефективність роботи розчинозмішувача та створює основу для обґрунтування його раціонального використання у будівельному виробництві.

## **3.2 Характеристика експериментального обладнання, матеріалів та засобів вимірювання**

### **3.2.1 Експериментальне обладнання**

Експериментальні дослідження проводилися на дослідному зразку розчинозмішувача, конструктивною особливістю якого є використання приводу від валу трансмісії мотоблока (рис. 3.1). Застосування такого типу приводу забезпечує підвищення мобільності обладнання, зменшення залежності від зовнішніх джерел електроенергії та створює можливість його ефективного використання у польових і будівельних умовах за обмеженого доступу до

електромережі. Розроблений агрегат призначений для приготування будівельних розчинів безпосередньо на будівельному майданчику з можливістю оперативного транспортування та швидкого введення в робочий режим.



Рисунок 3.1 – Дослідний зразок розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблоку

Основними конструктивними елементами експериментального зразка є змішувальний барабан із робочим органом лопатевого типу, механізм приводу, з'єднаний із трансмісією мотоблока, передавальна система, що забезпечує необхідне передаточне число, та несуча рама, яка виконує функції опорної і транспортної конструкції. Особливу увагу під час виготовлення дослідного зразка приділено вузлу з'єднання трансмісії мотоблока зі змішувальним органом, оскільки від його конструктивних параметрів залежить надійність передавання крутного моменту та сталість роботи установки. Передбачено можливість швидкого від'єднання змішувача від мотоблока, що розширює функціональні

можливості машини та забезпечує використання базового енергетичного засобу за основним призначенням.

Під час експериментальних досліджень розчинозмішувач використовувався для приготування цементно-піщаних розчинів різної рухомості, що дозволило оцінити його працездатність при змішуванні матеріалів із різними структурно-механічними властивостями, зокрема за різних значень водоцементного відношення та гранулометричного складу заповнювача. У процесі досліджень визначалися тривалість досягнення необхідного ступеня однорідності розчину, енергетичні витрати на перемішування, що передаються від трансмісії мотоблока до змішувального органу, а також продуктивність установки.

Для отримання експериментальних даних використовувався спеціально обладнаний вимірювальний стенд, до складу якого входили датчики частоти обертання трансмісії мотоблока та змішувального вала, засоби вимірювання навантаження на привід і пристрої контролю показників якості готового розчину. Застосована вимірювальна апаратура забезпечувала реєстрацію параметрів процесу в режимі реального часу з подальшим збереженням результатів для їх обробки та аналізу.

### **3.2.2 Матеріали досліджень**

Для проведення експериментальних досліджень у розчинозмішувачі використовувалися традиційні компоненти будівельних розчинів, що відповідають вимогам чинних нормативних документів і забезпечують відтворюваність технологічних режимів приготування розчину. Вибір матеріалів був зумовлений необхідністю отримання розчинів різної рухомості та міцності, що дозволило комплексно оцінити ефективність роботи дослідного обладнання за різних фізико-механічних характеристик розчину.

Як в'язучий матеріал застосовувався портландцемент вітчизняного виробництва класу міцності СЕМ І 42.5R відповідно до вимог ДСТУ EN 197-1:2014 [92]. Зазначений цемент характеризується інтенсивним набором ранньої міцності та забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики будівельних розчинів. Його використання дозволило максимально наблизити умови експериментальних досліджень до реальних умов будівельного виробництва.

Як дрібний заповнювач застосовувався природний річковий пісок із зерновим складом у межах 0,125–5 мм відповідно до вимог ДСТУ Б EN 12620:2018 [93]. Перед використанням пісок підлягав попередньому просіюванню з метою видалення сторонніх включень, органічних домішок і надлишкових пилюватих частинок, що забезпечувало сталість гранулометричного складу та виключало вплив випадкових факторів на результати експериментальних досліджень.

Замішування розчинів здійснювалося із застосуванням води відповідно до вимог ДСТУ EN 934-2:2019 [94]. Якість води контролювалася щодо відсутності домішок, здатних негативно впливати на процес гідратації цементу та формування властивостей розчину.

В окремих серіях експериментів для регулювання рухомості та пластичності розчину використовувалися хімічні добавки, зокрема суперпластифікатор на основі полікарбоксилатів відповідно до вимог ДСТУ [94]. Використання добавки забезпечувало зниження водоцементного відношення, підвищення однорідності розчину та ефективності процесу перемішування.

Усі матеріали перед використанням проходили вхідний контроль якості, що передбачав перевірку відповідності паспортним характеристикам і нормативним вимогам, а також визначення вологості піску. Це забезпечувало достовірність отриманих результатів і виключало вплив сторонніх чинників на перебіг процесу змішування.

### 3.2.3 Засоби вимірювання параметрів процесу змішування

Для проведення експериментальних досліджень застосовувалися вимірювальні інструменти та прилади, що забезпечували достовірний контроль основних параметрів будівельних розчинів і характеристик роботи дослідного обладнання. Використання атестованих засобів вимірювальної техніки дозволило отримати об'єктивні експериментальні дані та забезпечити коректне зіставлення результатів теоретичних розрахунків із результатами вимірювань.

Зважування компонентів розчину здійснювалося на електронних лабораторних вагах високої точності, що відповідають вимогам ДСТУ EN 45501:2021 «Метрологія. Ваги неавтоматичної дії. Вимоги та методи випробування» [95]. Це забезпечувало необхідну точність дозування цементу, піску, води та хімічних добавок, оскільки співвідношення компонентів суттєво впливає на рухомість і фізико-механічні характеристики розчинів. Для контролю гранулометричного складу піску застосовувався набір лабораторних сит, що забезпечувало сталість фракційного складу заповнювача та відтворюваність результатів експериментів.

Формування контрольних зразків здійснювалося у стандартних металевих формах кубічної форми розміром  $100 \times 100 \times 100$  мм згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [96]. Випробування зразків на стискання проводилося на гідравлічному пресі відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-233:2010 [97], що забезпечувало визначення межі міцності розчину після твердіння.

Визначення рухомості розчину виконувалося за допомогою стандартного конуса відповідно до методики ДСТУ Б В.2.7-23-95 [98]. Застосування цього методу дозволяло оцінити технологічні властивості розчину за різних режимів роботи змішувача та змінної швидкості обертання робочого органа. Для вимірювання тривалості змішування використовувався секундомір, що пройшов метрологічну повірку, а контроль геометричних параметрів здійснювався за допомогою металевої лінійки довжиною 1 м із ціною поділки 0,5 мм.

Контроль режимних параметрів роботи змішувача здійснювався за допомогою датчиків частоти обертання та навантаження, підключених до реєстраційної системи збору даних. Використання цифрового осцилографа з USB-інтерфейсом та персонального комп'ютера забезпечувало можливість візуалізації сигналів у режимі реального часу та їх подальшого збереження для обробки. Це дозволило дослідити енергетичні характеристики роботи змішувача та встановити закономірності зміни споживаної потужності залежно від режимів навантаження.

Усі інструменти та вимірювальні прилади, що використовувалися під час експериментальних досліджень, пройшли державну метрологічну перевірку та відповідали чинним вимогам сертифікації. Це забезпечило необхідний рівень достовірності експериментальних результатів і можливість їх використання для обґрунтування наукових висновків щодо ефективності застосування розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока у будівельному виробництві.

### **3.3 Методика проведення експериментальних досліджень та обробки результатів**

Для проведення експериментальних досліджень використовувався розчинозмішувач з приводом від валу трансмісії мотоблока, застосування якого забезпечує можливість приготування будівельних розчинів за відсутності стаціонарних джерел енергії. Приготування розчину здійснювалося безпосередньо у змішувальному барабані, який приводився в дію через механічну передачу від валу трансмісії мотоблока. Така схема приводу забезпечила можливість дослідити особливості процесу змішування за умов, коли швидкість обертання робочих органів визначається реальними динамічними режимами роботи енергетичного засобу, а не параметрами електричного або гідравлічного приводу.

Компоненти будівельного розчину (цемент, пісок, вода та хімічні добавки) завантажувалися у змішувач у визначеній технологічній послідовності. Після введення розрахункової кількості води здійснювався процес змішування, тривалість якого встановлювалася відповідно до заданих режимів експерименту. З метою виключення впливу залишків попередніх сумішей перед виконанням основних дослідів проводилися холості цикли роботи змішувача, що забезпечувало заповнення робочих об'ємів та приведення системи у встановлений режим функціонування, що дозволило мінімізувати похибки, пов'язані з нерівномірністю розподілу компонентів у початкових порціях розчину.

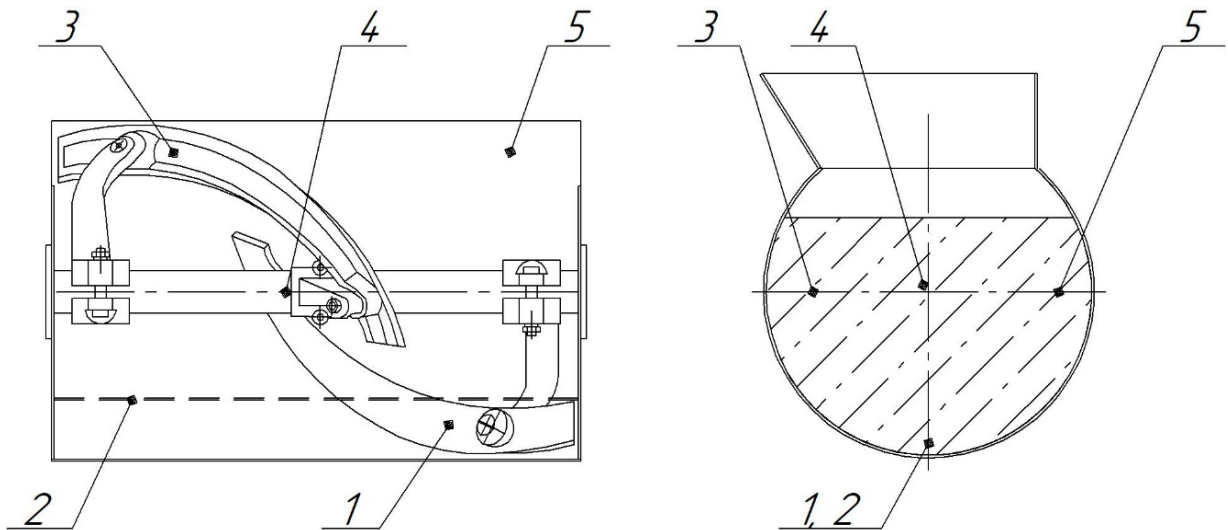


Рисунок 3.2 – Контрольні точки для відбору будівельного розчину

Рухомість отриманих будівельних розчинів визначалася за допомогою стандартного еталонного конуса відповідно до вимог ДСТУ [98]. Методика передбачала заповнення конуса будівельним розчином у три шари з ущільненням кожного шару металевим стержнем встановленої форми. Час виконання випробування регламентувався нормативними вимогами, що забезпечувало відтворюваність результатів вимірювань. Значення осадки конуса визначалося як середнє арифметичне двох послідовних вимірювань, виконаних для однієї проби. Отримані результати використовувалися для оцінювання

технологічних властивостей розчину за різних режимів роботи приводу змішувача.

Оцінювання однорідності розчинів здійснювалося шляхом відбору проб у п'яти контрольних точках робочого об'єму змішувача, що забезпечувало можливість визначення ступеня рівномірності розподілу основних компонентів розчину (рис. 3.2). Відбір проб проводився із застосуванням спеціальних пристроїв, які забезпечували отримання репрезентативних зразків із різних зон змішувального об'єму (рис. 3.3). Подальший аналіз передбачав визначення масової частки цементу, піску та води з наступним розрахунком показника нерівномірності змішування. Додатковий контроль результатів здійснювався шляхом випробування контрольних кубів розчину на стискання. Зразки стандартних розмірів виготовлялися з відібраних проб і випробовувалися на гідравлічному пресі, що дозволило оцінити вплив якості змішування на фізико-механічні характеристики розчину.



Рисунок 3.3 – Відбір проб розчину зі змішувача конусним відбірником

Особливу увагу під час досліджень приділяли визначенню енергетичних витрат установки. З цією метою у приводі від валу трансмісії мотоблока встановлювалися датчики навантаження та частоти обертання, за допомогою яких реєструвалися зміни потужності в процесі роботи змішувача. Сигнали з датчиків надходили до вимірювального комплексу, що складався з перетворювачів сигналів, цифрового осцилографа та комп'ютерного блока з програмним забезпеченням для збору й обробки експериментальних даних. Це забезпечило реєстрацію миттєвих значень потужності, а також визначення сумарних енергетичних витрат за повний цикл приготування будівельного розчину.

Обробка експериментальних даних здійснювалася із застосуванням методів математичної статистики. Для кожної серії дослідів визначалися середні значення досліджуваних параметрів, граничні відхилення та довірчі інтервали. Порівняння експериментальних результатів із теоретичними залежностями дозволило оцінити адекватність розроблених математичних моделей і встановити поправочні коефіцієнти, що враховують особливості роботи змішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока. Це забезпечило комплексну перевірку достовірності отриманих результатів та сформувало основу для обґрунтування раціональних режимів експлуатації обладнання.

