

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

УДК 666.973.6.031.4

КУЛАЙ Володимир Павлович

ДИСЕРТАЦІЯ

ОБҐРУНТУВАННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ
ПРИГОТУВАННЯ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ

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.

 В. П. Кулай

Науковий керівник:

кандидат технічних наук, доцент

Васильєв Олексій Сергійович

Полтава 2026

АНОТАЦІЯ

Кулай В. П. Обґрунтування робочих процесів обладнання для приготування ніздрюватих бетонів. – На правах рукопису.

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

Дисертаційне дослідження спрямоване на вирішення актуальної науково-технічної задачі зі зниження енерговитрат у процесі приготування ніздрюватих бетонів у змішувачах примусової дії шляхом визначення геометричних параметрів робочого органу та обґрунтування раціональних конструктивних і кінематичних параметрів змішувальної установки з урахуванням силової взаємодії робочих органів із розчинною сумішшю та умов формування однорідної структури матеріалу. На основі отриманих результатів розроблено та випробувано змішувальну установку примусової дії, визначено її техніко-економічну ефективність і практичну доцільність впровадження у будівельне виробництво.

У першому розділі виконано огляд сучасного стану науково-технічних рішень для приготування будівельних сумішей, а саме ніздрюватих бетонів. Розглянуто роль процесу змішування у формуванні структури та фізико-механічних властивостей бетонних і розчинних сумішей. Проведено класифікацію змішувачів за принципом дії, режимом роботи та конструктивними ознаками, проаналізовано переваги й недоліки змішувальних установок. Приділено увагу змішувачам примусової дії як найбільш перспективним для приготування ніздрюватих бетонів в умовах малого виробництва та на будівельному майданчику. Проаналізовано науковий внесок провідних науковців у галузі змішування та установок для виробництва будівельних матеріалів. Сформульовано мету та основні завдання дисертаційної роботи, обґрунтовано її актуальність і доцільність подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

У другому розділі наведено теоретичне обґрунтування робочих процесів і режимів роботи установки для приготування ніздрюватих бетонів з вертикально розміщеним валом. На основі аналізу конструкції змішувальної установки та принципу дії сформовано кінематичну схему та визначено основні елементи, які входять до складу установки. Виконано аналіз взаємодії робочих органів із розчинною сумішшю. Встановлено дію основних сил, що виникають у процесі змішування. Обґрунтовано вплив геометричної форми лопатей на величину опору руху в розчинній суміші та запропоновано критерії для порівняльної оцінки різних профілів робочих органів. Розроблено математичну залежність для визначення потужності, що витрачається на перемішування частинок у робочому об'ємі змішувача. Отримано математичні залежності, котрі враховують витрати енергії на підтримку швидкісного режиму суміші у зоні вихрового потоку та на подолання сил опору при взаємодії лопатей із матеріалом.

У третьому розділі представлені експериментальні дослідження робочих процесів установки для приготування ніздрюватих бетонів. Для проведення експериментальних досліджень було створено установку для приготування ніздрюватих бетонів з вертикально розміщеним валом, яка має в комплекті змінні робочі лопаті різної конфігурації. На першому етапі приділено увагу впливу геометричних параметрів робочого органу на лобовий опір лопаті установки. Виконано ряд дослідів для кожного робочого органу, який має різну форму лопаті (у формі прямокутного перерізу, у формі умовно трикутного перерізу, у формі круглого перерізу) змішувальної установки для визначення витрат електричної енергії. Проведено трифакторний експеримент з виведенням функціональної залежності для кожного робочого органу, який має різну форму лопаті, що описує вплив параметрів (часу перемішування, частоти обертання робочого органу та рухливість суміші) на енерговитрати установки для приготування ніздрюватих бетонів. Проведено аналіз енергетичної ефективності установки

на основі експериментально отриманих даних та визначено закономірності зміни сил опору та споживаної потужності залежно від форми лопатей та режимів роботи. Проведено експериментальні дослідження з метою перевірки міцності готових бетонних виробів “зразків-кубів” виготовлених установкою для приготування ніздрюватих бетонів відповідності до ДСТУ Б В.2.7-45:2010.

У четвертому розділі наведено результати впровадження розробленої установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100 в умовах виробництва і проведено оцінку її техніко-економічної ефективності. Детально описано конструктивні особливості установки, принцип її роботи та наведені основні технічні характеристики, що підтверджують відповідність устаткування вимогам сучасного будівельного виробництва. Наведена методика розрахунку конструктивних параметрів змішувальної установки, що базується на теоретичних та експериментальних дослідженнях. Наведені результати виробничих випробувань дослідного зразка в реальних умовах будівельного майданчика на підприємстві ТОВ «АСФЕР ГРУП» та ТОВ «ПРИМУМ АКТИВ», які підтвердили працездатність, надійність та універсальність установки при приготуванні ніздрюватих бетонів та фібробетонів. Запропоновані рекомендації щодо подальшого вдосконалення конструкції установки з урахуванням підвищення продуктивності, зменшення матеріалоємності і розширення функціональних можливостей.

Ключові слова: бетонозмішувач з вертикальним валом, потужність приводу, математичне моделювання змішувача, енергоефективність, робочий орган, лопать, змішування, змішувач примусової дії, енергія руху суміші, ніздрюватий бетон, кінематика руху частинок, лобовий опір, бетонна суміш, будівельний розчин, змішувальне обладнання, технологічні режими приготування, малогабаритність, однорідність суміші, продуктивність, активний робочий орган, кут атаки лопаті.

ABSTRACT

Kulai V. P. Justification of working processes of equipment for the preparation of cellular concrete. - On the rights of the manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy. Specialty 133: Mechanical Engineering. National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic". Poltava, 2026.

The dissertation research is aimed at solving the actual scientific and technical problem of reducing energy consumption in the process of preparing cellular concrete in forced action mixers by determining the geometric parameters of the working body and substantiating the rational structural and kinematic parameters of the mixing plant, taking into account the force interaction of the working bodies with the soluble mixture and the conditions of formation of a homogeneous structure of the material. On the basis of the obtained results, a mixing plant of forced action was developed and tested, its technical and economic efficiency and practical feasibility of implementation in construction production were determined.

In the first chapter, an overview of the current state of scientific and technical solutions for the preparation of construction mixtures, namely cellular concrete, was carried out. The role of the mixing process in the formation of the structure and physical and mechanical properties of concrete and soluble mixtures is considered. The classification of mixers according to the principle of operation, mode of operation and design features was carried out, the advantages and disadvantages of mixing plants were analyzed. Attention is paid to forced action mixers as the most promising for the preparation of cellular concrete in conditions of small production and on the construction site. The scientific contribution of leading scientists in the field of mixing and installations for the production of building materials was analyzed. The purpose and main tasks of the dissertation work are formulated, its relevance and expediency of further theoretical and experimental research are substantiated.

The second chapter provides a theoretical justification of the working processes and operating modes of the installation for the preparation of cellular concrete with a vertically placed shaft. Based on the analysis of the design of the mixing plant and the principle of operation, a kinematic scheme was formed and the main elements that are part of the plant were determined. An analysis of the interaction of working bodies with the soluble mixture was performed. The action of the main forces arising in the mixing process has been established. The influence of the geometric shape of the blades on the amount of resistance to movement in the soluble mixture is substantiated, and criteria for the comparative assessment of different profiles of working bodies are proposed. A mathematical relationship has been developed to determine the power used to mix particles in the working volume of the mixer. Mathematical dependences were obtained that take into account energy costs for maintaining the speed regime of the mixture in the zone of vortex flow and for overcoming resistance forces during the interaction of the blades with the material.

The third section presents experimental studies of the working processes of the unit for preparing cellular concrete. For experimental studies, a unit for preparing cellular concrete with a vertically placed shaft was created, which is equipped with replaceable working blades of various configurations. At the first stage, attention was paid to the influence of the geometric parameters of the working body on the frontal resistance of the blade of the unit. A number of experiments were performed for each working body that has a different blade shape (in the form of a rectangular section, in the form of a conditionally triangular section, in the form of a circular section) of the mixing unit to determine the electrical energy consumption. A three-factor experiment was conducted with the derivation of a functional dependence for each working body that has a different blade shape, which describes the influence of parameters (mixing time, working body rotation frequency and mixture mobility) on the energy consumption of the unit for preparing cellular concrete. An analysis of the energy efficiency of the

installation was carried out based on experimentally obtained data and the patterns of changes in resistance forces and power consumption were determined depending on the shape of the blades and operating modes. Experimental studies were carried out to check the strength of finished concrete products "cube samples" manufactured by the installation for the preparation of cellular concrete in accordance with DSTU B V.2.7-45:2010.

The fourth section presents the results of the implementation of the developed installation for the preparation of cellular concrete UdPNB-100 in production conditions and an assessment of its technical and economic efficiency. The design features of the installation, the principle of its operation are described in detail and the main technical characteristics are given, confirming the compliance of the equipment with the requirements of modern construction production. The methodology for calculating the design parameters of the mixing installation, based on theoretical and experimental studies, is presented. The results of production tests of the prototype in real conditions of the construction site at the enterprises of TOV «ASFER HRUP» and TOV «PRIMUM AKTYV», which confirmed the operability, reliability and versatility of the installation in the preparation of cellular concrete and fiber concrete, are presented. Recommendations are proposed for further improvement of the installation design taking into account increased productivity, reduced material consumption and expanded functionality.

Keywords: concrete mixer with vertical shaft, drive power, mathematical modeling of the mixer, energy efficiency, working body, blade, mixing, forced action mixer, energy of movement of the mixture, cellular concrete, kinematics of movement of particles, frontal resistance, concrete mixture, mortar, mixing equipment, technological modes of preparation, small size, homogeneity of the mixture, productivity, active working body, blade angle of attack.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА, В ЯКИХ НАВЕДЕНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії «Б»:

1. Васильєв О. С., **Кулай В. П.** Універсальна мобільна установка для приготування ніздрюватих бетонів та результати випробування отриманих виробів. *Вісник Вінницького політехнічного університету*. 2025. №3. С. 26 – 30. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-180-3-26-30> (Особистий внесок: запропонована конструкція змішувальної установки та виготовлений натурний зразок)

2. **Кулай В. П.** Аналіз ефективності роботи обладнання для виготовлення будівельних розчинів на основі контролю якісних показників вихідного продукту. *Вісник Сумського національного аграрного університету*. 2025. №1(59). С. 39–42. <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.1.6> (Особистий внесок: проведений дослід з визначенням ефективності роботи обладнання на основі контролю якісних показників зразків бетону за міцністю).

3. Яковенко А. М., **Кулай В. П.** Комплекс мобільного обладнання для проведення робіт на невеликих будівельних майданчиках. *Вісник ХНАДУ*. 2025. №108. С. 54–60. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.108.0.54> (Особистий внесок: запропоновано ефективний спосіб використання установки для приготування ніздрюватих бетонів та подальші шляхи розвитку дослідження).