### **3.4 Визначення раціональних параметрів процесу змішування в розчинозмішувачі з приводом від трансмісії мотоблока**

Для проведення експериментальних досліджень застосовано трифакторний план експерименту. Як змінні фактори прийнято частоту обертання вала змішувача, коефіцієнт заповнення змішувального барабана та рухомість будівельного розчину. Вибір зазначених параметрів зумовлений їх визначальним впливом на інтенсивність перемішування, енергетичні показники процесу та продуктивність обладнання. Частота обертання характеризує

кінематичний режим роботи змішувача і визначає рівень механічної дії на розчин, коефіцієнт заповнення барабана відображає об'єм завантаження та впливає на характер руху компонентів у робочому просторі, а рухомість розчину характеризує його структурно-механічні властивості та визначає тривалість процесу змішування.

Як основний вихідний параметр експериментальних досліджень прийнято коефіцієнт ефективності перемішування. Діапазони варіювання факторів встановлювалися з урахуванням конструктивних особливостей дослідного обладнання та технологічних вимог до процесу приготування будівельних розчинів. Частота обертання вала змінювалася у межах 20, 40 та 60 об/хв, що відповідає мінімальному, номінальному та максимальному режимам роботи приводу. Коефіцієнт заповнення змішувального барабана приймав значення 0,5; 0,75 та 1,0, що дозволило оцінити вплив ступеня завантаження на ефективність перемішування. Рухливість будівельного розчину визначалась за допомогою стандартного конуса і становила 8, 10 та 12 см, що відповідає типовим технологічним параметрам будівельних розчинів, які застосовуються у практиці будівельного виробництва. Діапазони варіювання змінними приведені у табл. 3.1, а матриця планування експериментів – у табл. 3.2.

Таблиця 3.1 – Діапазони варіювання змінними експерименту

Характеристика	Кодове позначення фактора	Частота обертання валу	Коефіцієнт заповнення бункера	Рухомість розчину
		хв <sup>-1</sup>	-	см
Верхній рівень	1	60	1	12
Нульовий рівень	0	40	0,75	10
Нижній рівень	-1	20	0,5	8

Матриця планування експерименту представлена у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Матриця планування експерименту

№ дослідження	Частота обертання валу	Коефіцієнт заповнення бункера	Рухомість розчину	Коефіцієнт якості змішування
1	+	+	+	0,528
2	–	+	+	0,172
3	+	–	+	0,623
4	–	–	+	0,582
5	+	+	–	0,918
6	–	+	–	0,607
7	+	–	–	0,937
8	–	–	–	0,498
9	+	0	0	0,955
10	–	0	0	0,163
11	0	+	0	0,543
12	0	–	0	0,571
13	0	0	+	0,536
14	0	0	–	0,589
15	0	0	0	0,856
16	0	0	0	0,959
17	0	0	0	0,903

У результаті обробки експериментальних даних отримано рівняння регресії в кодованому вигляді, згідно розв'язків якого побудовано графічні залежності:

$$Y = 0,7389 + 0,194x_1 - 0,0443x_2 - 0,1108x_3 - 0,0545x_1^2 - 0,0565x_2^2 + 0,051x_3^2 + 0,0234x_1x_2 - 0,0441x_1x_3 - 0,0744x_2x_3. \quad (3.1)$$

Адекватність побудованої функціональної залежності між потужністю змішувача та тривалістю процесу змішування перевірялась шляхом розрахунку критерію Фішера  $F_p$  та порівняння його з табличним (граничним) значенням  $[F_p]$ . Модель вважається адекватною, якщо виконується умова [99]

$$F_p < [F_p]. \quad (3.2)$$

Граничне значення критерію Фішера для прийнятого рівня значущості та числа ступенів вільності становить

$$[Fp]=18,9. \quad (3.3)$$

Розрахункове значення критерію визначається за співвідношенням:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}, \quad (3.4)$$

де  $S_{ad}^2$  – дисперсія адекватності (залишкова дисперсія моделі);  
 $S_y^2$  – дисперсія повторюваності (дисперсія у нульовій точці).

У результаті обробки експериментальних даних отримано:

$$S_y^2 = 0,0033, \quad S_{ad}^2 = 0,0281. \quad (3.5)$$

Підставивши значення у формулу, одержуємо:

$$F_p = \frac{0,0281}{0,0033} = 8,44. \quad (3.6)$$

Оскільки отримане розрахункове значення критерію  $F_p=8,44$  менше за табличне  $[Fp]=18,9$ , можна зробити висновок, що побудована регресійна модель є адекватною. Це свідчить про те, що математичний опис задовільно відображає експериментальні дані та коректно характеризує залежність потужності від тривалості приготування будівельних розчинів у розчинозмішувачі.

На рисунку 3.4 вказано залежності коефіцієнта якості змішування від рухомості розчину.

Характер залежності, наведеної на рисунку 3.4, свідчить про зниження коефіцієнта якості змішування із зростанням рухомості розчину від 8 до 12 см. Найвищі значення коефіцієнта спостерігаються при коефіцієнті заповнення бункера 0,75, що свідчить про оптимальне поєднання об'єму розчину та інтенсивності її перемішування. За подальшого збільшення заповнення до одиниці коефіцієнт якості помітно зменшується, що пояснюється зниженням інтенсивності взаємодії частинок розчину в умовах обмеженого простору. Таким чином, для частоти обертання 40 об/хв доцільним є використання коефіцієнта заповнення бункера близько 0,75, оскільки він забезпечує найвищу якість змішування при середній рухомості розчину.

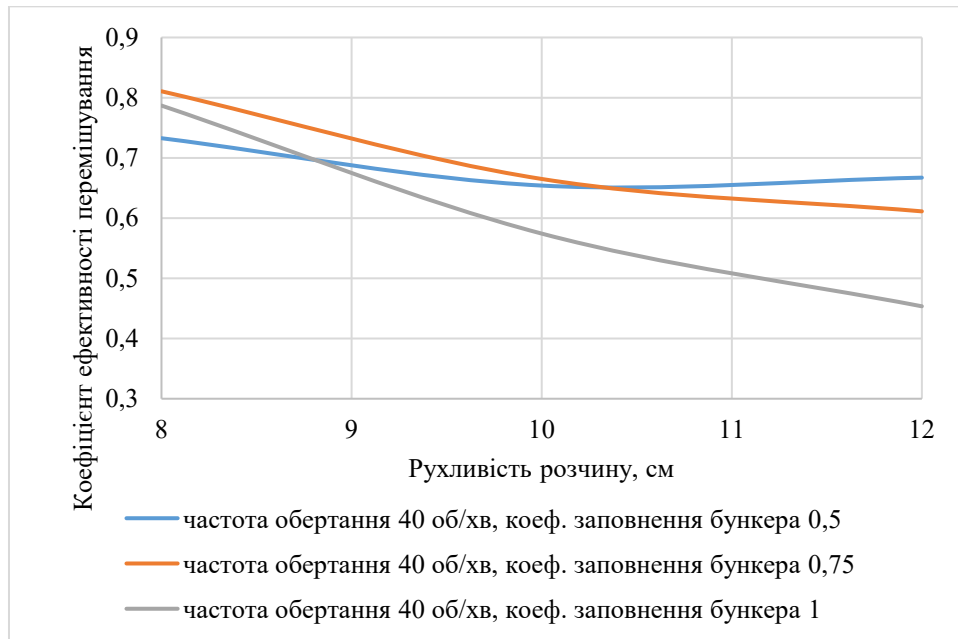


Рисунок 3.4 – Залежності коефіцієнта якості змішування від рухомості розчину, см

На рисунку 3.5 вказано залежності коефіцієнта якості змішування розчину від частоти обертання валу змішувача.

Характер залежності, наведеної на рисунку 3.5, свідчить про зростання коефіцієнта якості змішування із підвищенням частоти обертання валу змішувача у діапазоні від 20 до 60 об/хв. Найбільші значення коефіцієнта спостерігаються при найменшій рухомості розчину (8 см), що пояснюється більш інтенсивною взаємодією компонентів розчину за підвищеної в'язкості. Зі збільшенням рухомості до 10 і 12 см ефективність змішування дещо знижується, оскільки надмірна плинність розчину зменшує турбулентність та контакт між частинками. Таким чином, оптимальні умови досягаються при частоті обертання лопаток близько 45 об/хв і рухомості розчину 8–10 см, за яких забезпечується найвищий рівень однорідності розчину.

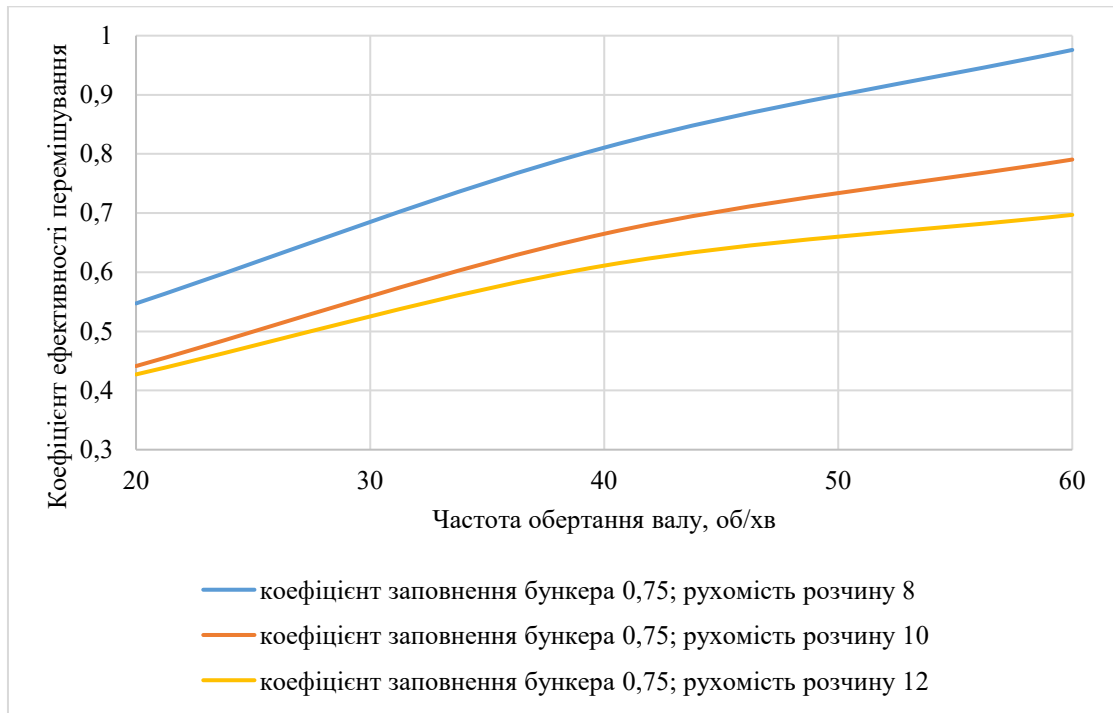


Рисунок 3.5 – Залежність коефіцієнта якості змішування від частоти обертання валу змішувача, об/хв

На рисунку 3.6 вказано залежності коефіцієнта якості змішування розчину від заповнення бункера.

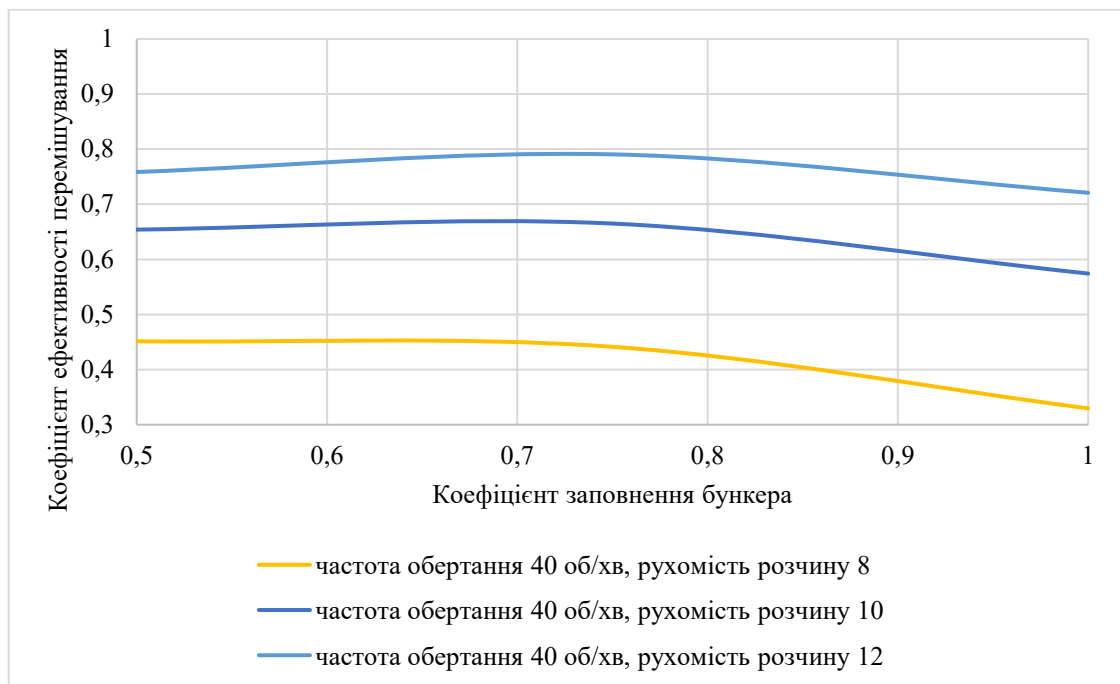


Рисунок 3.6 – Залежність коефіцієнта якості змішування від заповнення бункера

Характер залежності, наведеної на рисунку 3.6, свідчить, що зі збільшенням коефіцієнта заповнення бункера спостерігається тенденція до зниження коефіцієнта якості змішування. Для всіх значень рухомості розчину найвищі показники якості змішування досягаються при заповненні бункера в межах 0,6–0,75, після чого ефективність поступово зменшується. Це пояснюється тим, що при надмірному заповненні об'єм розчину обмежує вільний рух лопатей і знижує інтенсивність перемішування, тоді як при недостатньому заповненні зменшується кількість контактів між частинками розчину. Найкращі результати спостерігаються за рухомості розчину 10 см, що свідчить про доцільність вибору середнього рівня заповнення бункера для забезпечення максимальної якості змішування.

У результаті аналізу отриманих експериментальних даних встановлено раціональні діапазони параметрів, за яких досягається найвища ефективність змішування будівельного розчину у змішувачі з примусової дії. Оптимальна частота обертання валу становить  $n = 35 \dots 50$  об/хв, що забезпечує інтенсивне перемішування компонентів без надмірного розбризкування розчину. Найкращі показники якості спостерігаються за коефіцієнта заповнення бункера  $\varphi = 0,7 \dots 0,8$ , коли об'єм розчину є достатнім для ефективної взаємодії частинок, але не перешкоджає вільному руху лопатей. Встановлено, що раціональна рухливість будівельного розчину відповідає діапазону  $P = 8 \dots 10$  см. За більшої рухливості знижується інтенсивність турбулентного перемішування, тоді як за меншої рухливості зростає опір переміщенню суміші, що ускладнює процес її гомогенізації. Таким чином, поєднання зазначених параметрів забезпечує ефективне перемішування та досягнення необхідної однорідності розчинної суміші.

Рисунок 3.7 ілюструє просторову залежність коефіцієнта якості змішування від частоти обертання валу та рухомості розчину. Із зростанням частоти обертання спостерігається покращення інтенсивності перемішування,

що зумовлює підвищення коефіцієнта якості. Найвищі значення коефіцієнта якості спостерігаються у зоні поєднання підвищеної частоти обертання валу і достатньої рухомості розчину, що відповідає оптимальним умовам перебігу процесу змішування.

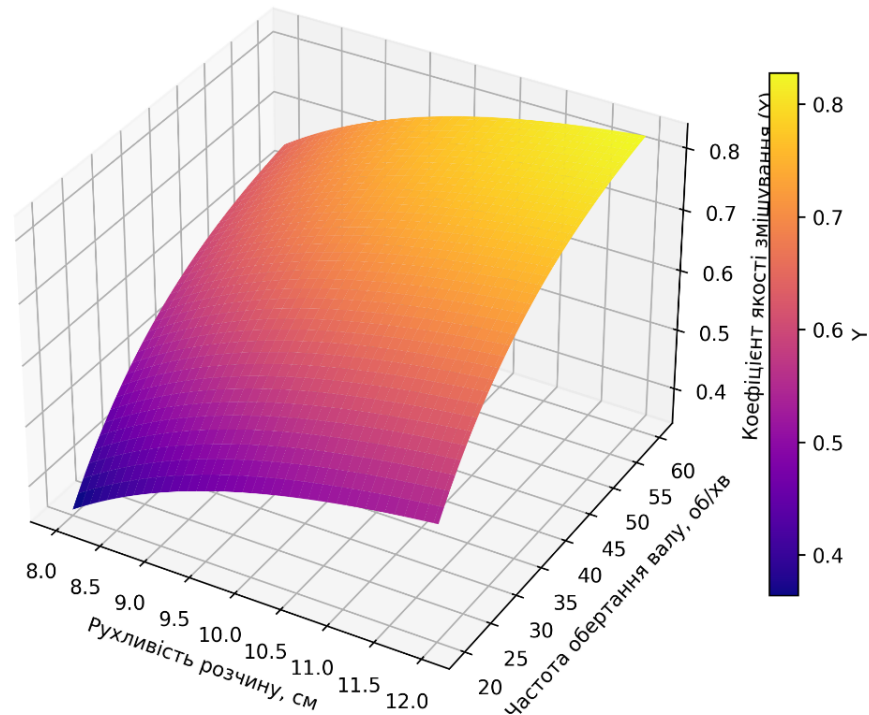


Рисунок 3.7 – Залежності коефіцієнта якості змішування від частоти обертання валу і рухомості розчину

### 3.5 Експериментальні дослідження процесу змішування будівельних розчинів

Для оцінювання впливу режимів роботи розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока на якість приготування будівельних розчинів проведено серію експериментальних досліджень для вивчення впливу частоти обертання робочого органу, коефіцієнта заповнення бункера та тривалості змішування на однорідність і рухливість готового розчину, що зображено на рисунку 3.8. Отримані результати дозволили визначити закономірності зміни

показників ефективності перемішування залежно від параметрів приводу мотоблока та технологічних режимів роботи змішувача [101].



Рисунок 3.8 – Змішування будівельного розчину при різних режимах роботи

У табл. 3.3 представлено результати випробувань на однорідність будівельного розчину при різних значеннях тривалості змішування та частоти обертання вала, що приводиться в дію від мотоблока.

Аналіз отриманих теоретичних залежностей свідчить, що раціональні режими роботи розчинозмішувача відповідають діапазону частот обертання, за якого забезпечується найбільш сприятливе співвідношення між продуктивністю, енерговитратами та однорідністю розчинної суміші. У цьому діапазоні механічний вплив робочого органа є достатнім для подолання сил внутрішнього тертя, активізації циркуляції матеріалу та інтенсифікації процесу перемішування без істотного збільшення енерговитрат.

Таблиця 3.3 – Результати оцінювання однорідності будівельного розчину залежно від тривалості змішування та частоти обертання вала змішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока

Час змішування, $t_s$	Частота обертання, № точки проби	Вміст компонентів у пробі, г			Середнє значення маси компонентів, г			Відхилення від середнього значення, %			
		пісок	цемент	вода	пісок	цемент	вода	пісок	цемент	вода	
		$m_n$	$m_{\text{ц}}$	$m_{\text{в}}$	$m_n^{\text{cp}}$	$m_{\text{ц}}^{\text{cp}}$	$m_{\text{в}}^{\text{cp}}$				
2	20	1	150.60	43.20	21.81	144,92	42,21	21,59	3.919	2.345	1.019
		2	149.15	42.77	21.74				2.919	1.327	0.695
		3	138.68	42.64	21.70				4.306	1.019	0.509
		4	139.29	41.15	21.34				3.885	2.511	1.158
		5	146.86	41.28	21.36				1.339	2.203	1.065
	40	1	144.10	41.61	19.09	140,16	40,97	18,93	2.811	1.562	0.845
		2	142.99	40.22	18.76				2.019	1.831	0.898
		3	135.65	41.33	19.02				3.218	0.879	0.475
		4	141.21	41.23	18.98				0.749	0.635	0.264
		5	136.87	40.45	18.82				2.347	1.269	0.581
	60	1	130.89	39.90	17.17	134,02	39,44	17,10	2.335	1.166	0.409
		2	131.46	39.74	17.15				1.910	0.761	0.292
		3	136.41	38.92	17.14				1.783	1.318	0.234
		4	135.69	39.58	17.04				1.246	0.355	0.351
		5	135.63	39.04	17.02				1.201	1.014	0.468
4	20	1	149.28	43.27	20.34	145,41	42,32	20,58	2.661	2.245	1.166
		2	148.54	43.02	20.40				2.153	1.654	0.875
		3	147.30	42.75	20.75				1.300	1.016	0.826
		4	140.60	41.25	20.72				3.308	2.528	0.680
		5	141.32	41.33	20.70				2.813	2.339	0.583
	40	1	144.12	42.08	19.22	141,12	41,25	19,4	2.126	2.012	0.928
		2	143.55	40.30	19.53				1.722	2.303	0.670
		3	137.56	41.72	19.29				2.523	1.139	0.567
		4	142.17	40.64	19.48				0.744	1.479	0.412
		5	138.20	41.53	19.47				2.069	0.679	0.361
	60	1	132.81	40.29	18.10	135,9	39,73	18,02	2.274	1.410	0.444
		2	138.12	39.03	17.92				1.634	1.762	0.555
		3	134.05	40.06	18.07				1.361	0.831	0.277
		4	137.29	39.98	18.05				1.023	0.629	0.166
		5	137.24	39.31	17.96				0.986	1.057	0.333
6	20	1	140.49	43.08	21.74	144,48	42,41	21,64	2.762	1.580	0.462
		2	147.23	42.95	21.71				1.903	1.273	0.323
		3	146.55	41.65	21.51				1.433	1.792	0.601
		4	142.30	41.75	21.68				1.509	1.556	0.185
		5	145.85	42.62	21.54				0.948	0.495	0.462
	40	1	143.44	41.31	19.06	142,45	41,6	19,01	0.695	0.697	0.263
		2	143.22	41.83	18.95				0.541	0.553	0.316
		3	142.92	41.42	19.04				0.330	0.433	0.158
		4	141.27	41.73	18.97				0.828	0.312	0.210
		5	141.42	41.72	19.03				0.723	0.288	0.105
	60	1	137.66	40.52	18.45	137,13	40,34	18,5	0.386	0.446	0.270
		2	137.51	40.13	18.54				0.277	0.521	0.216
		3	137.41	40.43	18.47				0.204	0.223	0.162
		4	136.50	40.41	18.52				0.459	0.174	0.108
		5	136.56	40.21	18.50				0.416	0.322	0.000

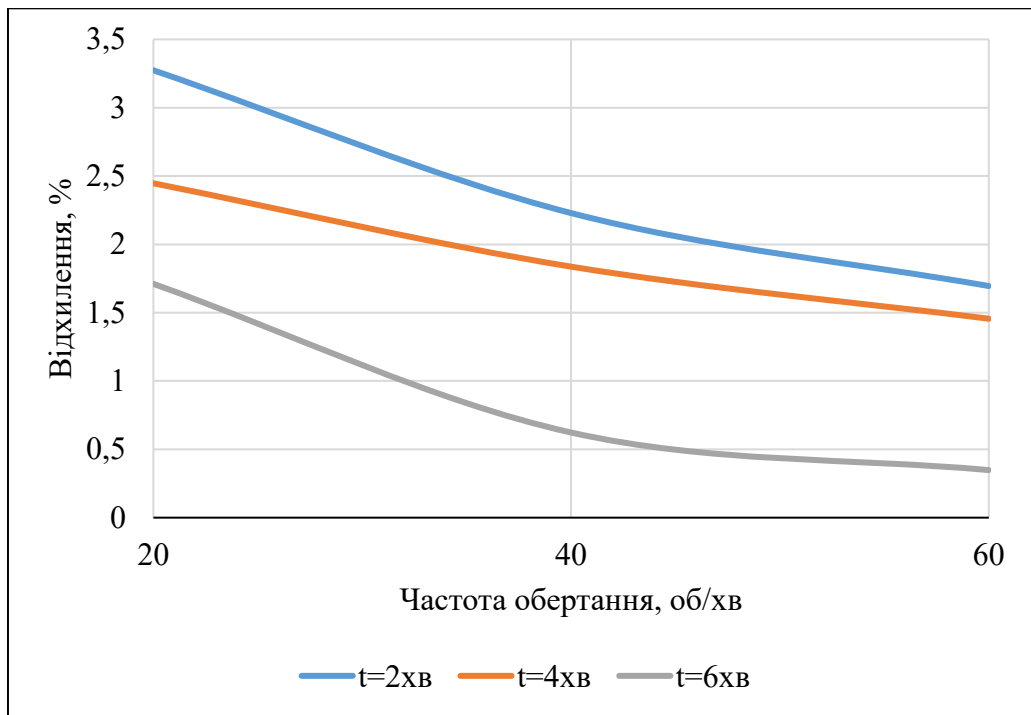


Рисунок 3.9 – Нерівномірність розподілу піску залежно від часу змішування будівельного розчину

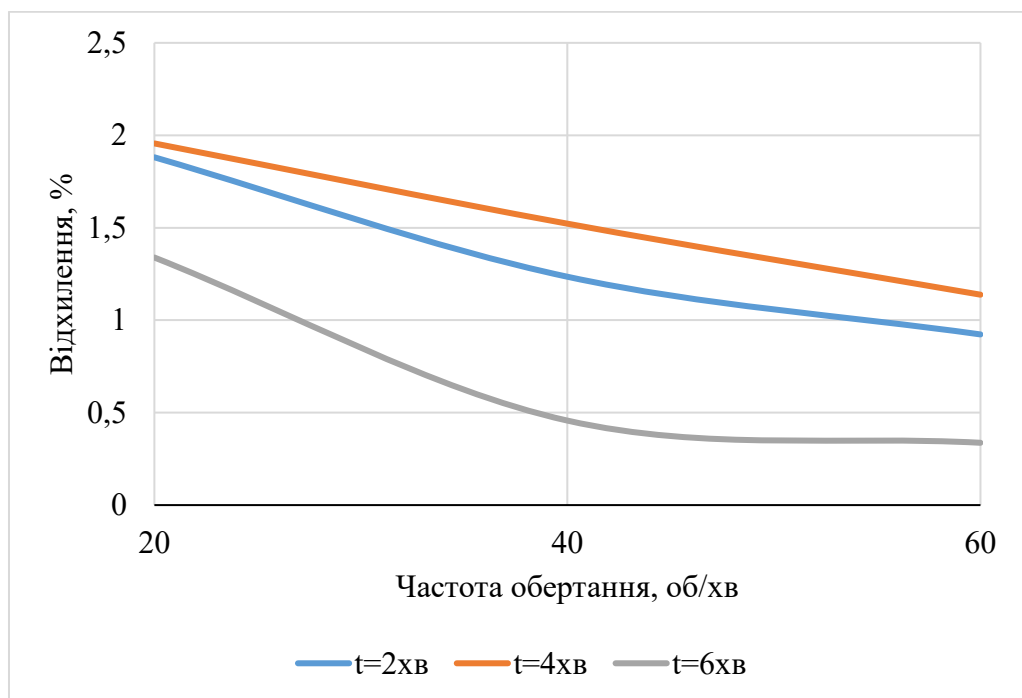


Рисунок 3.10 – Нерівномірність розподілу цементу залежно від часу змішування будівельного розчину