4. Васильєв О. С., **Кулай В. П.** Аналіз необхідної потужності для приведення в рух лопатей установки для приготування ніздрюватих бетонів. *Технічні науки та технології*. 2025. №3(41). С. 472–479. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3\(41\)-472-479](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-3(41)-472-479) (Особистий внесок: проведено теоретичне дослідження силової взаємодії робочого органу розробленого мобільного бетонозмішувача примусової дії з розчинною сумішшю).

5. Vasiliev O., **Kulai V.** Study of factors affecting the energy consumption of the mixing plant for the preparation of aerated concrete. *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2025. Vol. 1 (64). – P. 147–152. <https://doi.org/10.26906/znp.2025.64.4147> (Особистий внесок: визначення та перевірка впливу найбільш важливих факторів на енерговитрати установки для приготування ніздрюватих бетонів).

6. **Кулай В. П.**, Васильєв О. С. Дослідження енерговитрат установки для приготування ніздрюватих бетонів в залежності від форми робочих органів. *Техніка будівництва*. 2025. №43. С. 15–22. <https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0602> (Особистий внесок: проведення дослідження залежності витрат електроенергії від форми робочого органу установки для приготування ніздрюватих бетонів, виконав побудову поверхонь відгуків у вигляді тривимірних поверхонь).

Наукові праці, які показують апробацію результатів наукових досліджень

7. Васильєв О. С., **Кулай В. П.** Змішувач для приготування пінобетонної суміші. *Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки* : матеріали VI Всеукр. наук.-техн. конф., м. Полтава 11 трав. 2023 р. Полтава, 2023. С. 63–65.

8. Васильєв О. С., **Кулай В. П.** Спектр використання будівельних розчинів розріджених інертними газами. *Modern problems of science education and society* : матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., м. Київ, 9-11 жовтня 2023 р. Київ, 2023. С. 307–309.

9. Васильєв О. С., **Кулай В. П.** Обґрунтування робочих процесів обладнання для приготування будівельних розчинів розріджених інертними газами. *Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки* : матеріали VII Всеукр. наук.-техн. конф., м. Полтава, 25 квіт. 2024 р. Полтава, 2024. С. 122–124.

10. Васильєв О. С., **Кулай В. П.** Застосування сучасних комп'ютерних

технологій для моделювання процесів змішування при приготуванні будівельних розчинів розріджених інертними газами. *Perspectives of contemporary science: theory and practice* : матеріали IV Міжнародної наук.-практ. конф., м. Львів 26-28 трав. 2024 р. Львів, 2024. С. 542–545.

11. Васильєв О. С., **Кулай В. П.** Переваги використання дозаторів циклічної дії з об'ємним дозуванням для приготування будівельних розчинів розріджених інертними газами. *Perspectives of contemporary science: theory and practice* : матеріали IX Міжнародної наук.-практ. конф., м. Львів, 14-16 жовтня 2024 р. Львів, 2024. С. 334-336.

12. Васильєв О. С., **Кулай В. П.** Вплив геометричних параметрів робочого органу змішувача для приготування ніздрюватих бетонів на споживання електроенергії. *Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки* : матеріали VIII Всеукр. наук.-техн. конф., м. Полтава 24 квіт. 2025 р. Полтава, 2025. С. 77–79.

13. **Кулай В. П.**, Васильєв О. С. Установка для приготування ніздрюватих бетонів. Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики : збірник тез II Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених м. Полтава 7 листопада. 2025 р. Полтава, 2025. С. 244–245.

14. Vasiliev O. S., **Kulai V.P.** Test results of samples made by the installation for the preparation of aerated concrete. *Підвищення ефективності експлуатації, обслуговування і сервісу дорожньо-будівельних машин та обладнання* : збірка наукових праць Всеукр. наук. конф., м. Харків, 13 лист. 2025 р. Харків, 2025. С. 128 –130.

Патенти України на корисну модель:

15. Мобільна установка для приготування ніздрюватих бетонів: пат. 161192 Україна: МПК В28С5/16 (2006.01). №u202405600; заявл. 26.11.2024; опубл. 19.11.2025, Бюл. № 47/2025.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧІ	
ПРИ ДОСЛІДЖЕНІ ЗМІШУВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ.....	23
1.1 Сфера застосування та умови експлуатації бетонних сумішей.....	24
1.2 Характеристика ніздрюватого бетону та основні напрями його використання у будівництві.....	26
1.3 Сучасний стан технологій виробництва неавтоклавних ніздрюватих бетонів.....	28
1.4 Аналіз сучасного стану та конструктивних особливостей змішувального обладнання для приготування ніздрюватих бетонів.....	32
1.5 Аналіз змішувальних органів установок примусової дії з вертикальним валом.....	37
1.6 Аналіз попередніх досліджень залежності споживаної потужності змішувача.....	44
1.7 Висновки, постановка задачі та мета досліджень.....	49
РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОБОЧИХ	
ПРОЦЕСІВ І РЕЖИМІВ РОБОТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ	
ПРИГОТУВАННЯ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ.....	53
2.1 Аналіз конструктивної схеми установки для приготування ніздрюватих бетонів	54
2.2 Аналіз сил, що діють на лопать в момент змішування	56
2.3 Встановлення лобового тиску на лопать установки для приготування ніздрюватих бетонів	63
2.4 Визначення потужності, що витрачається на перемішування частинок у робочому об'ємі змішувача	66
2.5 Висновки з розділу 2	72

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ

НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ.....	74
3.1 Опис конструкції експериментальної установки та способів зміни технічних характеристик.....	75
3.2 Дослідження лобового опору лопаті установки для приготування ніздрюватих бетонів	79
3.3 Дослідження споживання потужності привода від геометричних параметрів робочого органу змішувача.....	86
3.4 Дослідження впливу найбільших впливових факторів на споживану потужність змішувальної установки.....	90
3.5 Аналіз впливу форми на споживану потужність змішувальної установки.....	94
3.6 Перевірка показників міцності дослідних зразків ніздрюватого бетону	99
3.6.1 Методика проведення випробувань.....	99
3.6.2 Перевірка виробів з ніздрюватого бетону на міцність.....	100
3.7 Висновки до розділу 3.....	104

РОЗДІЛ 4. ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ У ВИРОБНИЧУ ПРАКТИКУ ТА ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВКИ.....

4.1 Конструктивні особливості установки для приготування ніздрюватих бетонів.....	106
4.2 Методика розрахунку основних параметрів установки для приготування ніздрюватих бетонів.....	111
4.3 Результати виробничих випробувань дослідного зразка установки для приготування ніздрюватих бетонів.....	116
4.4 Рекомендації з подальшого удосконалення конструкції змішувача.....	121

4.5 Попередній розрахунок економічної ефективності та впровадження установки для приготування ніздрюватих бетонів.....	123
4.6 Висновки з розділу 4.....	125
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	129
ДОДАТКИ.....	143
Додаток А Визначення функціональної залежності витрати електроенергії установки для приготування ніздрюватих бетонів на основі трифакторного експерименту другого порядку.....	144
Додаток Б Розрахунок економічного ефекту від упровадження установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНД-100.....	156
Додаток В Патент на корисну модель: Мобільна установка для приготування ніздрюватих бетонів.....	176
Додаток Г Акти впровадження результатів дисертації.....	182

ВСТУП

Актуальність роботи. В сучасному будівельному виробництві широке застосування отримав такий матеріал, як ніздрюватий бетон, вироби з якого використовують для зведення житлових і промислових будівель висотою до чотирьох поверхів. Ніздрюваті бетони виготовляються шляхом змішування підготовленого піску, цементу, пудри та інших добавок в певній пропорції та з дотриманням встановленої технології. Ці технологічні операції виконуються за допомогою змішувальних пристроїв.

Під час проектування змішувальних пристроїв необхідно дотримуватись не лише умов забезпечення високої інтенсивності процесів змішування, але й розширення технологічних можливостей під час приготування й перемішування розчинних сумішей будь-якої консистенції та різних за гранулометричним складом. Тому при дослідженні бетонозмішувачів необхідно встановити теоретичні основи, котрі базуються на використанні зміни кінематичних факторів, що визначають вплив геометричних параметрів робочих органів на рух часток розчину в зоні змішування.

Виходячи з цього, поставлене в даній роботі завдання дослідження характеру взаємодії суміші необхідних компонентів для приготування ніздрюватого бетону із робочими органами змішувачів та створення на цій основі установки для приготування ніздрюватих бетонів, обладнаної круглим змішувальним контейнером і змішувальними лопатями, який характеризується підвищеною надійністю та довговічністю й забезпечує високопродуктивне комплексно-механізоване приготування розчину для виготовлення ніздрюватого бетону, максимальну однорідність та необхідну консистенцію розчинів за умови зниження енергоспоживання та економії електроенергії під час експлуатації, є актуальним як для будівельної галузі, так і для будівельного машинобудування в цілому.

Мета дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення обладнання, яке забезпечувало підвищену ефективність робочих процесів при приготуванні ніздрюватих бетонів шляхом розроблення раціональних геометричних параметрів і кінематичних характеристик руху робочого органу. Це дозволить забезпечити максимальну однорідність складу будівельної суміші та знизити енергоспоживання під час експлуатації змішувальної установки. Головною особливістю розробленого обладнання є простота конструкції при мінімальних затратах енергії на приготування суміші.

Для реалізації зазначеної мети сформульовані та вирішені наступні задачі досліджень:

1. Проаналізувати стан питання та проведених попередніх досліджень впливу форми робочих органів на енерговитрати і визначити шляхи підвищення ефективності робочих процесів установки для приготування ніздрюватих бетонів.

2. Описати дію сил, які впливають на змішування ніздрюватих бетонів. Створити теоретичні основи розрахунку геометричних параметрів робочого органу установки для приготування ніздрюватих бетонів, його конструктивних і технічних параметрів.

3. Визначити основні чинники, що чинять вплив на енерговитрати при приготуванні ніздрюватих бетонів та отримано математичні залежності між ними.

4. Виготовити дослідний зразок та виконати експериментальні дослідження силової взаємодії робочих органів установки для приготування ніздрюватих бетонів з робочою сумішшю компонентів.

5. Дослідити залежність потужності, яка споживається установкою для приготування ніздрюватих бетонів, від геометричних і робочих параметрів змішувача, а також властивостей робочої суміші, що переміщується.

6. Виконати перевірку якості роботи змішувальної установки та

виготовленої суміші та визначити придатність її до використання.

7. Створити нову конструкцію установки для приготування ніздрюватих бетонів з приведенням розрахунку її технічних параметрів.

8. Впровадити результати дослідження у будівельне виробництво з доведенням її економічного ефекту та навчальних процес.

Об'єктом досліджень є процес приготування ніздрюватих бетонів і взаємодія з робочим органом змішувальної установки.

Предметом дослідження є параметри роботи установки для приготування ніздрюватих бетонів та визначення енерговитрат в залежності від форми робочих органів.

Методи дослідження. У процесі виконання даної дисертаційної роботи автором узагальнені існуючі методичні підходи в області створення машин для приготування будівельних сумішей, в тому числі по механізації процесу приготування ніздрюватих бетонів, як вітчизняних, так і закордонних учених, а також рекомендації фахових центрів із проблем підвищення ефективності обладнання для приготування будівельних розчинних сумішей.