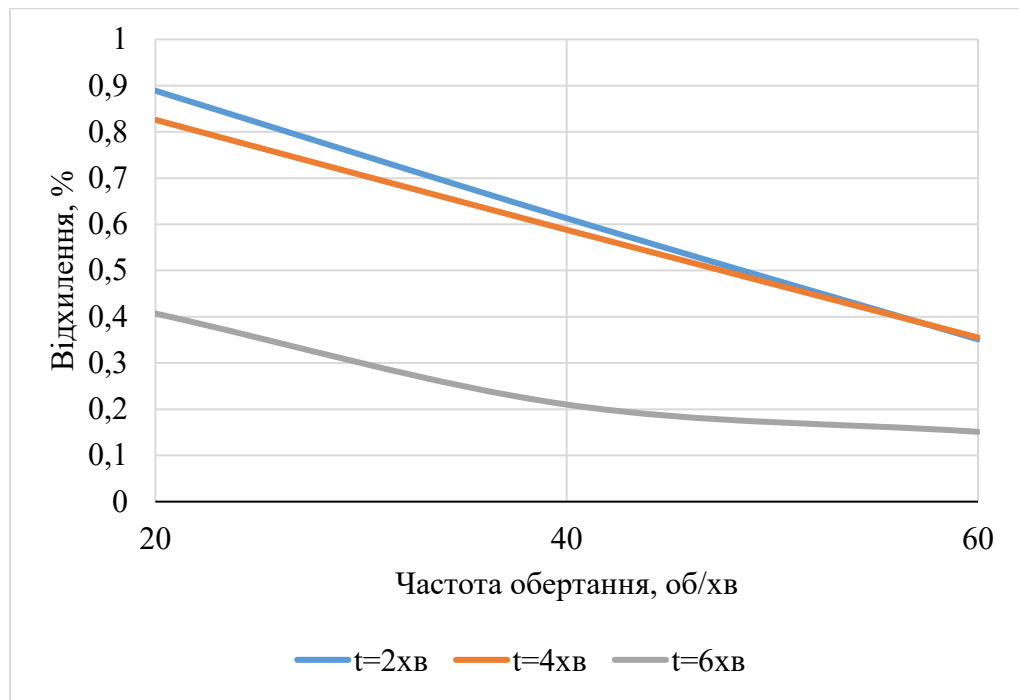


Рисунок 3.11 – Нерівномірність розподілу води залежно від часу змішування будівельного розчину

Аналіз графічних залежностей, наведених на рисунках 3.9–3.11, дозволяє встановити закономірності зміни коефіцієнта ефективності змішування залежно від тривалості процесу та частоти обертання робочого органа. На початковому етапі процесу відбувається інтенсивне зростання коефіцієнта ефективності, що відповідає активній стадії перемішування та швидкому зменшенню початкової неоднорідності розчину. Подальше збільшення тривалості змішування супроводжується поступовим виходом коефіцієнта ефективності на квазістаціонарний рівень, що характерно для стану, за якого основна маса розчину набуває рівномірного розподілу компонентів у робочому об'ємі змішувача.

Зі збільшенням частоти обертання робочого органа спостерігається загальне підвищення рівномірності змішування, однак після досягнення певного граничного значення приріст ефективності зменшується. Така залежність узгоджується з відомими закономірностями перебігу інерційних і вихрових

процесів у змішувачах періодичної дії та свідчить про наявність раціонального діапазону швидкісних режимів перемішування.

Порівняльний аналіз отриманих результатів показує, що максимальні значення ефективності змішування досягаються за узгодженого поєднання інтенсивності механічного впливу та тривалості процесу. Надмірне підвищення частоти обертання без відповідного коригування часу змішування не забезпечує істотного покращення показників однорідності, тоді як раціональне поєднання зазначених параметрів дозволяє суттєво підвищити якість перемішування розчину.

Для оцінювання міцнісних характеристик будівельного розчину виготовлялися контрольні зразки кубічної форми, які тверднули протягом 28 діб до досягнення нормативної міцності відповідно до вимог чинних стандартів [100]. Зразки формувалися з проб розчину, отриманих за різних режимів змішування у розчинозмішувачі з приводом від валу трансмісії мотоблока. Результати випробувань на стиск підтвердили, що рівномірність розподілу компонентів у свіжому розчині істотно впливає на міцність затверділого матеріалу. Зменшення неоднорідності розчинної суміші супроводжується підвищенням міцності контрольних зразків та зниженням варіації її значень, що свідчить про більш рівномірний розподіл компонентів у процесі змішування.

Отримані результати експериментальних досліджень свідчать, що підвищення частоти обертання вала змішувача, який приводиться в рух від валу трансмісії мотоблока, сприяє скороченню часу досягнення необхідної однорідності будівельного розчину. Водночас встановлено, що перевищення раціонального діапазону швидкості обертання понад 30–40 об/хв супроводжується зниженням ефективності процесу перемішування, що проявляється у зростанні енергетичних витрат та погіршенні рівномірності розподілу компонентів розчину.

Таблиця 3.4 – Результати випробування контрольних зразків будівельного розчину на стиск після 28 діб

Час змішування, t, с	Частота обертання, n, ХВ. <sup>-1</sup>	Границя міцності при стисканні, $\sigma_{cm}$ , МПа						Максимальне відхилення від середнього значення, %
		$\sigma_{cm}^1$	$\sigma_{cm}^2$	$\sigma_{cm}^3$	$\sigma_{cm}^4$	$\sigma_{cm}^5$	$\sigma_{cm}^{cp}$	
120	20	24,24	23,28	23,37	23,61	21,88	23,276	5,998
	40	26,38	24,82	25,67	24,79	23,65	25,062	5,634
	60	20,28	21,04	20,18	20,51	19,49	20,300	3,990
240	20	23,87	25,66	24,71	25,28	25,20	24,944	4,306
	40	26,88	25,67	26,00	27,10	25,77	26,284	3,105
	60	21,69	21,70	22,61	21,61	21,93	21,908	3,204
360	20	22,62	22,41	21,98	23,13	22,18	22,464	2,965
	40	24,47	23,52	24,05	23,80	24,24	24,016	2,065
	60	27,50	27,88	27,28	27,81	27,00	27,494	1,797

У зв'язку з цим для забезпечення належної якості розчину та запобігання перевантаженню приводу доцільно застосовувати частоту обертання в зазначеному діапазоні, за якої повноцінне перемішування досягається протягом приблизно 4 хвилин. Отримані результати узгоджуються з попередніми експериментальними даними та підтверджують ефективність застосування розробленої конструкції розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока у технологічних умовах будівельного виробництва.

### 3.6 Експериментальні дослідження споживаної потужності розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока

Під час експериментальних досліджень використовувалася цементно-піщана суміш складу 1:3, яка є однією з найбільш поширених при приготуванні кладочних і штукатурних розчинів. Орієнтовний об'єм завантаження суміші становив 0,25 м<sup>3</sup>. Частота обертання вала змішувача підтримувалася на рівні 40

об/хв, що відповідало середньому діапазону навантаження двигуна мотоблока. Загальна тривалість робочого циклу, який включав завантаження компонентів, основне перемішування та завершальну стадію процесу, становила близько 6 хвилин. Компоненти розчину подавалися у визначеній технологічній послідовності: спочатку вода, потім пісок і цемент, що забезпечувало рівномірніше змочування частинок та зменшення налипання матеріалу на внутрішні поверхні змішувача.

Вимірювання споживаної потужності під час експерименту здійснювалося за допомогою ватметра, встановленого в силовому колі двигуна мотоблока через перетворювач енергетичних параметрів. Це забезпечувало можливість реєстрації зміни потужності в режимі реального часу та фіксації короткочасних коливань навантаження на різних етапах роботи змішувача. Реєстрація показників виконувалася з інтервалом 1 с, що дозволило побудувати детальну залежність зміни споживаної потужності протягом усього технологічного циклу. Для підвищення достовірності результатів вимірювання проводилися багаторазово з подальшим статистичним усередненням отриманих значень.

На початковому етапі роботи, який тривав близько 30 с, здійснювався пуск двигуна мотоблока та перевірка роботи передавального механізму без навантаження. У цей період споживана потужність не перевищувала 450 Вт, що визначалося втратами на тертя в підшипникових вузлах і елементах передачі. Подальше зростання потужності спостерігалось під час завантаження води, піску та цементу, яке тривало в інтервалі 30–180 с. Подача води не створювала значного додаткового навантаження на привід, тому середнє значення потужності становило близько 600 Вт. Після введення піску споживана потужність зростає до 850 Вт, а під час завантаження цементу – до 950 Вт, що зумовлено збільшенням опору обертанню робочого органа внаслідок накопичення сипких матеріалів у нижній частині змішувального барабана.

Після завершення завантаження розпочинався основний етап змішування компонентів, тривалість якого становила приблизно 3 хвилини. На початковій

фазі змішування (180–240 с) розчин характеризувався неоднорідною структурою, що супроводжувалося підвищенням крутного моменту на валу змішувача та зростанням споживаної потужності до 1100 Вт. Максимальні значення потужності фіксувалися в інтервалі 240–300 с, коли відбувалося інтенсивне перемішування та формування однорідної пластичної структури розчину; у цей період потужність досягала 1200–1250 Вт. У подальшому, зі зменшенням внутрішнього опору розчину внаслідок вирівнювання її структури, навантаження на привід поступово знижувалося. На завершальній стадії процесу (360–420 с) споживана потужність змінювалася незначно й утримувалася на рівні близько 950 Вт. Це свідчить про завершення інтенсивного перемішування та досягнення усталеного режиму роботи розчинозмішувача, за якого подальше змішування не приводить до істотних змін властивостей суміші.

Таблиця 3.5 – Зміна споживаної потужності розчинозмішувача під час циклу роботи

Час, с	Етап роботи	Орієнтовна потужність, Вт
0-30	Холостий хід (робота без навантаження)	450
30-60	Завантаження води	600
60-90	Завантаження піску	850
90-120	Завантаження цементу	950
120-240	Початок перемішування (неоднорідний розчин)	1100
240-300	Інтенсивне перемішування	1250
300-360	Досягнення усталеного режиму змішування	1150
360-420	Завершення змішування	950

Отримані результати наведено в таблиці 3.5, у якій подано усереднені значення споживаної потужності на окремих етапах роботи розчинозмішувача. Залежність споживаної потужності від часу роботи наведено на рис. 3.10. Із графіка видно, що після пуску привода потужність поступово зростає, досягаючи максимального значення на стадії найбільш інтенсивного перемішування, після

чого змінюється незначно та виходить на усталений режим. Це свідчить, що найбільші енерговитрати припадають на період активного руйнування структурних зв'язків у розчинній суміші та інтенсивного перерозподілу її компонентів.

На підставі результатів експериментальних досліджень встановлено, що динаміка зміни споживаної потужності має характер, типовий для змішувачів механічної дії. Порівняно невисокий рівень енергоспоживання на холостому ходу істотно зростає під час введення твердих компонентів розчину та досягає максимального значення на стадії формування щільної цементно-піщаної структури [102]. У подальшому, зі зменшенням початкової неоднорідності розчину та інтенсифікацією взаємного переміщення її частинок, навантаження на привід поступово знижується. Встановлена закономірність свідчить про нормальний характер перебігу процесу змішування, оскільки зменшення опору наприкінці циклу є ознакою досягнення необхідного ступеня рівномірності розподілу компонентів у робочому об'ємі змішувача.

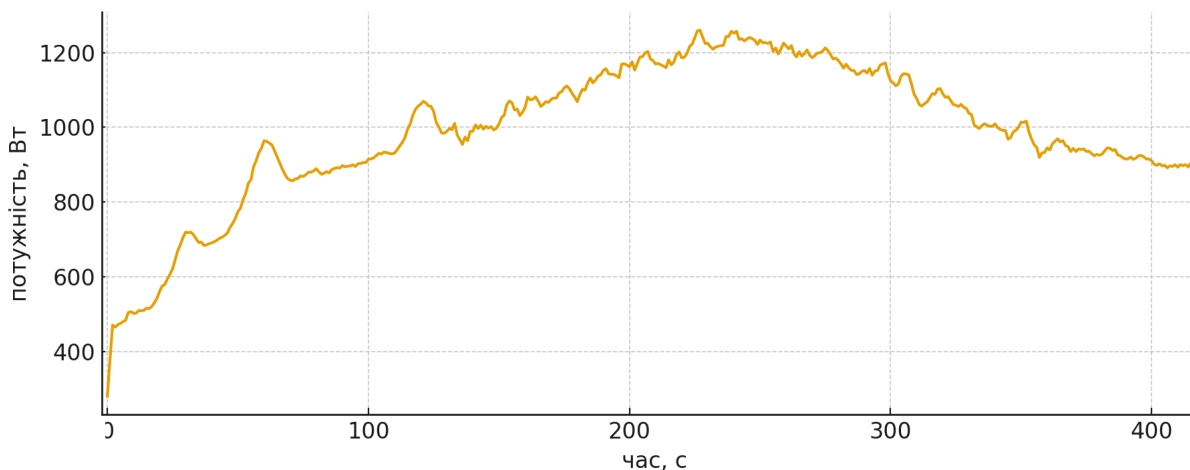


Рисунок 3.12 – Споживана потужність розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока

Проведені експериментальні дослідження підтверджують ефективність запропонованої конструкції розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії

мотоблока та дозволяють кількісно оцінити енергетичні витрати під час його роботи. Отримані результати свідчать, що динаміка зміни споживаної потужності безпосередньо пов'язана зі структурно-механічними властивостями розчину та послідовністю виконання технологічних операцій, причому максимальні навантаження на привід спостерігаються на стадіях введення сипких компонентів і інтенсивного перемішування. Запропонована схема приводу забезпечує сталість роботи змішувального механізму та прогнозований характер зміни навантаження, при цьому рівень енергоспоживання залишається прийнятним для використання обладнання в умовах автономного або сільськогосподарського будівництва.

### **3.7 Дослідження продуктивності та енергетичної ефективності розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока**

Проведені експериментальні дослідження роботи розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока дозволили отримати залежності продуктивності та коефіцієнта корисної дії змішувального обладнання від частоти обертання валу змішувача. Отримані результати відображають закономірності впливу кінематичних параметрів на ефективність функціонування змішувача та дозволяють визначити раціональні діапазони частот обертання робочого органу, за яких забезпечується найбільш ефективний і технологічно доцільний режим роботи розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока.

Рисунок 3.13 показує, що продуктивність розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока зростає практично лінійно в діапазоні частот обертання 20–35 об/хв, що свідчить про інтенсифікацію механічного переміщення будівельного розчину в робочому об'ємі змішувача. У зазначеному діапазоні забезпечується найбільш ефективне використання робочого об'єму змішувача та раціональне використання потужності приводу. Поблизу 40 об/хв

продуктивність досягає максимального значення, що пояснюється раціональною кінематичною дією робочого органа. Подальше підвищення частоти обертання не супроводжується приростом продуктивності та призводить до її незначного зниження, що пов'язано з переходом частини розчину до режиму сумісного руху зі стінками барабана та утворенням зон зі зниженою інтенсивністю перемішування.

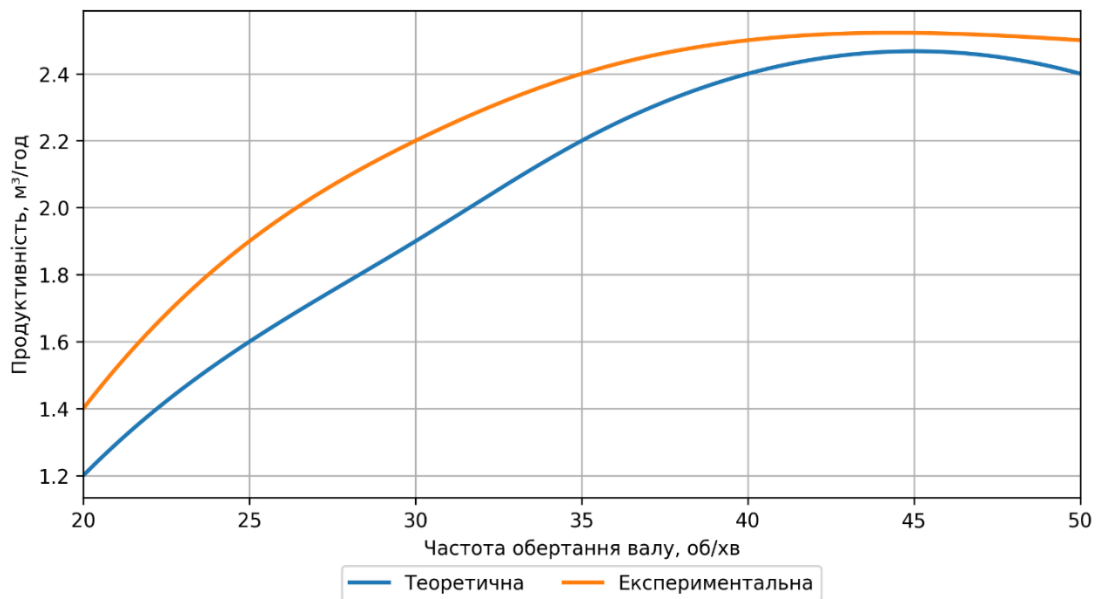


Рисунок 3.13 – Залежність продуктивності від частоти обертання валу

Перевищення експериментальної кривої над теоретичною у середньочастотному діапазоні пояснюється впливом динамічних особливостей роботи привода мотоблока, зокрема нерівномірністю крутного моменту та наявністю мікроколивань, які сприяють додатковій активації процесу руйнування структурних зчеплень між частинками розчину. За результатами аналізу встановлено, що раціональний режим роботи розчинозмішувача щодо забезпечення максимальної продуктивності відповідає частоті обертання 35–40 об/хв.

Рисунок 3.14 відображає залежність коефіцієнта корисної дії розчинозмішувача від частоти обертання вала привода мотоблока. У діапазоні 20–35 об/хв спостерігається зростання коефіцієнта корисної дії, що обумовлено

зменшенням питомих енергетичних втрат та збільшенням частки потужності, яка безпосередньо витрачається на процес перемішування. У діапазоні 40–45 об/хв коефіцієнт корисної дії досягає максимальних значень і набуває квазісталого характеру, що свідчить про досягнення оптимального співвідношення між інтенсивністю переміщення частинок розчину та опором їх взаємодії.

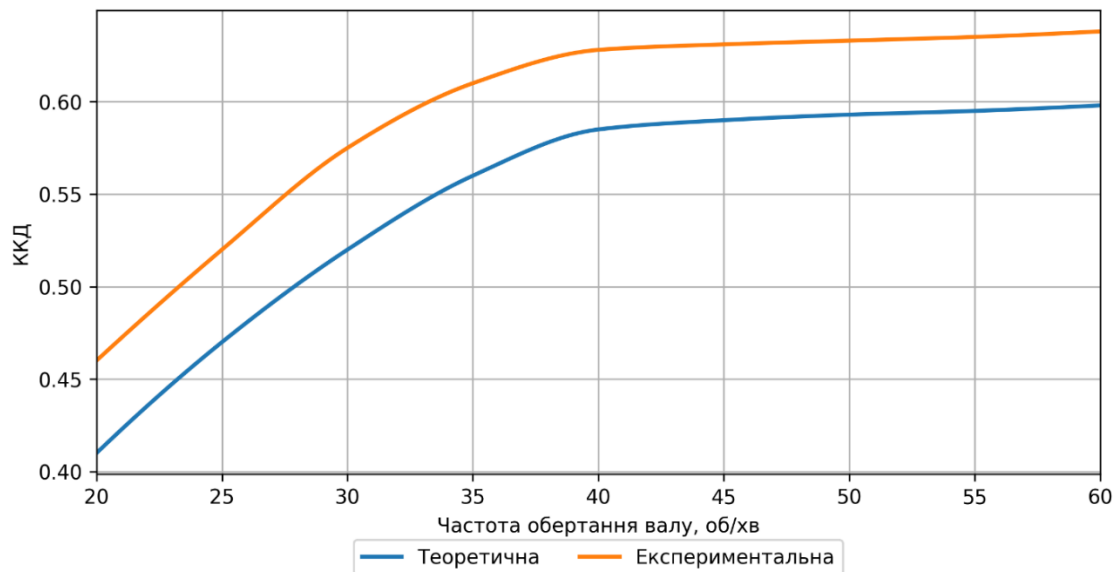


Рисунок 3.14 – Залежність ККД від частоти обертання валу

Подальше збільшення частоти обертання понад 45 об/хв супроводжується зниженням коефіцієнта корисної дії внаслідок зростання інерційних навантажень, появи вторинних потоків і підкидання розчину, які не беруть участі у формуванні її однорідної структури. Розташування експериментальної залежності вище теоретичної в усьому досліджуваному діапазоні пояснюється впливом динамічних режимів роботи привода мотоблока, що додатково інтенсифікують процес перемішування.

Таким чином, за результатами експериментальних досліджень роботи розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока визначено раціональні діапазони робочих параметрів: частота обертання вала 35–40 об/хв забезпечує максимальну продуктивність, а інтервал 35–45 об/хв відповідає найвищим значенням коефіцієнта корисної дії. Отримані експериментальні

залежності узгоджуються з теоретичними розрахунками, причому розбіжність між ними не перевищує 10 %, що підтверджує достовірність результатів досліджень і адекватність застосованих математичних моделей опису процесу змішування.

### **3.8 Висновки до розділу 3**

1. Встановлено закономірності зміни ефективності змішування будівельних розчинів залежно від частоти обертання робочого органа, коефіцієнта заповнення змішувача та рухливості розчину.

2. Визначено, що раціональна частота обертання вала змішувача становить 35–40 об/хв, за якої забезпечується максимальна продуктивність і необхідна однорідність розчину.

3. Показано, що коефіцієнт заповнення змішувального об'єму 0,75–1 забезпечує найбільш ефективне використання робочого простору змішувача та підвищення інтенсивності перемішування.

4. Встановлено взаємозв'язок між однорідністю будівельного розчину та міцністю контрольних зразків після тверднення, що підтверджує визначальний вплив якості змішування на кінцеві властивості матеріалу.

5. Визначено характер зміни споживаної потужності протягом циклу змішування, при якому максимальні навантаження відповідають стадіям введення сипучих компонентів та інтенсивного перемішування.

6. Підтверджено узгодженість експериментальних результатів із теоретичними залежностями, причому розбіжність між ними не перевищує 10 %.

## **РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗЧИНОЗМІШУВАЧА З ПРИВОДОМ ВІД ВАЛУ ТРАНСМІСІЇ МОТОБЛОКА**

### **4.1 Експериментальна перевірка експлуатаційних характеристик розробленого обладнання**

У результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень розроблено та впроваджено розчинозмішувач з приводом від валу трансмісії мотоблока, призначений для приготування будівельних розчинів в умовах автономного енергозабезпечення та обмежених виробничих ресурсів будівельного майданчика. Основною метою експериментальної перевірки було встановлення експлуатаційних характеристик обладнання, оцінювання ефективності процесу змішування та визначення особливостей функціонування привідної системи за різних режимів роботи.

Розроблений розчинозмішувач змонтовано на несній рамі та кінематично з'єднано з ходовою частиною мотоблока за допомогою спеціально спроектованого важільного редуктора, який забезпечує передавання обертального моменту від колеса мотоблока до вала змішувального барабана. Запропонована кінематична схема приводу дозволяє використовувати механічну енергію руху мотоблока як основне джерело приводу змішувального органа без застосування електричних або гідравлічних приводів.

Підготовка до проведення експериментальних досліджень передбачала регулювання передатного відношення привідного механізму, встановлення вимірювальних датчиків для реєстрації частоти обертання робочого органу та визначення тривалості робочого циклу змішування. Дослідження виконувалися при зміні швидкості руху мотоблока в діапазоні 2–6 км/год, що відповідало частоті обертання змішувального органа в межах 20–60 об/хв та забезпечувало

можливість оцінювання впливу кінематичних параметрів приводу на інтенсивність перемішування компонентів будівельного розчину.



Рисунок 4.1 – Розчинозмішувач з приводом від валу трансмісії мотоблоку

Під час експериментальних досліджень особливу увагу приділяли рівномірності передавання крутного моменту від ходового колеса мотоблока до змішувального вала, а також можливості регулювання процесу приготування розчину без зупинки основного приводу машини. За результатами випробувань встановлено, що привідна система забезпечує рівномірне обертання змішувального органа без прослизання та ударних навантажень, що підтверджує узгодженість параметрів кінематичної передачі з режимами роботи змішувача.

Конструктивне виконання вузла приєднання розчинозмішувача до мотоблока забезпечує зручність монтажу та демонтажу обладнання, що розширює можливості його використання під час виконання будівельних робіт в умовах обмеженого доступу до стаціонарних джерел електропостачання, а також у разі необхідності швидкого переміщення між робочими ділянками.

Результати експериментальних досліджень підтвердили працездатність розробленої привідної системи та її здатність забезпечувати рівномірне передавання крутного моменту до змішувального органа і необхідну інтенсивність перемішування будівельного розчину за різних режимів навантаження. Проведені вимірювання дозволили встановити закономірності зміни основних режимних параметрів, зокрема частоти обертання змішувального вала, крутного моменту на привідному валу, тривалості циклу змішування, витрати палива мотоблока та продуктивності установки.

На основі отриманих експериментальних результатів сформовано узагальнену таблицю технічних характеристик дослідного зразка розчинозмішувача примусової дії з приводом від валу трансмісії мотоблока. Наведені параметри характеризують експлуатаційні можливості розробленого обладнання та підтверджують доцільність його застосування для приготування будівельних розчинів в умовах автономного енергозабезпечення будівельних майданчиків.