Для оброблення вихідних даних використовувалися прийоми порівняльного та багатофакторного аналізу [1], методи логічного узагальнення та математичного моделювання (за допомогою ЕОМ). Це забезпечило наукову обґрунтованість відповідних позицій щодо визначення оптимальних кінематичних параметрів руху та геометричних параметрів робочих органів установки для приготування ніздрюватих бетонів, а також збіг результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

Основний зміст роботи. У *першому розділі* здійснено аналіз сучасного стану науково-технічних рішень для приготування будівельних сумішей, а саме ніздрюватих бетонів. Розглянуто роль процесу змішування у формуванні структури та фізико-механічних властивостей бетонних і розчинних сумішей. Проведено класифікацію змішувачів за принципом дії, режимом роботи та конструктивними ознаками, проаналізовано переваги й

недоліки змішувальних установок. Приділено увагу змішувачам примусової дії як найбільш перспективним для приготування ніздрюватих бетонів в умовах малого виробництва та на будівельному майданчику. Проаналізовано науковий внесок провідних науковців зокрема як І.І. Назаренко, І.А. Ємельянова, В.Й. Сівко, О.Г. Онищенко, О.Г. Маслов, Ю.С. Саленко та інших у галузі змішування та установок для виробництва будівельних матеріалів. Сформульовано мету та основні завдання дисертаційної роботи, обґрунтовано її актуальність і доцільність подальших теоретичних та експериментальних досліджень.

У *другому розділі* наведено теоретичне обґрунтування робочих процесів і режимів роботи установки для приготування ніздрюватих бетонів з вертикально розміщеним валом. На основі аналізу конструкції змішувальної установки та принципу дії сформовано кінематичну схему та визначено основні елементи, які входять до складу установки. Виконано аналіз взаємодії робочих органів із розчинною сумішшю. Встановлено дію основних сил, що виникають у процесі змішування. Обґрунтовано вплив геометричної форми лопатей на величину опору руху в розчинній суміші та запропоновано критерії для порівняльної оцінки різних профілів робочих органів. Розроблено математичну залежність для визначення потужності, що витрачається на переміщення частинок у робочому об'ємі змішувача. Отримано математичні залежності, що враховують витрати енергії на підтримку швидкісного режиму суміші у зоні вихрового потоку та на подолання сил опору при взаємодії лопатей із матеріалом.

У *третьому розділі* представлені експериментальні дослідження робочих процесів установки для приготування ніздрюватих бетонів. Для проведення експериментальних досліджень було створено установку для приготування ніздрюватих бетонів з вертикально розміщеним валом, яка має в комплекті змінні робочі лопаті різної конфігурації. Виконано ряд дослідів для кожного робочого органу, які мають різні форми лопатей (у формі

прямокутного перерізу, у формі умовно трикутного перерізу, у формі круглого перерізу) для визначення витрат електричної енергії. Проведено трифакторний експеримент з виведенням функціональної залежності для кожного робочого органу, що відрізняються формою лопатей, яка описує вплив параметрів (часу перемішування, частоти обертання робочого органу та рухливість суміші) на енерговитрати установки для приготування ніздрюватих бетонів. Проведено експериментальні дослідження з метою перевірки міцності готових бетонних виробів “зразків-кубів” виготовлених установкою для приготування ніздрюватих бетонів відповідності до ДСТУ Б В.2.7-45:2010.

У четвертому розділі наведено результати впровадження розробленої установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100 в умовах виробництва. Детально описано конструктивні особливості установки, принцип її роботи та наведені основні технічні характеристики, що підтверджують відповідність устаткування вимогам сучасного будівельного виробництва. Наведено методику розрахунку конструктивних параметрів змішувальної установки. Представлені результати виробничих випробувань дослідного зразка в реальних умовах будівельного майданчика на підприємстві ТОВ «АСФЕР ГРУП» та ТОВ «ПРИМУМ АКТИВ», які підтвердили працездатність, надійність та універсальність установки при приготуванні ніздрюватих бетонів. Запропоновані рекомендації щодо подальшого вдосконалення конструкції установки з урахуванням підвищення продуктивності, зменшення матеріалоємності і розширення функціональних можливостей.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному.

Вперше:

– на підставі аналізу сил, що діють на робочі органи установки для приготування ніздрюватих бетонів отримано залежність роботи, яка витрачається на переміщення лопаті в змішувальній суміші;

- отримано нові залежності при пуску та роботі установки для приготування ніздрюватих бетонів, які враховують витрати енергії на підтримку швидкісного режиму суміші у зоні вихрового потоку та на подолання сил опору при взаємодії лопатей із матеріалом;

- сформульовано залежність витрати електроенергії від впливу параметрів на робочий процес установки для приготування ніздрюватих бетонів.

Вдосконалено:

- вдосконалено конструкцію установки для приготування ніздрюватих бетонів та існуючих методів її розрахунку, обґрунтовано основні закономірності, що визначають енергосилові характеристики процесу.

Отримало подальшого розвитку:

- принципи взаємодії форми робочих органів при змішуванні ніздрюватих бетонів.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

- визначено раціональні діапазони параметрів робочих процесів установки для приготування ніздрюватих бетонів, які забезпечують найменшу витрат електроенергії.

- розроблено та виготовлено установку для приготування ніздрюватих бетонів з вертикально розміщеним валом, яка застосовується на не великих будівельних майданчиках;

- отримано патент на корисну модель «Установка для приготування ніздрюватих бетонів», а основні результатів досліджень, опубліковані у наукових статтях;

- обґрунтовано вибір змінних робочих органів різного профілю поперечного перерізу установки для приготування ніздрюватих бетонів;

- впроваджено результати роботи на підприємствах у будівельному виробництві м. Полтави компанії ТОВ «АСФЕР ГРУП» та ТОВ «ПРІМУМ АКТИВ», що підтверджується актами про впровадження.

– запропоновано підхід до експлуатації змішувача у складі малогабаритного обладнання на невеликих будівельних майданчиках.

Особистий внесок здобувача. Основні науково-практичні результати досліджень, представлені в дисертації, були отримані автором самостійно. У спільних наукових публікаціях автору належать такі внески:

– проведений аналіз змішувального обладнання та галузь його використання для будівельних сумішей [26, 39, 71, 99];

– запропонована конструкція змішувальної установки та виготовлений натурний зразок [100, 104, 120];

– запропоновано методику розрахунку енерговитрат при роботі установки для приготування ніздрюватих бетонів [103];

– визначено та перевірено вплив найбільш важливих факторів на енерговитрати установки для приготування ніздрюватих бетонів [110];

– проведено дослідження залежності витрат електроенергії від форми робочого органу установки для приготування ніздрюватих бетонів, виконав побудову поверхонь відгуків у вигляді тривимірних поверхонь [108];

– проведено теоретичне дослідження силової взаємодії робочого органу розробленого мобільного бетонозмішувача примусової дії з розчинною сумішшю [109];

– запропоновано ефективний спосіб використання установки для приготування ніздрюватих бетонів та подальші шляхи розвитку дослідження [119];

– проведений дослід з визначенням ефективності роботи обладнання на основі контролю якісних показників зразків бетону за міцністю [105, 117, 118].

Апробація результатів наукових досліджень. Основні положення й результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювалося в період 2023–2026рр. на таких науково – технічних конференціях:

– VI Всеукраїнська науково-технічна конференція «Створення,

експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – Полтава (2023);

– VIII Міжнародна науково-практична конференція «Modern problems of science education and society» – Київ (2023);

– VII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – Полтава (2024);

– IV Міжнародна науково-практична конференція «Perspectives of contemporary science: theory and practice» – Львів (2024);

– IX Міжнародна науково-практична конференція «Perspectives of contemporary science: theory and practice» – Львів (2024);

– VIII Всеукраїнська науково-технічна конференція «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – Полтава (2025);

– II Міжнародна науково-практична конференція «Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики», Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – Полтава (2025);

– Всеукраїнська наукова конференція «Підвищення ефективності експлуатації, обслуговування і сервісу дорожньо-будівельних машин та обладнання», Харківський національний автомобільно-дорожній університет. – Харків (2025);

– Семінари кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (2023–2026 рр.).

Публікації. Основні положення та результати проведених досліджень за темою дисертації опубліковано у 15 наукових працях, у тому числі: 6

статей у наукових фахових виданнях України категорії «Б»; 8 тез наукових доповідей в збірниках матеріалів всеукраїнських та міжнародних конференцій; 1 патент на корисну модель в «Український інститут інтелектуальної власності».

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 120 найменувань та додатків; викладена на 185 сторінках: основного тексту 133 сторінки, рисунків – 48, таблиць – 11.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ, МЕТА ТА ЗАДАЧІ ПРИ ДОСЛІДЖЕНІ ЗМІШУВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Процес змішування є одним із ключових етапів технології виготовлення будівельних сумішей, оскільки саме на цій стадії формується структура матеріалу, забезпечується рівномірний розподіл компонентів. Ефективність змішування безпосередньо впливає на міцність, однорідність, пластичність і експлуатаційну надійність бетонів та розчинів, зокрема ніздрюватих бетонів, для яких стабільність структури й рівномірність пороутворення мають вирішальне значення.

Вагомий внесок у розвиток теоретичних основ процесу змішування дисперсних будівельних матеріалів зробив Назаренко І.І. [2–4], у працях якого досліджено механіку взаємодії робочих органів машин із багатокомпонентними середовищами. Розвиваючи ці положення Ємельянова І. А. [5,6] зосередила увагу на вивченні реологічних властивостей будівельних сумішей і обґрунтувала вплив швидкісних режимів та тривалості перемішування на якість готового матеріалу.

Подальший розвиток цього напрямку пов'язаний із дослідженнями Сівка В.Й. [7–8] у яких розглянуто питання удосконалення конструкцій змішувального обладнання, аналізу динамічних навантажень у приводах і підвищення експлуатаційної надійності змішувачів. Доповнюючи зазначені роботи, Онищенко О.Г [9–11]. запропонував експериментальні підходи до оцінювання ефективності процесу змішування та методи адаптації лабораторних результатів до виробничих умов. Завершуючи аналіз, слід відзначити праці Маслова О.Г. [12–14] та Саленко Ю.С. [15–17], у яких комплексно досліджено взаємозв'язок між конструктивними параметрами робочих органів, режимами їх роботи та показниками якості будівельних сумішей, що стало підґрунтям для створення енергоефективних і технологічно гнучких змішувальних установок.

1.1 Сфера застосування та умови експлуатації бетонних сумішей

Бетонні роботи виконуються з метою укладання бетонної суміші для формування монолітних конструкцій будівель і споруд, зокрема фундаментів, колон, плит перекриття та інших несучих і огорожувальних елементів [18 – 24]. Технологія бетонування застосовується також при зведенні перегородок, несучих стін і конструкцій теплоізоляційного призначення [25 – 30].

Після завершення процесів твердіння сформований бетонний шар набуває комплексу експлуатаційних характеристик, серед яких визначальними є міцність, довговічність, водонепроникність і стійкість до дії механічних та кліматичних факторів. Набір зазначених властивостей забезпечує надійність конструкцій упродовж розрахункового строку служби та створює належні санітарно-гігієнічні та архітектурно-естетичні умови експлуатації об'єктів [31 – 32]. Незважаючи на поширення індустріальних методів будівництва із застосуванням збірних елементів, монолітне бетонування залишається одним із базових технологічних процесів, особливо під час спорудження складних інженерних об'єктів і конструкцій із підвищеними вимогами до просторової жорсткості.

В'язучі речовини є основним компонентом бетонної суміші, що забезпечує формування структури матеріалу внаслідок процесів гідратації та створення адгезійного зв'язку між зернами заповнювача [33 – 35]. За умовами твердіння їх поділяють на повітряні, що набувають міцності переважно в повітряному середовищі, та гідравлічні, здатні тверднути як на повітрі, так і у воді. До останніх належать, зокрема, портландцемент і шлакопортландцемент, що є найбільш поширеними у виробництві конструкційних бетонів.

Заповнювачі формують структурний каркас бетону, знижують усадкові деформації та сприяють рівномірному розподілу внутрішніх напружень у затверділому масиві. У традиційних важких бетонах використовують природний гравій або щебінь із характерним розміром зерен 5–20 мм. У

декоративних бетонах застосовують спеціальні заповнювачі, зокрема мармурову крихту, базальт або кольорові шлаки [36 – 38]. У ніздрюватих бетонах як мінеральний наповнювач переважно використовують пісок, а формування пористої структури забезпечується введенням піноутворювачів або газоутворювальних добавок, зокрема алюмінієвої пудри (рисунок 1.1) [38– 41].



Рисунок 1.1 – Склад ніздрюватих бетонів

До основних технологічних властивостей бетонних сумішей належать легкоукладальність, водоутримувальна здатність, міцність на стиск та морозостійкість. Легкоукладальність характеризує здатність суміші заповнювати форму під дією власної ваги або зовнішніх впливів без втрати однорідності. Водоутримувальна здатність визначає можливість збереження необхідної кількості води для перебігу гідратаційних процесів. Міцність на стиск є головним показником несучої здатності матеріалу, а морозостійкість його здатності зберігати фізико-механічні характеристики за багаторазових циклів заморожування та відтавання [24, 25, 32,].

Забезпечення заданих експлуатаційних показників досягається раціональним підбором складу бетонної суміші та оптимізацією співвідношення її компонентів, що дозволяє сформувати необхідну щільність,

пористість і структурну однорідність матеріалу [22, 31, 32,]. Під час транспортування та формування виробів важливо зберігати стабільність консистенції, запобігати розшаровуванню суміші та забезпечувати рівномірне заповнення форм без утворення зон застою. Це реалізується шляхом точного дозування складових і застосування обґрунтованих режимів змішування, що безпосередньо впливають на якість кінцевого продукту.

1.2 Характеристика ніздрюватого бетону та основні напрями його використання у будівництві

Будівельні роботи за своєю трудомісткістю та питомою вагою в загальному обсязі будівельного виробництва посідають особливе місце. Для його реалізації використовується широкий спектр матеріалів, що відрізняються фізико-механічними характеристиками, а також різноманітних технологічних рішень і способів організації процесів. Така різноманітність зумовлює підвищені вимоги до стабільності технологічних параметрів, ефективності застосовуваного обладнання та забезпечення якості кінцевої продукції [18, 21, 42, 43].

Починаючи з кінця XX століття, у вітчизняному та світовому будівництві спостерігається стійка тенденція до широкого використання ніздрюватих бетонів [44]. Застосування даного матеріалу дозволяє зменшити масу конструкцій і матеріалоємність без втрати вогнестійкості та несучої здатності, а також забезпечити високі тепло- і звукоізоляційні показники. У країнах Західної та Північної Європи, зокрема в Німеччині, Нідерландах, Скандинавських країнах та Чехії, газобетон набув значного поширення. У Чехії вироби з цього матеріалу часто називають «біоблоками», що підкреслює екологічність їх складу, оскільки для виготовлення використовуються виключно природні компоненти – цемент, пісок та вода, приклад застосування ніздрюватого бетону зображено на рисунку 1.2.



Рисунок 1.2 – Застосування ніздрюватого бетону в будівництві

Важливою перевагою газобетону є технологічна гнучкість його виробництва. Матеріал може виготовлятися як у стаціонарних умовах із застосуванням спеціалізованих ліній, так і безпосередньо на будівельних майданчиках або на підприємствах малої потужності. Такий підхід розширює сферу його використання та дозволяє адаптувати технологію до конкретних умов будівництва [45, 46].

Процес виготовлення ніздрюватих бетонів передбачає приготування цементно-піщаних сумішей із заданими параметрами щільності та різного складу. Якість готового матеріалу безпосередньо залежить від рівня механізації технологічних операцій і точності дотримання режимів перемішування [47, 48]. Значна частина енергетичних витрат у виробництві ніздрюватих бетонів припадає на операції доведення суміші до необхідної консистенції та її транспортування у форми. Ці процеси реалізуються за допомогою робочих органів змішувальних установок, зокрема лопатевих елементів, які забезпечують інтенсивну взаємодію компонентів. Проаналізувавши наукову літературу [18, 22, 29, 31, 44, 46, 49] отримаємо показники фізико-механічних властивостей ніздрюватих бетонів, що наведені в таблиці 1.1

Таблиця 1.1 – Фізико-механічні властивості ніздрюватих бетонів

Вид ніздрюватого бетону	Марка за середньою щільністю	Клас за міцністю на стиск не нижче	Коефіцієнт теплопровідності в сухому вигляді	Середня міцність на стиск, МПа
Теплоізоляційний	D 400	B 0,75; B 1	0,1	0,95
	D 500	B 1; B 1,5	0,12	1,4
Теплоізоляційно-конструкційний	D 600	B 1,5; B 2	0,14	2,1
	D 700	B 2; B 2,5	0,18	2,9
	D 800	B 2,5; B 3,5	0,21	3,4
	D 900	B 3,5; B 5	0,24	4,2
Конструкційний	D 1000	B 5; B 7,5	0,29	6,3
	D 1100	B 7,5; B 10	0,34	7,8
	D 1200	B 10; B 12,5	0,38	9,7

Аналіз сучасного застосування ніздрюватих бетонів підтверджує його універсальність. Матеріал використовується як тепло- і звукоізоляційний шар у покрівельних і підлогових конструкціях, для заповнення порожнин у кладці та пустотілих блоках, а також для виготовлення збірних стінових елементів, перегородок, плит перекриття й покриття, що підтверджує його універсальність і перспективність.

1.3 Сучасний стан технологій виробництва неавтоклавних ніздрюватих бетонів

Технології виготовлення ніздрюватих бетонів сформувалися як самостійний напрям у виробництві стінових та теплоізоляційних матеріалів, що поєднує процеси пороутворення, формування структури та керованого твердіння композиційних систем [50, 51, 52]. Особливості таких матеріалів зумовлюють необхідність чіткого розмежування технологічних підходів залежно від режимів та умов набору міцності [53, 54, 55]. Залежно від умов

твердіння ніздрюваті бетони класифікують на автоклавні та неавтоклавні [56, 57, 58, 59, 60].

Автоклавна технологія твердіння газобетону передбачає розміщення сформованих масивів або блоків у герметичній камері – автоклаві, з подальшою тепловологісною обробкою протягом регламентованого часу, який, як правило, становить близько 10–12 годин. Процес здійснюється за умов підвищеного тиску насиченої водяної пари та температури порядку 180 – 190 °С, що забезпечує формування стабільної кристалічної структури матеріалу [18, 31, 45, 49, 50, 61]. Застосування автоклавного методу зображено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Застосування автоклавного методу

Застосування автоклавування сприяє підвищенню однорідності пористої структури, зростанню міцності на стиск і зменшенню усадкових деформацій у процесі експлуатації, що дає можливість зводити зовнішні стіни без додаткових шарів утеплення за умови відповідності нормативним вимогам.

Водночас впровадження даної технології пов'язане з необхідністю використання складного та енергоємного обладнання, що обмежує її застосування переважно великими промисловими підприємствами, оснащеними спеціалізованими виробничими лініями.

Неавтоклавна технологія виготовлення газобетону характеризується відсутністю стадії тепловологісної обробки під підвищеним тиском, що суттєво знижує капітальні та енергетичні витрати виробництва. Твердіння матеріалу відбувається в природних умовах або за атмосферного пропарювання, що спрощує технологічну схему та дозволяє організувати виробництво на підприємствах малої та середньої потужності. Водночас така технологія, порівняно з автоклавною, зумовлює менші показники міцності та підвищені усадкові деформації матеріалу [18, 31, 45, 62, 63]. Неавтоклавна технологія в свою чергу потребує чіткого дотримання послідовності операцій, точного дозування компонентів і якісної підготовки, що супроводжується додатковими енерговитратами.

Приготування ніздрюватої бетонної суміші здійснюється, як правило, у швидкісних змішувачах примусової дії. Компоненти у точно віддозованій кількості завантажуються в робочу камеру та перемішуються за атмосферного тиску. Газоутворювальний компонент (алюмінієва пудра) попередньо піддається обробці поверхнево-активною речовиною з урахуванням додаткової кількості води при розрахунку складу. Тривалість перемішування становить близько трьох хвилин, що забезпечує однорідність системи перед початком процесу газоутворення. Схема організації виготовлення неавтоклавного ніздрюватого бетону зображено на рисунку 1.4.

Після перемішування суміш заливають у форми орієнтовно на третину їх висоти. Температура води замішування та форм підтримується на рівні близько 30 °C для стабілізації процесу структурування. У камері дозрівання відбувається газовиділення та підйом масиву. Після завершення формування пористої структури надлишковий шар зрізають, а вироби витримують у формах протягом доби. Подальше твердіння здійснюється в умовах нормального зберігання при температурі 20 °C та відносної вологості 95 %. Після витримки матеріалу протягом 28 діб визначають середню густину та міцність відповідно до нормативної методики.



Рисунок 1.4 – Схема організації виготовлення неавтоклавного ніздрюватого бетону

Неавтоклавний газобетон характеризується низькою середньою густиною, що зменшує транспортні витрати та навантаження на несучі конструкції. Під час зведення будівель зменшуються трудові витрати та підвищується швидкість монтажу. Рівномірно розподілена дрібнопориста структура забезпечує належні теплоізоляційні властивості та сприяє формуванню сприятливого мікроклімату в приміщеннях [18, 31, 45, 57, 63].

У даній дисертаційній роботі досліджується обладнання для приготування ніздрюватих бетонів, що твердне саме за неавтоклавною технологією, яка передбачає формування структури та набір міцності в природних умовах або за атмосферного пропарювання.