Таблиця 4.1 – Технічні характеристики розчинозмішувача з приводом від мотоблока

Найменування показників	Одиниці виміру	Значення показників
Тип бетонозмішувача	-	Примусової дії
Ємність барабана	м <sup>3</sup>	0,35
Об'єм готового розчину	м <sup>3</sup>	0,25
Частота обертання валу	об/хв	30-40
Продуктивність за годину	м <sup>3</sup> /год	2-3
Потужність мотоблока	к.с.	12
Клас мотоблоку	-	важкий
Тип палива	-	дизель
Система запуску	-	електростартер
Об'єм двигуна	см <sup>3</sup>	815
Передаточне відношення приводу	-	1:3
Час одного циклу змішування	хв	4-6
Витрата палива на цикл	цикл/л	0,02
Коефіцієнт однорідності розчину	-	0,92-0,97

Отримані результати експериментальних досліджень підтвердили ефективність функціонування розробленого розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока та його здатність забезпечувати приготування будівельних розчинів в автономному режимі без використання зовнішніх джерел енергопостачання. Встановлено відповідність основних режимних параметрів роботи змішувача вимогам технологічного процесу приготування будівельного розчину, що створює передумови для подальшого оцінювання ефективності змішування та техніко-економічних показників застосування розробленого обладнання в умовах будівельного виробництва.

#### **4.2 Практичне використання розробленого розчинозмішувача**

За результатами проведених експериментальних досліджень та встановлення експлуатаційних параметрів роботи розроблений розчинозмішувач з приводом від валу трансмісії мотоблока було впроваджено у практику виконання будівельних і ремонтно-монтажних робіт на двох виробничих об'єктах. Метою впровадження було оцінювання експлуатаційних можливостей обладнання в умовах, наближених до реальних умов діяльності малих будівельних підприємств, а також визначення техніко-економічних переваг застосування механічного привода, який функціонує без використання стаціонарних джерел електроживлення.

Перше впровадження здійснено на виробничій базі ТОВ «Виробниче підприємство “Будмеханізація”», яке спеціалізується на виготовленні будівельного обладнання та комплектуючих і має необхідну матеріально-технічну базу для проведення експлуатаційних випробувань механізованих установок. Розроблений розчинозмішувач застосовувався під час виконання комплексних ремонтних робіт у виробничих приміщеннях підприємства, зокрема для приготування будівельного розчину під час заповнення технологічних і монтажних швів, а також ремонту бетонних підлог у зоні

механоскладального цеху. Виконання робіт здійснювалося в умовах обмеженого доступу до електричних мереж або необхідності використання протяжних кабельних ліній, що ускладнювало застосування традиційного електропривідного обладнання. Використання розчинозмішувача з приводом від мотоблока забезпечило можливість організації автономного технологічного процесу без залучення пересувних генераторів або стаціонарних джерел енергопостачання.



Рисунок 4.2 – Впровадження розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблоку

У процесі практичної експлуатації встановлено, що механічний привід від вала трансмісії мотоблока забезпечує рівномірне обертання змішувального органа, завдяки чому досягається якісне перемішування цементно-піщаних сумішей різної рухливості. Передавання крутного моменту через ланцюгову передачу забезпечувало плавний пуск змішувального механізму та відсутність ударних навантажень у приводі, що зменшувало динамічні навантаження на його елементи й забезпечувало рівномірний перебіг процесу змішування. Приготовані

будівельні розчини використовували безпосередньо під час виконання ремонтно-відновлювальних робіт, зокрема для відновлення бетонної основи під монтаж технологічного обладнання, улаштування локальних цементно-піщаних стяжок і підливок у місцях встановлення металевих рам та станин верстатів.

Обладнання продемонструвало високу ефективність як засіб механізації процесів приготування будівельних розчинів під час виконання робіт у замкнених просторах та на об'єктах з обмеженим доступом до електромережі. За результатами експлуатаційних спостережень встановлено, що тривалість одного циклу змішування становила в середньому 4–6 хвилин, що забезпечувало оперативне приготування будівельного розчину у об'ємах, достатніх для виконання ремонтно-відновлювальних і монтажних робіт малої механізації. Якість отриманих розчинів відповідала вимогам ДСТУ Б В.2.7-212:2009, при цьому структура розчину характеризувалася рівномірним розподілом компонентів протягом усього періоду використання.

Друге впровадження розробленого розчинозмішувача здійснено за адресою: м. Полтава, вул. Ігоря Дорошенка, 31, ЖБК «Ворскла», де обладнання використовувалося під час виконання будівельних робіт у умовах приватного житлового сектору. На зазначеному об'єкті розчинозмішувач застосовувався для приготування розчину, необхідного під час заповнення швів між конструктивними елементами, улаштування цементно-піщаних стяжок у внутрішніх і зовнішніх приміщеннях, а також підготовки розчинів для виконання фасадних ремонтних робіт і вирівнювання поверхонь перед нанесенням декоративних покриттів. Частина робіт виконувалася в умовах складної конфігурації робочої зони, обмеженого простору та перепадів рельєфу місцевості, що ускладнювало використання традиційних електропривідних змішувальних установок.

Результати експлуатації показали, що застосування розробленого розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока забезпечує можливість ефективного виконання технологічних операцій приготування

будівельних розчинів навіть за відсутності стаціонарних джерел електроживлення. Використання механічного привода дозволило забезпечити рівномірне обертання змішувального вала та отримання будівельного розчину із необхідними технологічними характеристиками для виконання внутрішніх і зовнішніх будівельних робіт. Застосування автономної схеми привода сприяло спрощенню організації технологічного процесу та підвищенню мобільності обладнання в умовах обмеженого будівельного майданчика.

Практичні результати експлуатації підтвердили відповідність показників якості приготовлених розчину вимогам нормативних документів. Отримані розчини характеризувалися однорідною структурою без ознак грудкування або розшарування та забезпечували необхідні технологічні властивості під час виконання будівельних операцій. Додатково встановлено, що тривалість монтажу та демонтажу розчинозмішувача не перевищує 10–15 хвилин, що є важливою перевагою при виконанні робіт на об'єктах із змінною організацією робочих зон.

Отже, результати практичного впровадження розробленого розчинозмішувача на об'єктах виробничого та житлового призначення підтвердили його універсальність застосування, технологічну ефективність та автономність функціонування в умовах малої механізації будівельних процесів. Отримані експлуатаційні дані створюють основу для подальшого оцінювання економічної ефективності використання запропонованої конструкції, що розглядається у наступному підрозділі дисертаційної роботи.

### **4.3 Оцінка економічної ефективності впровадження обладнання**

Економічна ефективність використання розробленого розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока визначається насамперед зниженням енергетичних і трудових витрат у порівнянні з традиційними змішувальними установками, що працюють від використання електричного струму. Для

кількісної оцінки цих показників був проведений порівняльний аналіз експлуатаційних характеристик обох типів обладнання в однакових умовах приготування цементно-піщаних розчинів складу 1:3 під час виконання виробничих робіт на двох об'єктах упровадження — на базі ТОВ «Виробниче підприємство “Будмеханізація”» та на будівельному майданчику в ЖБК «Ворскла».

Розрахунки показали, що середнє енергоспоживання традиційного розчинозмішувача становить близько 0,25–0,3 кВт·год на один цикл приготування 0,25 м<sup>3</sup> розчину. Для оцінки енергетичної ефективності розробленого розчинозмішувача з приводом від колеса мотоблока було прийнято, що двигун мотоблока працює у стаціонарному режимі, передаючи крутний момент через ланцюгову передачу на вал барабана. При цьому витрата палива мотоблока при навантаженні становить у середньому  $Q_f = 1,5 \text{ л/год}$ , а тривалість одного циклу змішування –  $t_c = 5 \text{ хв}$ .

Витрату палива за один цикл визначали за залежністю

$$F_{\text{цикл}} = Q_f \cdot \frac{t_c}{60}, \quad (4.1)$$

звідки

$$F_{\text{цикл}} = 1,5 \cdot \frac{5}{60} = 0,125 \text{ л.} \quad (4.2)$$

Враховуючи, що додаткове навантаження від роботи змішувача збільшує витрати палива не більш ніж на 12 %, додаткову витрату можна визначити за формулою

$$\Delta F = F_{\text{цикл}} \cdot \Delta_f, \quad (4.3)$$

де  $\Delta_f = 0,12$ . Тоді

$$\Delta F = 0,125 \cdot 0,12 = 0,015 \text{ л.} \quad (4.4)$$

Енергетичний еквівалент цієї додаткової витрати визначали за виразом:

$$E_{\text{паливо}} = \Delta F \cdot e_{\text{паливо}}, \quad (4.5)$$

де  $e_{\text{паливо}} = 8,9 \text{ кВт} / \text{год} / \text{л}$  – теплова цінність бензину.

Таким чином,

$$E_{паливо} = 0,015 \cdot 8,9 = 0,1335 \text{ кВт} / \text{год}. \quad (4.6)$$

Для порівняння, енергоспоживання розчинозмішувача на один цикл становить  $E_{ел} = 0,25 \text{ кВт} / \text{год}$ . Відносну енергетичну економію обчислювали за формулою:

$$\eta = \frac{E_{ел} - E_{паливо}}{E_{ел}} \cdot 100\%. \quad (4.7)$$

Підставивши значення, одержуємо:

$$\eta = \frac{0,25 - 0,1335}{0,25} \cdot 100\% = 46,6\%. \quad (4.8)$$

Проведені розрахунки показали, що загальне зменшення енерговитрат під час приготування будівельних розчинів із використанням розробленого розчинозмішувача становить близько 45–50 % порівняно з електропривідними аналогами аналогічного робочого об'єму. Досягнутий ефект пояснюється відсутністю окремого електродвигуна в конструкції установки та використанням механічної енергії валу трансмісії мотоблока безпосередньо для приводу змішувального барабана, що забезпечує зменшення непродуктивних втрат енергії у приводній системі.

За результатами експлуатаційних спостережень встановлено, що тривалість одного циклу змішування в розчинозмішувачі з приводом від валу трансмісії мотоблока становить у середньому 4–6 хв, тоді як у традиційних змішувачах аналогічного об'єму цей показник перебуває в межах 6–8 хв. Скорочення тривалості приготування розчину на 25–30 % забезпечує підвищення продуктивності праці приблизно на 15–18 %. Це зумовлено більш ефективною передачею крутного моменту на змішувальний орган та зменшенням втрат енергії на холостий хід привідних елементів. Додатковим фактором підвищення ефективності є відсутність необхідності підключення до електромережі, використання кабельних ліній або пересувних генераторів, що

дозволяє скоротити тривалість підготовчо-заклучних операцій майже вдвічі. У сукупності зазначені фактори забезпечують підвищення енергоефективності процесу приготування будівельних розчинів та зниження експлуатаційних витрат у польових умовах будівельного виробництва.

Оцінювання трудомісткості процесу приготування будівельного розчину показало, що застосування розробленого обладнання дозволяє зменшити витрати ручної праці з 0,35 до 0,25 людино·год/м<sup>3</sup> розчину. Зниження трудових витрат пояснюється раціональною організацією процесу завантаження компонентів, спрощенням очищення барабана після завершення змішування та можливістю керування процесом одним оператором без залучення допоміжного персоналу.

Сукупне зменшення енергетичних і трудових витрат забезпечує зниження собівартості приготування будівельних розчинів на 20–25 %, що підтверджує економічну доцільність використання розробленого розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока в умовах маломасштабного будівництва. За результатами розрахункової оцінки встановлено, що термін окупності витрат на виготовлення та впровадження одного дослідного зразка становить менше одного будівельного сезону, що свідчить про доцільність практичного застосування запропонованої конструкції в діяльності індивідуальних забудовників, фермерських господарств і малих підрядних організацій.

#### **4.4 Висновки до розділу 4**

1. Встановлено, що застосування розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока забезпечує автономне приготування цементно-піщаних розчинів у умовах відсутності стаціонарного електроживлення при збереженні необхідної однорідності розчину та технологічних характеристик процесу змішування.

2. Експлуатаційними випробуваннями підтверджено зменшення енерговитрат на приготування розчинів у середньому на 45–50 %, скорочення

тривалості циклу змішування на 25–30 % та підвищення продуктивності праці на 12–15 % порівняно з електропривідними змішувачами аналогічного об'єму.

3. Встановлено, що конструкція привода забезпечує рівномірне передавання крутного моменту до змішувального органа, необхідну інтенсивність перемішування та однорідність будівельного розчину без ознак розшарування. Результати випробувань підтвердили придатність розробленого обладнання до експлуатації в умовах обмеженого робочого простору та за відсутності стаціонарних джерел електропостачання.

4. Підтверджено доцільність застосування розробленого розчинозмішувача в умовах маломасштабного та автономного будівництва, де забезпечується зниження собівартості приготування розчинів і підвищення мобільності технологічних процесів.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено закономірності зміни інтенсивності перемішування будівельних розчинів у змішувачі з приводом від валу трансмісії мотоблока та визначено раціональні режими роботи обладнання, зокрема коефіцієнт заповнення 0,6–0,7 і частоту обертання змішувального вала 35–40 об/хв, за яких забезпечується максимальна ефективність процесу змішування.

2. Отримано аналітичні залежності для визначення кінематичних і енергетичних параметрів процесу змішування з урахуванням передачі крутного моменту від трансмісії мотоблока, що дозволяють прогнозувати продуктивність змішувача та енерговитрати процесу.

3. Установлено можливість оцінювання однорідності будівельного розчину на основі стохастичної моделі процесу перемішування, що забезпечує визначення раціональної тривалості змішування та кількості обертів робочого органа для досягнення рівномірного розподілу компонентів.