1.4 Аналіз сучасного стану та конструктивних особливостей змішувального обладнання для приготування ніздрюватих бетонів

Пересувні змішувачі для приготування ніздрюватих бетонів, як правило, інтегруються до складу малогабаритних виробничих ліній. Їх конструкція передбачає можливість транспортування в межах будівельного майданчика або виробничої ділянки за рахунок оснащення ходовими колесами, що забезпечує достатній рівень мобільності та гнучкості організації технологічного процесу. У практиці виробництва ніздрюватих бетонів в Україні застосовуються змішувачі різних типів і конструктивних схем [64, 65, 66]. Водночас значна частина наявного обладнання не повною мірою відповідає сучасним вимогам до інтенсивності перемішування, енергоефективності та забезпечення однорідності пористої структури [53, 67]. Це зумовлено використанням застарілих технічних рішень, недостатньою адаптацією конструкцій до специфіки властивостей сумішей з ніздрюватого бетону, а також обмеженими можливостями регулювання робочих параметрів. До характерних недоліків змішувачів належать висока вартість обладнання, складність конструкції та обмежена ремонтпридатність. У більшості випадків сервісне обслуговування здійснюється виключно виробником, що ускладнює експлуатацію в умовах віддалених будівельних об'єктів. Крім того, такі установки часто мають вузьку спеціалізацію та орієнтовані на приготування лише одного типу матеріалу, пінобетону або газобетону, що знижує їх універсальність.

Прикладом пересувного змішувача для виробництва газобетону є міксер-активатор «ГРБУ-0.25» зображений на рисунку 1.5 [68]. Конструктивно він характеризується верхнім завантаженням компонентів, верхнім розташуванням електродвигуна, пасовою передачею приводу та вертикальним розміщенням робочого органу. Робочий об'єм установки становить 250 – 500 л, що забезпечує продуктивність міні-лінії у межах 3 – 15 м³ газобетону за зміну залежно від комплектації та об'єму форм.

Виробнича лінія комплектується відповідною модифікацією міксера «ГРБУ–0.25» або «ГРБУ–0.35» залежно від заданої продуктивності.



Рисунок 1.3 – Змішувач для виробництва газобетону «ГРБУ-0.25»

Разом із тим, проаналізувавши конструкцію міксера-активатора «ГРБУ – 0.25» можна виділити низку експлуатаційних недоліків. До них належать підвищене розташування центра маси, що знижує стійкість обладнання, складність післязмінного технічного обслуговування, а також труднощі регулювання натягу пасової передачі. Зазначені обставини свідчать про доцільність удосконалення конструктивних і кінематичних параметрів змішувачів примусової дії з метою підвищення їх надійності, зручності експлуатації та енергоефективності.

Іншим прикладом обладнання для приготування ніздрюватих бетонів є змішувач типу «ПБУ-200» зображений на рисунку 1.6 [69]. За своєю конструкцією установка має верхнє завантаження компонентів, верхнє розташування електродвигуна, вертикальну орієнтацію робочого органу та пасову передачу. Конструкція допускає можливість переміщення установки в

межах будівельного майданчика та забезпечує приготування суміші з подальшим вивантаженням під тиском.



Рисунок 1.6 – Змішувач ніздрюватих бетонів ПБУ-200

Об'єм замісу становить 200 л ніздрюватого бетону за один технологічний цикл. Особливістю даної моделі є відсутність окремого піногенератора, формування пористої структури відбувається безпосередньо в змішувальній камері за рахунок інтенсивної роботи активатора. Компоненти суміші завантажуються у визначеній технологічній послідовності через приймальний отвір, після чого робочий орган обертається з частотою близько 750 об/хв. Загальна тривалість циклу приготування, включаючи завантаження та вивантаження, становить орієнтовно 3 хвилин. Вивантаження готової суміші здійснюється за рахунок надлишкового тиску повітря, яке подається в робочу ємність через систему нагнітання. Привід змішувача виконано на базі трифазного асинхронного електродвигуна потужністю 2,2 кВт.

Наявність ходових коліс і відносно компактні габарити забезпечують зручність транспортування та експлуатації в умовах обмеженого простору.

Обладнання використовується переважно для монолітного зведення фундаментів, перекриттів, стін і покрівель.

До обладнання, що застосовується для приготування ніздрюватих бетонів, належить також комплекс типу «FCM 5» зображений на рисунку 1.7 [70]. Установка комплексу має верхнє завантаження компонентів з верхнім розташуванням електроприводу, вертикально орієнтованим робочим органом та передачею крутного моменту через пасову передачу. Передбачено можливість транспортування агрегатів в межах будівельного майданчика та приготування суміші з подальшим вивантаженням під надлишковим тиском.



Рисунок 1.7 – Комплекс для виробництва ніздрюватих бетонів «FCM 5».

Технологічні можливості комплексу забезпечують отримання ніздрюватих бетонів у широкому діапазоні середньої густини від D100 до D1200, що розширює сферу його практичного застосування. Обладнання використовують для виконання монолітних заливок горизонтальних і похилих поверхонь, утеплення перекриттів, покрівель і підлог, приготування цементно-піщаних та інших будівельних розчинів. Крім того, змішувач застосовується у каркасному та малоповерховому будівництві, під час теплоізоляції трубопроводів і інженерних споруд, а також для виготовлення блоків і теплоізоляційних плит. Додатковими напрямками використання є дорожнє

будівництво, улаштування паркувальних майданчиків, пішохідних зон і тротуарів.

У результаті проведеного аналізу конструктивних і технологічних характеристик змішувачів типів «ГРБУ-0.25», «ПБУ-200» та «FCM 5», на основі отриманих даних сформовано порівняльну таблицю 1.2., в якій наведено технічну характеристику існуючих змішувачів для ніздрюватого бетону.

Таблиця 1.2 – Технічна характеристика змішувачів для ніздрюватого бетону

№ п/п	Назва параметру	ГРБУ-0.25	ПБУ-200	FCM 5
1	Об'єм змішувального контейнера, л	250	200	80
2	Об'єм готової суміші на виході, л	250	200	80
3	Споживча потужність, кВт	2,2	2,2	8
4	Напруга, В	220-380	380	220
5	Кількість обслуговуючого персоналу, чол	1	2	1
6	Розташування валу	Вертикально	Вертикально	Вертикально
7	Виробництво	Ніздрюваті бетони	Ніздрюваті бетони	Ніздрюваті бетони

Для всіх розглянутих змішувачів характерне верхнє завантаження компонентів, вертикальне розміщення робочого органу, верхнє компонування електродвигуна та застосування пасової передачі для передачі крутного моменту. Більшість конструкцій обладнано колесами для легкого переміщення по будівельному майданчику та можливістю вивантаження суміші під тиском.

1.5 Аналіз змішувальних органів установок примусової дії з вертикальним валом

Конструкція робочого органу визначає вплив гідродинамічних потоків, рівень енерговитрат та якість перемішування суміші змішувальною установкою [71, 72, 73]. Проаналізувавши технічну літературу [74–78] за конструкцією та формою робочого органу механічні мішалки поділяють на лопатеві з плоскими лопатями, пропелерні з гвинтовими лопатями, турбінні, а також спеціальні конструкції. Кожна з наведених груп має власні енергетичні характеристики, що зумовлює їх раціональне застосування залежно від густини та рухливості маси суміші, а також вимог до інтенсивності перемішування.

До найпростіших конструкцій робочих органів змішувачів належать лопатеві мішалки (рисунок 1.8) [74, 79, 80], що складаються з двох плоских лопатей, розташованих у вертикальній площині перпендикулярно до напрямку обертання. Лопаті закріплюються на вертикальному валу, який приводиться в рух через зубчасту або черв'ячну передачу. Частота обертання зазвичай становить 12–80 об/хв, а діаметр лопатей дорівнює приблизно 0,7 діаметра робочої ємності.

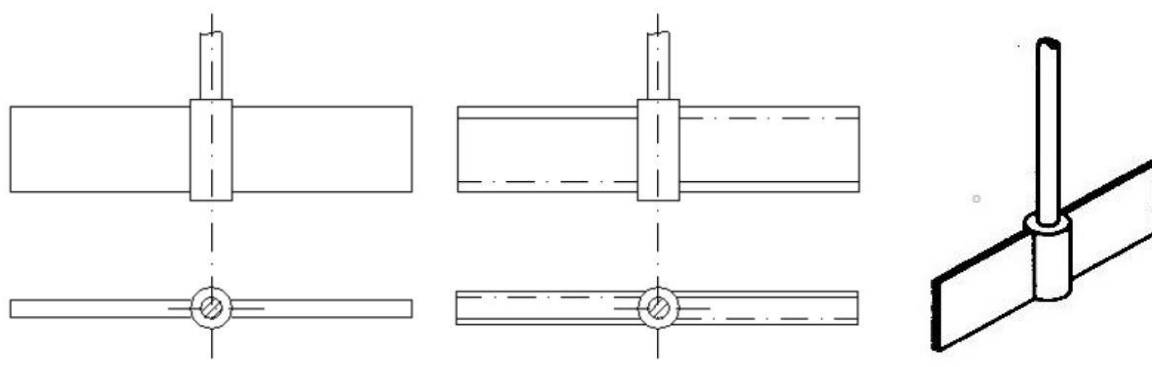
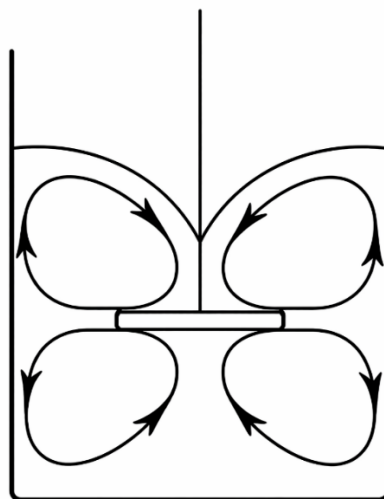


Рисунок 1.8 – Схема лопатевих мішалок

За малих частот обертання у рідині формується переважно круговий рух у горизонтальній площині, що відповідає траєкторії лопатей. Рідина

переміщується від центра ємності до її стінок у площині обертання лопаті, що спричиняє зниження тиску в центральній зоні. Утворений градієнт тиску викликає підсмоктування рідини з верхніх і нижніх шарів, унаслідок чого формується циркуляційний контур і забезпечується перемішування по всьому об'єму, як зображено на рисунку 1.9.



Рисунку 1.9 – Схема переміщення потоків усередині змішувача

Зі зростанням частоти обертання інтенсивність перемішування зростає, однак одночасно різко збільшується споживана потужність. Крім того, під дією відцентрових сил на вільній поверхні рідини утворюється воронка, глибина якої збільшується зі зростанням швидкості обертання. Формування воронки зменшує ефективний об'єм ємності та може негативно впливати на стабільність технологічного процесу.

Для забезпечення більш повного перемішування по висоті ємності на валу розміщують декілька пар горизонтальних лопатей, утворюючи багатолопатеві конструкції. Окремим різновидом є рамні мішалки, які зображені на рисунку 1.10 [81, 82, 83], що складаються з системи горизонтальних, вертикальних, а інколи й похилих лопатей. Рамні робочі органи характеризуються підвищеною жорсткістю та придатні для перемішування середовищ із підвищеною в'язкістю.