4. Експериментально підтверджено забезпечення нормативної однорідності цементно-піщаних розчинів при використанні механічного привода від валу трансмісії мотоблока без застосування стаціонарних джерел електроенергії.

5. Встановлено зменшення енерговитрат процесу приготування будівельних розчинів на 45–50 % та скорочення тривалості циклу змішування на 25–30 % порівняно зі змішувачами аналогічного об'єму з електроприводом.

6. Визначено підвищення продуктивності праці на 12–15 % і зниження трудомісткості процесу приготування розчинів до 0,25 людино·год/м<sup>3</sup> за рахунок використання автономного механічного привода.

7. Підтверджено зниження собівартості приготування будівельних розчинів на 20–25 % та встановлено, що термін окупності запропонованого змішувача становить менше одного будівельного сезону.

8. Обґрунтовано ефективність застосування розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока в умовах автономного та маломасштабного

будівництва, що забезпечує підвищення мобільності технологічних процесів і зменшення залежності від зовнішніх джерел енергопостачання.

## Список використаних джерел

1. Яковенко, А. М., & Кулай, В. П. (2025). Комплекс мобільного обладнання для проведення робіт на невеликих будівельних майданчиках. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, 108, 54–60. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.54>
2. 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>
3. de França, M. S., Cazacliu, B., Cardoso, F. A., & Pileggi, R. G. (2019). Influence of mixing process on mortars rheological behavior through rotational rheometry. Construction and Building Materials, 223, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.213>
4. 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>
5. da Silva, J. L., & Lordsleem, A. C. (2021). Influence of mixer type and mixing time on the multipurpose mortars properties. Case Studies in Construction Materials, 15, e00562. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00562>
6. Moskalova, K., Lyashenko, T., & Aniskin, A. (2022). Modelling the Relations of Rheological Characteristics with Composition of Plaster Mortar. Materials, 15(1), 371. <https://doi.org/10.3390/ma15010371>
7. Zhang, H., Zhang, C., He, B., Yi, S., & Tang, L. (2023). Recycling fine powder collected from construction and demolition wastes as partial alternatives to cement: A comprehensive analysis on effects, mechanism, cost and CO2 emission. Journal of Building Engineering, 71, 106507. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106507>
8. Ma, Z., Shen, J., Wang, C., & Wu, H. (2022). Characterization of sustainable mortar containing high-quality recycled manufactured sand crushed from recycled coarse aggregate. Cement and Concrete Composites, 132, 104629.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104629>

9. Wu, H., Hu, R., Yang, D., & Ma, Z. (2023). Micro-macro characterizations of mortar containing construction waste fines as replacement of cement and sand: A comparative study. *Construction & Building Materials*, 383, 131328–131328.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131328>

10. Samadi, M., Huseien, G. F., Mohammadhosseini, H., Lee, H. S., Abdul Shukor Lim, N. H., Tahir, M. M., & Alyousef, R. (2020). Waste ceramic as low cost and eco-friendly materials in the production of sustainable mortars. *Journal of Cleaner Production*, 266, 121825. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121825>

11. Nasr, M. S., Shubbar, A. A., Abed, Z. A.-A. R., & Ibrahim, M. S. (2020). Properties of eco-friendly cement mortar contained recycled materials from different sources. *Journal of Building Engineering*, 31, 101444.

<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101444>

12. Duan, Z., Hou, S., Xiao, J., & Singh, A. (2020). Rheological properties of mortar containing recycled powders from construction and demolition wastes. *Construction and Building Materials*, 237, 117622.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117622>

13. Gholampour, A., Ho, V. D., & Ozbakkaloglu, T. (2019). Ambient-cured geopolymer mortars prepared with waste-based sands: Mechanical and durability-related properties and microstructure. *Composites Part B: Engineering*, 160, 519–534.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.057>

14. Lyashenko, T. V., & Kryukovskaya, S. A. (2012). Modelling the influence of composition on rheological parameters and mechanical properties of fibre reinforced polymer-cement mortars. *Brittle Matrix Composites* 10, 177–186.

<https://doi.org/10.1533/9780857099891.177>

15. Korobko, B., & Vasyliiev, I. (2017). Test Method for Rheological Behavior of Mortar for Building Work. *Acta Mechanica et Automatica*, 11(3), 173–177.

<https://doi.org/10.1515/ama-2017-0025>

16. 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>

17. Surzhko, T., Knysh, M., Kuzub, Y., Kruchkov, O., & Rubel, V. (2023). Study of the operating parameters of vibrations of a vibrosieve of the washing liquid purification unit. *Technology Audit and Production Reserves*, 4(1(72)), 34–39.

<https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.286362>

18. 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)

19. Рудик, Р., & Вірченко, В. (2025). Підвищення ефективності гравітаційного змішування бетонних сумішей. *Техніка будівництва*, (42), 50–60.

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

20. Нестеренко, М. М., Нестеренко, Т. М., Пімінов, І. Г., & Аніщенко, А. І. (2026). Дослідження кута встановлення лопаток змішувача примусової дії з вертикальним валом у системі “змішувач – бетононасос.” *System Technologies*, 4(165), 213–224. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-4-165-2026-19>

21. Васильєв, Є., & Тараненко, Д. (2025). Прототип конструкції мобільного гравітаційного бетонозмішувача примусової дії. *Scientific Bulletin of Construction*, 113, 216–223. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.113.1.26>

22. Васильєв, О., & Кулай, В. . (2025). Аналіз необхідної потужності для приведення в рух лопатей установки для приготування ніздрюватих бетонів. *Технічні науки та технології*, (3 (41)), 472–479.

[https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-472-479](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-472-479)

23. A. Anishchenko, A. Aleinikova, M. Buhrymenko, O. Liapkalo, & Nesterenko, M. (2024). A set of small-sized equipment for carrying out restoration work on segments of sewage collectors. 111, 61–68.

<https://doi.org/10.33042/2311-7257.2024.111.1.8>

24. Kamble R., Baredar P., Kumar A., Gupta B. New Approach for Evaluating Different Concrete Mixer Based on Concrete Slurry Property. Lecture Notes in Mechanical Engineering, 2021, pp. 637-650.

[https://doi.org/10.1007/978-981-15-9678-0\\_55](https://doi.org/10.1007/978-981-15-9678-0_55)

25. Popov, S., Shpylka, A., & Gnitko, S. (2018). The Research of Mortar Components Mixing Process. International Journal of Engineering & Technology, 7(3.2), 27. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.26.14370>

26. Блажко, В., & Григорків, О. (2025). Визначення основних показників роботи бетонозмішувача примусової дії з використанням критеріїв подібності. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, 109, 15–19. <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2025.109.0.15>

27. 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>

28. Şahan Arel, H. (2016). Effects of foreign substances in cement mortar mixing water. Advances in Cement Research, 28(3), 167–177.

<https://doi.org/10.1680/jadcr.15.00069>

29. Rohozin, I. A., Vasyliiev, O. S., & Pavelieva, A. K. (2018). Determination of building mortar mixers effectiveness. International Journal of Engineering & Technology, 7(3.2), 360–366. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.2.14553>

30. Park, K.-B. , Plawsky, J. L., Littman, H., & Paccione, J. D. (2006). Mortar properties obtained by dry premixing of cementitious materials and sand in a spout-fluid bed mixer. Cement and Concrete Research, 36(4), 728–734. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.10.012>

31. ДСТУ EN 1015-11:2022. (2022). Методи випробування розчину для кладки. Частина 11. Визначення міцності на згин і стиск затверділого розчину. Київ: ДП «УкрНДНЦ».

32. ДСТУ Б В.2.7-187:2009. (2009). Будівельні матеріали. Цементи. Методи визначення міцності на згин і стиск. Київ: ДП «Орган з сертифікації цементів «СЕПРОЦЕМ».

33. ДСТУ Б EN 1015-12:2012. (2012). Методи випробувань розчинів для мурування. Частина 12. Визначення міцності зчеплення штукатурних розчинів з основами. Київ: ДП «Український науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут будівельних матеріалів та виробів».

34. Конопляник, О. Ю., & Жук, Д. В. (2025). Вплив часу перемішування бетонних сумішей на міцнісні характеристики конструкційних бетонів. Український журнал будівництва та архітектури, 3(27), 81–90.

<https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.81.1164>

35. Рудик, Р. Ю., Вірченко, В. В., Сальніков, Р. Ю., & Біданець, С. С. (2024). Розроблення методики та обладнання для приготування бетонних сумішей у гравітаційних змішувачах. У Енергоощадні машини і технології : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, с. 12–15.

36. 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.

37. 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.

38. 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>

39. 3. 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>

40. 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.

41. 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.

42. Баладінський В.Л., Назаренко І.І., Онищенко О.Г. (2002). *Будівельна техніка*. Київ-Полтава: КНУБА-ПНТУ. 463 с.

43. Онищенко В. О., Онищенко О. Г., Коробко Б. О., Вірченко В. В. (2017). *Будівельна техніка*. Кондор, 424 с.

44. 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>

45. Коробко, Б. О., & Вірченко, В. В. (2016). Моделювання робочого процесу стрічково-лопатевого розчинозмішувача. *Збірник наукових праць. Серія: Галузеве машинобудування, будівництво*, 2(47), 32–38.

46. Попов, С. В., & Васильєв, А. В. (2014). Малогабаритні розчинозмішувальні установки. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ» (Серія: Нові рішення в сучасних технологіях)*, 7(1050), 25–29.

47. Назаренко, І. І., & Клименко, М. О. (2001). До вибору типу бетонозмішувачів та призначення їх об'ємів. *Техніка будівництва*, (9), 59–64.

48. Вірченко В.В. (2011). Приготування будівельних сумішей за допомогою ефективних змішувачів. *Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського*, 1/2011 (66), 71-74.

49. Назаренко, І., Клименко, М., Свідерській, А., & Печерський, В. (2017). Визначення раціональних параметрів гравітаційних бетонозмішувачів. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*, (90), 67–72.

50. 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>

51. О.Ю. Крот, Ю.О. Кузуб, О.А. Крючков, О.В. Пуховой. Моделювання процесу змішування у спіральному стрічковому бетонозмішувачі *Матеріали VII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки»* (25.04.24, м. Полтава), с. 17-19.

52. 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*, 136(4), 42–48. <https://doi.org/10.30857/1813-6796.2019.4.4>

53. Назаренко, І., & Чичур, А. (2017). Вплив кута повороту лопатки двовалового горизонтального бетонозмішувача примусової дії на ефективність його роботи. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*, 89, 41–47.

54. Cheng, H.-Y., Luo, Z., & Yong, L. (2021). Reliability analysis of mixer structure under mixing simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1043(2), 022020. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1043/2/022020>

55. Nazarenko, I., & Chichur, A. (2020). Research of settings of forced action mixer with changing angle blades. 95-104.

<https://doi.org/10.31548/machenergy2020.01.095>.

56. Shengyong, L. (2013). Optimized Design of Mixing System of Mortar Mixer. *Tunnel Construction*, 33(8), 704.

<https://doi.org/10.3973/j.issn.1672-741x.2013.08.015>

57. Arntz, D., den, K., Briels, W. J., Bussmann, P. J. T., Beeftink, H. H., & Boom, R. M. (2008). Granular mixing and segregation in a horizontal rotating drum: A simulation study on the impact of rotational speed and fill level. 54(12), 3133–3146.

<https://doi.org/10.1002/aic.11622>

58. Модестов, В. Б., & Табунщиков, В. Г. (2020). Дослідження планетарно-шнекових змішувачів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*, 1(265), 90–97.

<https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-265-1-90-97>

59. Guillaume Delaplace, Thakur, R., Bouvier, L., André, C., & Torrez, C. (2007). Dimensional analysis for planetary mixer: Mixing time and Reynolds numbers. 62(5), 1442–1447. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.11.039>

60. Bibire, L., Chitimus, A.-D., & Ciubotariu, V. (2024). Design of Mixing Device Shafts Based on a Proposed Calculation Method Supported by Finite Element Method Analysis. *Machines*, 12(7), 479. <https://doi.org/10.3390/machines12070479>

61. Talpur, M. A. A., Baloch, A., Kazi, H., & Shaikh, F. A. (2021). Finite element analysis of mixing flow in a circular vessel with concentric three blade agitator. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 10(2), 1056–1064. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2021/811022021>

62. Новохацький, П. (2024). Дослідження змішування сухих будівельних сумішей у лопатевому змішувачі. У ВМС-2024 – International Scientific-Practical Conference of Young Scientists “Build-Master-Class-2024” (с. 343–344). Київ, Україна. <https://doi.org/10.59647/978-617-520-936-3/1>

63. Xing, P., Yin, X. J., & Zhao, J. Y. (2010). Rapid Tooling of Mixer Mixing-Blade of Concrete Mixer. *Applied Mechanics and Materials*, 33, 236–240.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.33.236>

64. 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>

65. Ємельянова І.А., Чайка Д.О., Кабанець Д.С. (2017). Створення технологічного комплексу малогабаритного обладнання з безпоршнеvim бетононасосом для умов будівельного майданчика. Комунальне господарство міст, 137, 98-103.

66. 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.

67. Rudyk, R., & Salnikov, R. (2025). 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>

68. Yang, H., Ma, G., & Zhao, W. (2025). DEM-Based Simulation Study on the Operational Performance of a Single Horizontal Shaft Forced-Action Mixer. *Buildings*, 15(15), 2627. <https://doi.org/10.3390/buildings15152627>

69. Ariyasinghe, B., Lakruwan, H., & Ariyasinghe, S. (2025). Design and Implementation of an Automatic Power Transfer System for a Solar-Powered Walking Tractor. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 15(10), 105–120. <https://doi.org/10.29322/ijsrp.15.10.2025.p16619>

70. Amongo, R. M. C., Quilloy, E. P., Ranches, M. A. F., Larona, M. V. L., & Madlangbayan, M. S. (2020). Development of an electric hand tractor (e-Tractor) for agricultural operations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 542, 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/542/1/012027>

71. Огляд мотоблока Forte 80. Moto-blok. URL: <https://moto-blok.com.ua/uk/blog/obzor-motobloka-forte-80/> (дата звернення: 23.03.2026)

72. Огляд мотоблока Кентавр МБ 40-2. Moto-blok. URL: <https://moto-blok.com.ua/uk/blog/obzor-motobloka-kentavr-mb-40-2-4/> (дата звернення: 23.03.2026)

73. Мотоблок Agromehanika SH-81E (фреза + ел. запуск): технічні характеристики та комплектація. Moto-blok. URL: <https://moto-blok.com.ua/uk/motoblok-agromehanika-sh-81e-freza-el-starter/> (дата звернення: 23.03.2026).

74. Mumtazah, N., Putraninghadi, A. R., & Nisbatul, N. (2021). Computational Liquid Dynamic Simulation Mixing Time from Side Inlet Mixer Tank. PROZIMA (Productivity, Optimization and Manufacturing System Engineering), 5(1), 30–40. <https://doi.org/10.21070/prozima.v5i1.1505>

75. Конопляник, О., & Жук, Д. (2025). Вплив часу перемішування бетонних сумішей на деформативні характеристики конструкційних бетонів. Будівельні конструкції. Теорія і практика, (17), 119–130.

<https://doi.org/10.32347/2522-4182.17.2025.119-130>

76. Endo, T., & Itakura, R. (2023). Mixing time of homogeneous/heterogeneous solutions in a micro-mixer with free impinging jets. Bulletin of the Chemical Society of Japan, 97(2). <https://doi.org/10.1093/bulcsj/uoad021>

77. О.Ю. Крот, Ю.О. Кузуб, О.А. Крючков. Розробка стенда для експериментального дослідження механічної характеристики асинхронного двигуна. Матеріали 75-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 02 травня – 25 травня 2023 року), с. 262-263.

78. О.Ю. Крот, Ю.О. Кузуб, О.А. Крючков. Розробка розчинозмішувача з приводом від колеса мотоблока. Матеріали 76-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (14-23.05.24, м. Полтава), с. 279-281.

79. Salnikov, R., & Rudyk, R. (2023). Improving the efficiency of the screw unit of plastering plants. Academic Journal Industrial Machine Building Civil Engineering, 1(60), 31–37. <https://doi.org/10.26906/znp.2023.60.3184>

80. Ferrari, C., Nicolò Beccati, & Magri, L. (2025). Numerical Mixing Index: Definition and Application on Concrete Mixer. *Fluids*, 10(3), 72–72.

<https://doi.org/10.3390/fluids10030072>

81. Бондаренко, О. В., Устиненко, О. В., Протасов, Р. В., & Архіпов, О. В. (2024). Оператори схрещування та мутації в стохастичних алгоритмах. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР, 1, 3–9. <https://doi.org/10.20998/2079-0775.2024.1.01>

82. Ferrari, C., Beccati, N., & Magri, L. (2025). Numerical Mixing Index: Definition and Application on Concrete Mixer. *Fluids*.

<https://doi.org/10.3390/fluids10030072>.

83. Ottino, J. M., & Khakhar, D. V. (2000). Mixing and Segregation of Granular Materials. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 32(1), 55–91.

<https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.32.1.55>

84. Yan, S., Wang, W., Chang, G., & Lin, H. (2016). Effective ready mixed concrete supply adjustments with inoperative mixers under stochastic travel times. *Transportation Letters*, 8, 286 - 300. <https://doi.org/10.1080/19427867.2016.1188522>.

85. 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>

86. Cheng, H.-Y., Luo, Z., & Yong, L. (2021). Reliability analysis of mixer structure under mixing simulation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1043(2), 022020. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1043/2/022020>

87. Li, Z., Lu, D., & Gao, X. (2021). Optimization of mixture proportions by statistical experimental design using response surface method - A review. *Journal of Building Engineering*, 36, 102101. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102101>

88. Pereira, M., Dubraska, F., & Fabiani, P. (2023). Determination of the Probability Distribution of Concrete Mixing Components. *Journal of Building Technology*, 5(2). <https://doi.org/10.32629/jbt.v5i2.1278>

89. Farhana, S., Qaddoumi, N., & Yehia, S. (2023). Multiphase Dielectric Mixing Model for Concrete Mixtures. *IEEE Access*, 11, 142884–142892.

<https://doi.org/10.1109/access.2023.3342908>

90. Anuruddha Jayasuriya, Matthew J. Bandelt, and Matthew P. Adams. Stochastic Mesoscopic Modeling of Concrete Systems Containing Recycled Concrete Aggregates Using Monte Carlo Methods. (2022). ACI Materials Journal, 119(2).

<https://doi.org/10.14359/51734483>

91. Doosti, H., Afshari, M., & Niroumand, H. A. (2008). Wavelets for Nonparametric Stochastic Regression with Mixing Stochastic Process. Communications in Statistics - Theory and Methods, 37(3), 373–385.

<https://doi.org/10.1080/03610920701653003>

92. Національний стандарт України. (2015). ДСТУ Б EN 197-1:2015. Цемент. Частина 1. Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів (EN 197-1:2011, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

93. Національний стандарт України. (2014). ДСТУ Б EN 12620:2013. Заповнювачі для бетону (EN 12620:2002+A1:2008, IDT). Мінрегіонбуд України.

94. Національний стандарт України. (2019). ДСТУ EN 934-2:2019. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Частина 2. Добавки для бетонів. Визначення, вимоги, відповідність, маркування та етикетування (EN 934-2:2009+A1:2012, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

95. Національний стандарт України. (2017). ДСТУ EN 45501:2017. Метрологічні аспекти неавтоматичних зважувальних приладів (EN 45501:2015, IDT). ДП «УкрНДНЦ».

96. Національний стандарт України. (2009). ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Мінрегіонбуд України.

97. Національний стандарт України. (2010). ДСТУ Б В.2.7-233:2010. Будівельні матеріали. Суміші будівельні рідкі модифіковані. Загальні технічні умови. Мінрегіонбуд України.

98. Національний стандарт України. (1997). ДСТУ Б В.2.7-23-95. Розчини будівельні. Загальні технічні умови. Інститут «Київоргбуд».

99. 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>.

100. Patle, Mr. K. D. (2023). Experimental Investigation of Compressive Strength of Concrete through Conventional Concrete Mixer and Design of Automated Concrete Mixer with Machine Learning. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(10), 1846–1850.

<https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.56333>

101. Kuzub, Y. O., & Sklyarenko, T. O. (2026). Research on mortar mixer driven by the transmission shaft of a walk-behind tractor. In *Sustainable development of cities: Post-war period: Proceedings of the XIX All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Higher Education Applicants (91st Scientific and Technical Conference of O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv) (Part 2, pp. 77–79)*.

102. Кузуб, Ю. О., & Вірченко, В. В. (2026). Енергетична оцінка процесу змішування будівельного розчину у змішувачі з гвинтовими лопатками. Тези 78-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів (Т. 1, с. 248–249).

## Додаток А

## Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

1. Kuzub Yuriy, Rudyk Rostyslav, (2026). Study of mixing building mortars in a mortar mixer driven by a walk-behind tractor transmission shaft. *Construction Engineering*, (44), 78-85.

<https://doi.org/10.32347/tb.2026-44.0708>

2. Крот О. Ю., Кузуб Ю. О., Крючков О. А. (2023) Способи зменшення негативного впливу резонансних коливань на якість бетонних виробів при їх віброушільненні. *Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету*, 2 (101), с. 115-120.

<https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2023.101.2.115-120>

3. 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>

4. 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>

5. 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)

Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

6. О.Ю. Крот, Ю.О. Кузуб, О.А. Крючков. Розробка стенда для експериментального дослідження механічної характеристики асинхронного двигуна. Матеріали 75-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових

працівників, аспірантів та студентів університету (Полтава, 02 травня – 25 травня 2023 року), с. 262-263.

7. О.Ю. Крот, Ю.О. Кузуб, О.А. Крючков. Розробка розчинозмішувача з приводом від колеса мотоблока. Матеріали 76-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів університету (14-23.05.24, м. Полтава), с. 279-281.

8. О.Ю. Крот, Ю.О. Кузуб, О.А. Крючков, О.В. Пуховой. Моделювання процесу змішування у спіральному стрічковому бетонозмішувачі Матеріали VII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки» (25.04.24, м. Полтава), с. 17-19.

9. 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» (24.04.25, м. Полтава).

10. Kuzub, Y. O., & Sklyarenko, T. O. (2026). Research on mortar mixer driven by the transmission shaft of a walk-behind tractor. In Sustainable development of cities: Post-war period: Proceedings of the XIX All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of Higher Education Applicants (91st Scientific and Technical Conference of O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv) (Part 2, pp. 77–79).

11. Кузуб, Ю. О., & Вірченко, В. В. (2026). Енергетична оцінка процесу змішування будівельного розчину у змішувачі з гвинтовими лопатками. Тези 78-ї наукової конференції професорів, викладачів, наукових працівників, аспірантів та студентів (Т. 1, с. 248–249).

**Додаток Б**  
**Акти впровадження**

**ПІДТВЕРДЖУЮ»**  
Керівник  
ТОВ «Виробниче підприємство Будмеханізація»  
ОФАЛЬ Павло  
\_\_\_\_\_ 2025 р.



**АКТ**

про впровадження у виробничу діяльність підприємства  
результатів дисертаційної роботи на тему:  
**«Дослідження та розробка розчинозмішувача  
з приводом від валу трансмісії мотоблока»**

Даний акт засвідчує, що при виконанні будівельних робіт на підприємстві впроваджено спеціалізоване обладнання – розчинозмішувач з приводом від валу трансмісії мотоблока, розробленого у межах виконання дисертаційної роботи.

Розчинозмішувач застосовувався під час виконання робіт із заповнення технологічних і монтажних швів, а також при проведенні ремонтних робіт бетонних підлог у зоні механоскладального цеху підприємства. Використання обладнання забезпечило можливість організації безперервного та автономного технологічного процесу приготування будівельних розчинів під час відсутності можливості підключення до джерел електропостачання.

У процесі експлуатації встановлено, що незмінна швидкість обертання робочого валу з лопатками сприяє рівномірному перемішуванню компонентів цементно-піщаних сумішей та забезпечує належну якість приготованого будівельного розчину. Застосування привода від трансмісії мотоблока дозволило виключити необхідність використання генераторів або стаціонарних електроприводів, що є суттєвою перевагою під час виконання ремонтних і монтажних робіт.

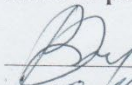
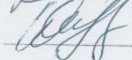
Результати використання розробленого розчинозмішувача підтверджують його ефективність, технологічну доцільність і практичну цінність, а також свідчать про можливість подальшого застосування зазначеного обладнання у виробничій діяльності підприємства.

Представник ТОВ «Виробниче  
підприємство Будмеханізація»:  
Керівник



ОФАЛЬ Павло

Представники  
Національного університету  
«Полтавська Політехніка  
імені Юрія Кондратюка:

 ВІРЧЕНКО Віктор  
 КУЗУБ Юрій



**«ЗАТВЕРДЖУЮ»**

Голова кооперативу

ЖБК «Ворскла»

САЛЬНІКОВ Роман

07 2025 р.

### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи  
у господарську діяльність житлово-будівельного кооперативу  
на тему:

#### **«Дослідження та розробка розчинозмішувача з приводом від валу трансмісії мотоблока»**

Цим актом підтверджується, що при виконанні ремонтно-відновлювальних робіт у багатоповерховому житловому будинку було впроваджено розчинозмішувач з приводом від валу трансмісії мотоблока, розробленого у межах виконання дисертаційної роботи.

Розчинозмішувач використовувався під час виконання планових ремонтно-відновлювальних робіт у багатоповерховому житловому будинку, зокрема при ремонті міжпанельних стиків та улаштуванні вирівнювальних стяжок у допоміжних приміщеннях. Застосування обладнання забезпечило можливість організації автономного технологічного процесу приготування будівельних розчинів під час відсутності можливості підключення до джерел електропостачання.

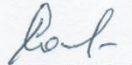
У процесі експлуатації встановлено, що робота розчинозмішувача характеризується надійністю функціонування та забезпечує скорочення тривалості приготування будівельних розчинів. Конструктивне виконання робочого вузла забезпечує рівномірність перемішування компонентів суміші та виключає її розшарування у процесі приготування.

Передача обертового моменту від мотоблока до робочого органа розчинозмішувача здійснювалася у номінальному режимі без порушень


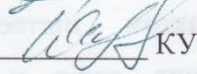
працездатності. Система приводу забезпечувала безперервність технологічного процесу в умовах відсутності можливості підключення до електромережі.

Отримані результати впровадження свідчать про практичну доцільність, технологічну ефективність і можливість широкого застосування розробленого розчинозмішувача 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  
 КУЗУБ Юрій