Перевагами лопатевих мішалок є простота конструкції та відносно низька вартість виготовлення, а також достатня ефективність при роботі з

середовищами помірної в'язкості. Разом із тим їх застосування обмежене при перемішуванні високов'язких систем і речовин, схильних до швидкого розшарування.

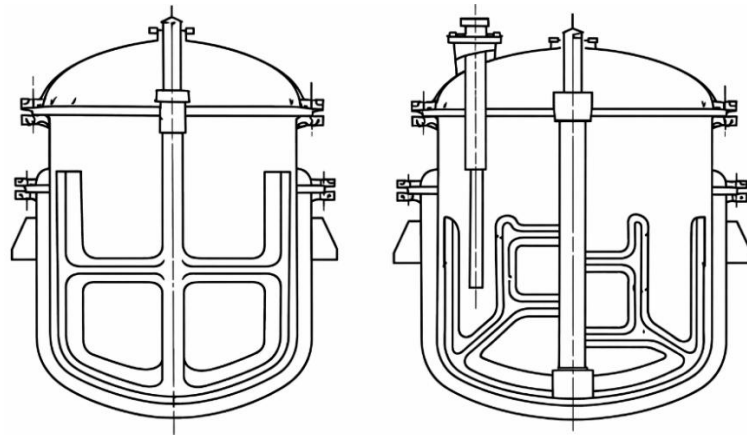


Рисунок 1.10 – Рамні робочі органи

При описаних режимів роботи лопатеві робочі органи забезпечують прийнятну якість перемішування за відносно невеликих енерговитрат. Водночас вони малопридатні для швидкого перемішування, що необхідно враховувати при виборі типу робочого органу для конкретних технологічних умов.

Іншим представником змішувальних органів установок примусової дії є пропелерні мішалки, які належать до високошвидкісних робочих органів осьового типу. Лопаті мають криволінійний профіль, аналогічний профілю гребного гвинта, із поступовою зміною кута нахилу від мінімального біля осі до максимального на периферії, що зображені на рисунку 1.11 [83, 84]. Така геометрія забезпечує перетворення крутного моменту на спрямований осьовий потік рідини.

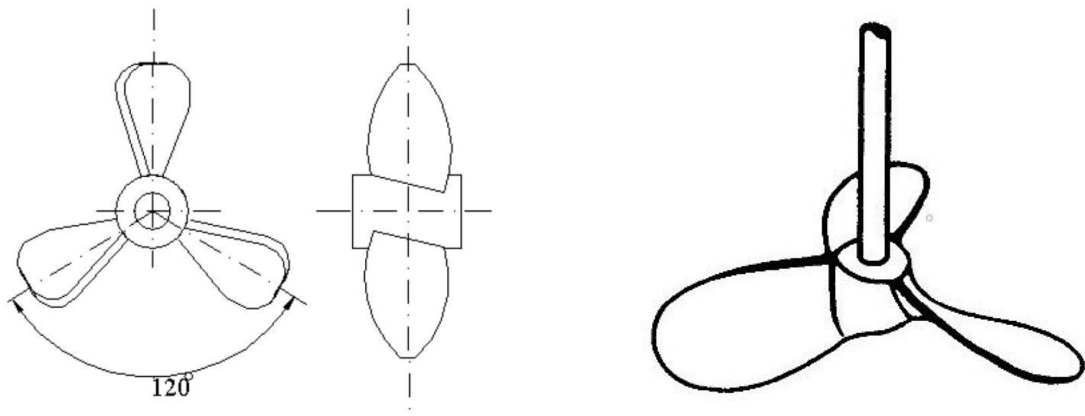
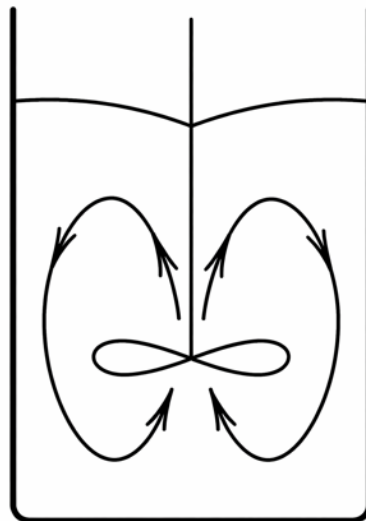


Рисунок 1.11 – Схема пропелерних мішалок

Під час обертання в рідкому середовищі пропелер діє за принципом гвинтової пари: лопаті створюють різницю тиску вздовж осі, внаслідок чого рідина переміщується в осьовому напрямі. Осьовий потік поєднується з тангенціальним рухом, формуючи гвинтову траєкторію переміщення частинок. Напрямок циркуляції залежить від орієнтації гвинтової поверхні та напрямку обертання. За правої гвинтової поверхні й обертання за годинниковою стрілкою потік спрямовується вгору, що зумовлює формування замкненого циркуляційного контуру в межах робочої ємності, схема переміщення потоків усередині змішувача зображено на рисунку 1.12.



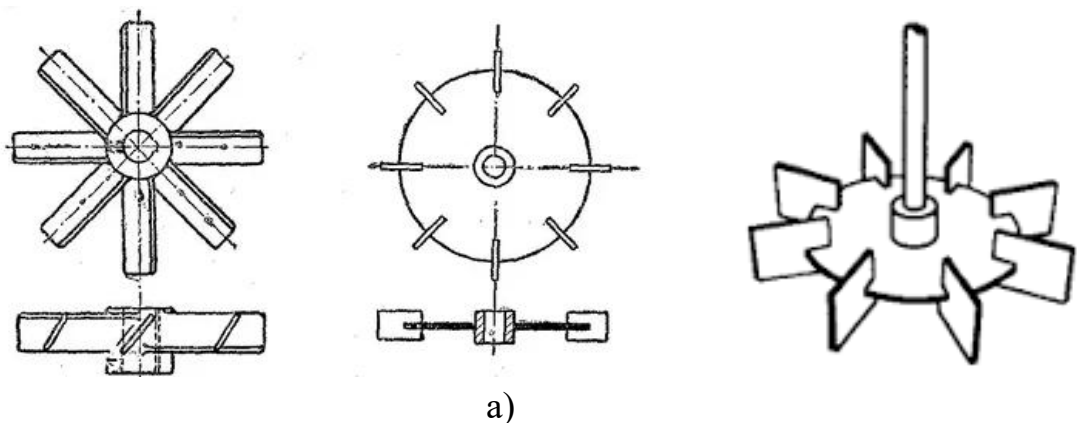
Рисунку 1.12 – Схема переміщення потоків усередині змішувача при перемішування пропелерними мішалками

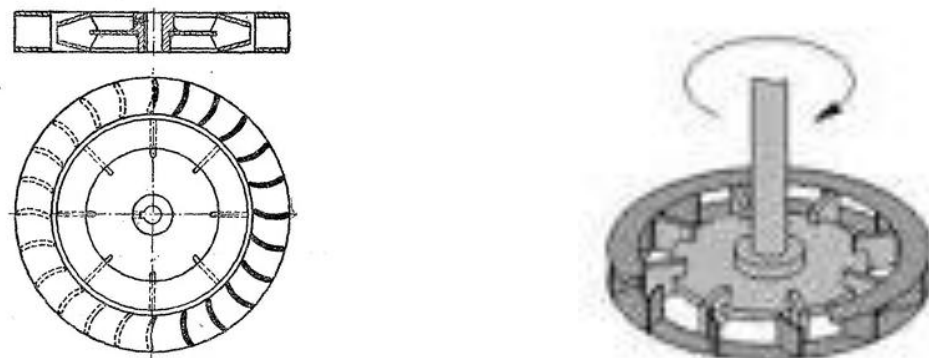
Кількість пропелерів на валу визначається висотою шару рідини. У разі значної висоти встановлюють декілька робочих органів для забезпечення

рівномірного перемішування по всьому об'єму. Діаметр пропелера зазвичай становить 0,25–0,30 діаметра камери змішувача, а частота обертання перебуває в межах 160–1000 об/хв, що істотно перевищує швидкість обертання лопатевих мішалок. Порівняно з лопатевими конструкціями, пропелерні мішалки формують більш інтенсивні осьові потоки, що забезпечує вищу швидкість вирівнювання концентрацій і температури в об'ємі.

До переваг пропелерних мішалок належать висока інтенсивність перемішування, відносно помірні енерговитрати навіть за високих швидкостей обертання та конструктивна простота, що зумовлює їх доступну вартість. Водночас їх ефективність істотно знижується при роботі з високов'язкими рідинами, а зона інтенсивного перемішування обмежується областю дії осьового струменя. Основними напрямками застосування пропелерних мішалок є інтенсивне перемішування рідин малої в'язкості, приготування емульсій і суспензій.

До високоефективних робочих органів радіально-осьового типу належать турбінні мішалки, що застосовуються для інтенсивного перемішування рідких і багатокомпонентних середовищ. За конструктивним виконанням їх поділяють на відкриті та закриті, які представлено на рисунку 1.13 [83, 85, 86]. Основним елементом є лопатеве колесо, яке за принципом дії подібне до робочого колеса відцентрового насоса. Робочий діапазон частот обертання становить орієнтовно 100–350 об/хв, що забезпечує формування потужних гідродинамічних потоків.





б)

Рисунок 1.13 – Схема турбінних мішалок

Відкриті турбінні мішалки (рисунок 1.13 а) [83, 85] є розвитком конструкції лопатевих мішалок. Лопаті розташовуються під певним кутом до вертикальної площини, унаслідок чого під час обертання створюються як радіальні, так і осьові потоки рідини. Поєднання цих складових руху сприяє інтенсивному перемішуванню значних об'ємів середовища. Ефективність процесу підвищується за наявності відбивних перегородок, які запобігають суцільному обертанню рідини разом із робочим органом та інтенсифікують турбулізацію потоку.

Закриті турбінні мішалки (рисунок 1.13 б) [83, 86] зазвичай встановлюють у направляючому апараті, що являє собою нерухоме кільце з лопатками, зігнутими під кутом $45\text{--}90^\circ$. Така компоновка забезпечує переважно радіальний напрям руху рідини за відносно невеликих втрат кінетичної енергії. Рідина надходить у робоче колесо через центральний отвір, змінює напрям руху від осьового до радіального та викидається з великою швидкістю по дотичній до колеса. Сформовані радіальні струмені поширюються по всьому перерізу апарата та досягають його віддалених зон, що забезпечує рівномірний розподіл компонентів у всьому об'ємі.

Перевагами турбінних мішалок є висока швидкість перемішування та розчинення, здатність ефективно працювати з середовищами підвищеної в'язкості, а також придатність до реалізації безперервних технологічних процесів. До недоліків належать конструктивна складність і підвищена вартість виготовлення порівняно з лопатевими та пропелерними аналогами.

Промислово виготовляються стандартизовані турбінні мішалки з діаметром робочого колеса 300, 400, 500 та 600 мм, що дозволяє адаптувати обладнання до різних масштабів виробництва.

Для перемішування високов'язких рідин і пастоподібних матеріалів застосовують спеціальні конструкції мішалок, які зображено на рисунку 1.14 [83], зокрема якірного типу (рисунок 1.14 а). Лопаті таких робочих органів мають конфігурацію, узгоджену з формою внутрішньої поверхні стінок і днища апарата. Завдяки мінімальному зазору між лопатями та корпусом забезпечується ефективне зняття налиплого шару матеріалу зі стінок. Застосування якірних мішалок дозволяє підтримувати стабільний тепловий режим у процесах, що супроводжуються теплообміном, оскільки усувається термічний опір відкладень на поверхнях нагріву або охолодження. Це знижує ризик локальних перегрівів і сприяє вирівнюванню температурного поля в об'ємі середовища. Якірні конструкції доцільні для середовищ із підвищеною в'язкістю, де формування інтенсивних турбулентних потоків є ускладненим.

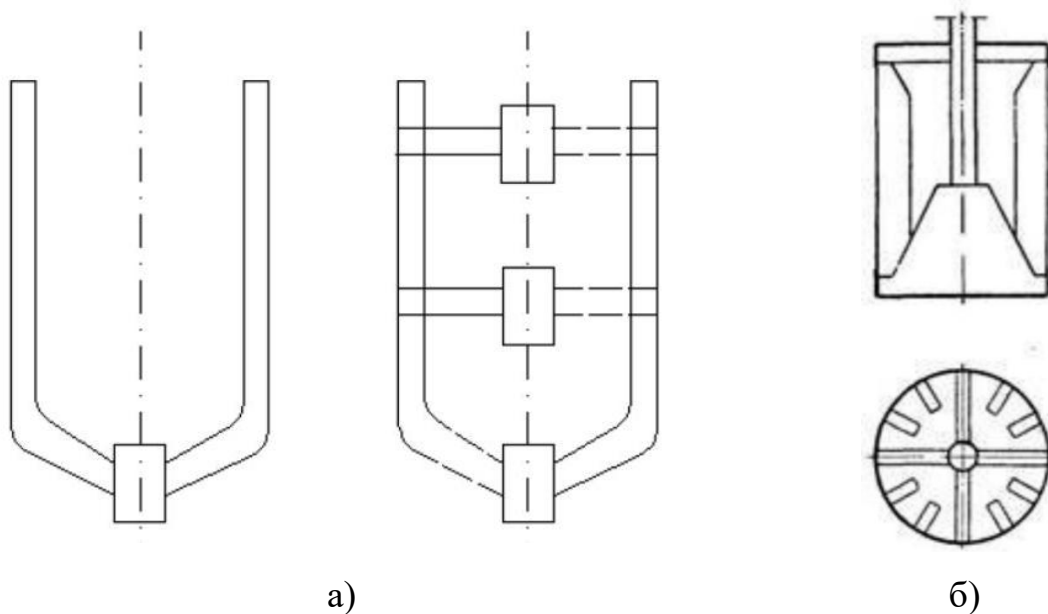


Рисунок 1.14 – Схема конструкцій спеціальних мішалок

Окремим різновидом спеціальних мішалок є барабанні конструкції (рисунок 1.13 б), виконані у вигляді лопатевого барабана типу «білячого

колеса». Такий робочий орган формує значну підйомну силу та забезпечує активне захоплення і переміщення рідини в радіально-осьовому напрямі. Це підвищує ефективність змішування речовин в системах «газ–рідина».

Раціональне застосування барабанних мішалок визначається співвідношенням геометричних параметрів: рекомендоване відношення діаметра барабана до діаметра апарата становить 1:4–1:6. Дотримання цього діапазону забезпечує формування стійкої циркуляції та достатню інтенсивність перемішування без надмірного зростання енерговитрат.

1.6 Аналіз попередніх досліджень залежності споживаної потужності змішувача

Аналіз змішувачів та робочих органів [64, 65, 68–70, 81, 85, 86] наведених в пункті 1.4 і 1.5 вказує на значну частина досліджень високошвидкісних змішувачів спрямована на встановлення закономірностей зміни споживаної потужності залежно від конструктивних і технологічних параметрів процесу. Особливу увагу приділено змішувачам, робота яких базується на реалізації ефекту псевдозрідження сипких сумішей, оскільки саме в таких режимах спостерігається суттєва зміна енергетичних характеристик привода.

У роботах показано, що споживана потужність визначається швидкістю обертання ротора, геометричними розмірами та формою лопатей, висотою шару матеріалу над робочим органом, а також фізико-механічними властивостями компонентів суміші, зокрема густиною, кутом внутрішнього тертя та вологістю [72, 73, 83]. Зі зростанням кутової швидкості вертикального валу відбувається перехід матеріалу через низку проміжних станів до псевдозрідженого режиму, що супроводжується зміною структури та характеру циркуляції частинок [74, 83, 87]. У кожному з цих режимів формується відмінний рівень гідродинамічного опору, що безпосередньо впливає на навантаження електродвигуна та величину споживаної потужності,

переміщення компонентів суміші при взаємодії з робочим органом змішувача зображено на рисунку 1.15. На початкових стадіях обертання (рисунок 1.15 1 - 2) переважає ковзаючий та обертальний рух шару з відносно невисоким енергоспоживанням. Подальше збільшення швидкості (рисунок 1.15 3 - 5) зумовлює формування зон інтенсивної циркуляції та розрідження матеріалу, що призводить до різкого зростання потужності. Після досягнення розвиненого псевдозрідженого стану характер залежності «потужність – швидкість обертання» може змінюватися та набувати нелінійної залежності (рисунок 1.15 6 - 8).

У досліджених конструкціях із вертикальним валом і прямокутними лопатями, встановленими під кутом 45° до горизонтальної площини, споживана потужність визначається поєднанням радіальної та осьової складових руху матеріалу [74, 78, 80]. Таким чином, попередні дослідження підтверджують, що енергетичні показники змішувачів тісно пов'язані з режимом руху суміші та конструктивною схемою робочого органу, що обґрунтовує необхідність подальшого вивчення цієї залежності.

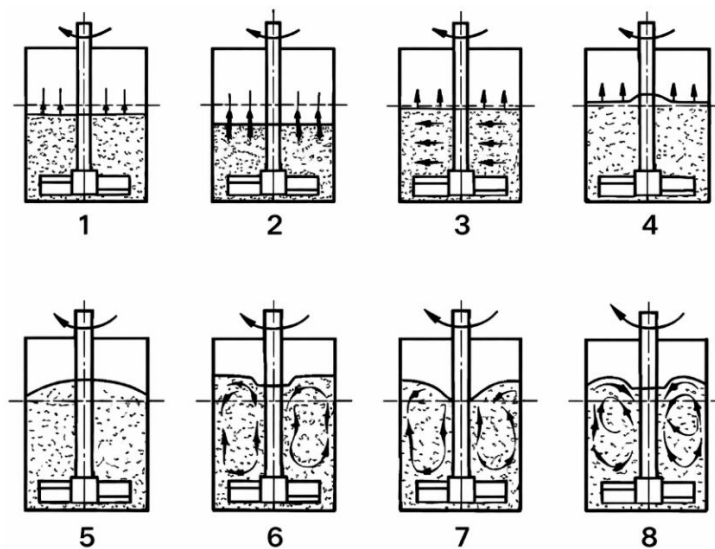


Рисунок 1.15 – Характер розподілу та переміщення компонентів суміші при взаємодії з робочим органом змішувача

Для оцінювання енергетичних витрат привода під час змішування матеріалів у наукових роботах використовується узагальнений баланс потужності, який враховує основні складові механічного навантаження на

робочий орган [88 – 91] сумарна споживана потужність $P_{\text{заг}}$ привода змішувача:

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{пуск}} + P_{\text{тяж}} + P_{\text{під}}, \quad (1.1)$$

де $P_{\text{пуск}}$ – потужність, необхідна для пуску електродвигуна, подолання сил тертя в підшипникових вузлах та втрат у передавальних механізмах;

$P_{\text{тяж}}$ – потужність, що витрачається на подолання дії сили тяжіння маси завантаженого матеріалу;

$P_{\text{під}}$ – потужність, пов’язана з підніманням матеріалу певної густини на висоту, яка визначається максимальною амплітудою його підйому в робочому об’ємі змішувача.

Серед українських вчених процесом підвищення ефективності та зменшення енерговитрат при приготування бетонних сумішей у змішувачах примусової дії займався І. І. Назаренко [2, 4, 92]. Метою досліджень було зниження коефіцієнта варіації змішування, обґрунтування раціональних кутів повороту лопатей робочих органів та побудови математичної моделі руху частинок у робочому об’ємі змішувача. У роботах встановлюється взаємозв’язок між геометричними параметрами лопатей, траєкторіями переміщення частинок і якістю змішування.

У дослідженнях Farhad Ein-Mozaffari [93] проаналізовано вплив геометричних параметрів робочого органу на енергетичні показники змішувальних установок. Результати свідчать, що мінімальне споживання енергії досягається за умови встановлення лопатей під кутом нахилу 60° , що забезпечує раціональне поєднання осьових і радіальних потоків матеріалу та зменшує гідродинамічний опір середовища. Додатково доведено, що збільшення ширини лопатей супроводжується зростанням навантаження на привод і, відповідно, підвищенням енергоспоживання.

Guanguo Ma [94] аналізує фактори, що визначають рівномірність перемішування в змішувачах примусової дії. Автор досліджує вплив кута встановлення лопатей, способу подачі компонентів у робочу камеру,

швидкості обертання робочого органу та гранулометричних характеристик крупного заповнювача на якість сформованої суміші та енерговитрати установки.

Експериментальні дослідження по оцінюванні енергетичних витрат змішувальних установок проводились також в лабораторії кафедри галузевого машинобудування Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» на спеціально розробленому обладнанні [90, 95, 96].

Ващенко К. М. [97] займався питаннями дослідження горизонтальних змішувачів та споживаної потужності досліджуваної установки. Для розрахунку загальної потужності стрічково-шнекового розчинозмішувача автор пропонував скористатись такою залежністю:

$$P_{\text{заг}} = z_1 \cdot P_{\text{СТР}} + z_2 \cdot P_{\text{КР}} + P_{\text{БОК}}, \quad (1.2)$$

де z_1 – кількість витків шнекової стрічки;

$P_{\text{СТР}}$ – потужність, яка витрачається для приведення одного витка стрічки в рух;

z_2 – кількість кронштейнів установки;

$P_{\text{КР}}$ – потужність, що витрачається для приведення одного кронштейну;

$P_{\text{БОК}}$ – потужність, витрачувана на подолання опору зсування суміші по боковим граням (кінцях шнекової стрічки).

Після перетворень було отримано повну залежність

$$\begin{aligned} P = & z_1 \cdot \omega \cdot \rho \cdot g \cdot h \frac{\pi}{4} (R_2 \cdot k_f \cdot k \left[(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2) + \frac{\omega^2 R}{g} (\varphi_2 - \varphi_1) \right] (R_2^2 - R_1^2) + \\ & + R_1 \left[2k_r \pi \cdot \sin \delta \frac{R_1}{\rho \cdot g \cdot h} \sqrt{(2\pi R_1)^2 + h^2} + 2k_r \cos \varphi_3 (R_1^2 - R_3^2) \right] - \\ & - 2Rk \sin \varphi_3 (R_2^2 - R_1^2) + 2z_2 a \cdot \omega \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot \sin \delta \frac{(R_1^2 - R_3^2)}{3} k \pi \sin \varphi_3 + \\ & + \omega (R_2^2 - R_1^2) k_r R \pi. \end{aligned} \quad (1.3)$$

де z_1, z_2 – відповідно кількість витків шнекової стрічки та кількість кронштейнів;

ω – кутова швидкість обертання стрічки шнека, с^{-1} ;

ρ – густина розчинної суміші, кг/м^3 ;

g – прискорення вільного падіння, м/с^2

h – крок витків стрічки, м;

R_1, R_2 – відповідно внутрішній та зовнішній радіуси шнекової стрічки, м;

R_3 – радіус валу змішувача, м;

R – середній радіус стрічки, $R=0,5 \cdot (R_1+R_2)$, м;

k_f – коефіцієнт тертя розчинної суміші по стінці бункера та по стрічці;

δ – кут нахилу стрічки, рад;

φ_1, φ_2 – відповідно початковий та кінцевий кути, на яких бункер щільно прилягає до стрічки шнека, рад;

φ_3 – кут входу стрічки в суміш, рад;

k_τ – коефіцієнт питомого опору зсуву, Па;

a – ширина кронштейна, м.

Рогозін І. А. [98] займався питаннями дослідження вертикальних змішувачів та споживаної потужності досліджуваної установки запропонувавши визначення потужність вертикального шнекового розчинозмішувача за формулою:

$$P_{\text{заг}} = P_{\text{ш}} + z_{\text{кр}} \cdot P_{\text{кр}} + z_{\text{сзт}} \cdot P_{\text{сзт}}, \quad (1.4)$$

де $P_{\text{ш}}$ – потужність, яку окремо споживає внутрішній шнек робочого органу змішувача;

$z_{\text{кр}}, z_{\text{сзт}}$ – відповідно кількість пластин кронштейнів та зовнішніх шнекових стрічок зі змінною твірною, занурених у розчинну суміш;

$P_{\text{сзт}}$ – потужність, яка витрачається для приведення зовнішньої шнекової стрічки в рух;

$P_{\text{кр}}$ – потужність, що витрачається для приведення в рух одного нижнього кронштейну в суміші.

Проведений аналіз наукових джерел та аналітичних залежностей свідчить про різноманітність підходів до визначення споживаної потужності

змішувальних установок. У більшості випадків запропоновані залежності мають прикладний характер та адаптовані під конкретний тип обладнання або умови експлуатації. Це спонукає необхідність проведення досліджень, встановлення узагальнених закономірностей та розроблення обґрунтованих розрахункових залежностей для конкретного типу змішувача.

1.7 Висновки, постановка задачі та мета досліджень

Аналізуючи спеціалізовані літературні джерела, вивчення існуючих конструктивних рішень обладнання для приготування ніздрюватих бетонів [50, 54, 62, 64–70] та результатів наукових праць [6, 17, 45, 76, 77, 81, 85] визначено пріоритетні напрями подальших теоретичних і експериментальних досліджень.

Спираючись на результати аналізу, метою даної дисертаційної роботи є дослідження особливостей процесу перемішування за допомогою лопаток бетонних сумішей різної рухомості та обґрунтування параметрів і режимів роботи робочого органу здатного забезпечити зниження енерговитрат процесу перемішування. Для цього пропонується створити та дослідити мобільний бетонозмішувача примусової дії для змішування ніздрюватих бетонів [99, 100], який має змінні робочі органи зображений на рисунку 1.16.

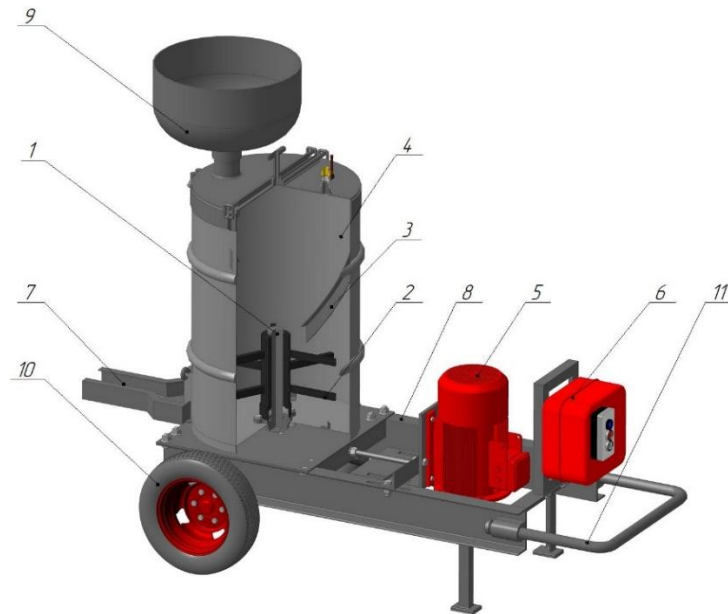


Рисунок 1.16 – Мобільний бетонозмішувача примусової дії:

- 1 – вертикальний вал; 2 – рухомі лопатки; 3 – зовнішня стрічка;
 4 – змішувальний контейнер; 5 – електродвигун; 6 – пульт керування;
 7 – вивантажувальний жолоб; 8 – рама; 9 – засипний отвір; 10 – колеса;
 11 – ручка.

Запропонована конструкція мобільного бетонозмішувача примусової дії для змішування ніздрюватих бетонів, складається з рами 8, на якій встановлено електричний двигун 5, сполучений через клинопасову передачу із змішувальним механізмом у вигляді лопаток 2, розташованих у змішувальному контейнері 4 на вертикальному валу 1. Завантаження компонентів суміші відбувається через засипний отвір 9 та при закінченні роботи вивантаження суміші відбувається через вивантажувальний жолоб 7. Запропонована конструкція змішувального обладнання обладнана кришкою для герметизації та штуцером для створення підвищеного тиску повітря всередині змішувального контейнеру. Керування процесом відбувається за допомогою пульта керування 6. Для зручного транспортування по будівельному майданчику установку пропонується обладнати колесами 10 та ручкою 11.

На основі аналізу науково-технічної літератури, патентного пошуку та огляду конструктивних рішень виробників бетонозмішувального обладнання, а також враховуючи сучасні галузеві вимоги, можна сформулювати такі висновки:

1. Укладання бетонної суміші виконуються для формування монолітних конструкцій будівель і споруд, зокрема фундаментів, колон, плит перекриття та інших несучих і огорожувальних елементів та від їх якості залежить подальша експлуатація всієї конструкції.

2. Одним із популярних матеріалів є ніздрюватий бетон, до складу якого входять пісок, цемент, вода та алюмінієва пудра, що використовується при будівництві житлового фонду України.

3. Залежно від умов твердіння ніздрюваті бетони класифікують на автоклавні та неавтоклавні. Які відрізняються способом твердіння та міцністю, що буде мати виріб після приготування.

4. Змішувачі для приготування ніздрюватих бетонів за своєю конструкцією характеризується верхнім завантаженням компонентів, верхнім розташуванням електродвигуна та вертикальним розміщенням робочого органу.

5. Робочий орган змішувачів для приготування ніздрюватих бетонів за конструкцією та формою поділяють на лопатеві з плоскими лопатями, пропелерні з гвинтовими лопатями, турбінні, а також спеціальні конструкції та працюють в різних частотах обертання робочого органу.

Актуальним напрямком при дослідженні процесу змішування ніздрюватих бетонів є дослідження впливу форми робочого органу на енерговитрати установки.

Метою роботи є розроблення та дослідження обладнання, яке забезпечувало підвищену ефективність робочих процесів при приготуванні ніздрюватих бетонів шляхом визначення оптимальних геометричних параметрів і кінематичних характеристик руху робочого органу.

Для вирішення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

1. Проаналізувати стан питання та проведених попередніх досліджень впливу форми робочих органів на енерговитрати і визначити шляхи підвищення ефективності робочих процесів установки для приготування ніздрюватих бетонів.

2. Описати дію сил, які впливають на змішування ніздрюватих бетонів. Створити теоретичні основи розрахунку геометричних параметрів робочого органу установки для приготування ніздрюватих бетонів, його конструктивних і технічних параметрів.

3. Визначити основні чинники, що впливають на енерговитрати при приготуванні ніздрюватих бетонів та отримано математичні залежності між ними.

4. Виготовити дослідний зразок та виконати експериментальні дослідження силової взаємодії робочих органів установки для приготування ніздрюватих бетонів з робочою сумішшю компонентів.

5. Дослідити залежність потужності, яка споживається установкою для приготування ніздрюватих бетонів, від геометричних і робочих параметрів змішувача, а також властивостей робочої суміші, що перемішується.

6. Виконати перевірку якості роботи змішувальної установки та виготовленої суміші та визначити придатність її до використання.

7. Створити нову конструкцію установки для приготування ніздрюватих бетонів з приведенням розрахунку її технічних параметрів.

8. Впровадити результати дослідження у будівельне виробництво з доведенням її економічного ефекту та навчальних процес.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ І РЕЖИМІВ РОБОТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ

Проведення теоретичного дослідження силової взаємодії робочого органу розробленого мобільного бетонозмішувача примусової дії з розчинною сумішшю. У межах дослідження виконати аналіз кінематичних характеристик змішувача, вплив форми лопаті на лобовий опір при змішуванні суміші та визначено потужність, необхідну для приведення в рух його лопатей з урахуванням фізико-механічних властивостей оброблюваного середовища та геометричних параметрів робочого органу.

Для досягнення було сформульовано та вирішено такі завдання:

1. Проаналізувати детально кінематичну схему запропонованої установки для приготування ніздрюватих бетонів, встановити основні її вузли та їх взаємодію з робочим процесом.
2. Визначити сили та їх дію на лопать в момент змішування робочого матеріалу.
3. Визначити закономірності впливу геометричних параметрів форми робочих органів на їхній опір середовищу та обґрунтувати єдиний критерій для ефективності досліджуваних лопатей.
4. Визначити математичну залежність для потужності, що витрачається на перемішування частинок у робочому об'ємі змішувача.

При проведенні математичного моделюванні було застосовано [101] сучасні методики фізико-математичного моделювання, притаманні прикладній механіці.

2.1 Аналіз конструктивної схеми установки для приготування ніздрюватих бетонів

Робочий процес у змішувачах примусової дії ґрунтується на інтенсивному перемішуванні компонентів суміші за рахунок обертального руху лопатей навколо вертикального валу. На основі аналізу літературних джерел та власних міркувань було створено схему установки для приготування ніздрюватих бетонів з вертикально розміщеним валом, яка представлена на рисунку 2.1 [101]. За мету було поставлено створити таку установку, що була б компактною, переміщувалась по будівельному майданчику та мала змогу змінювати робочі органи та частоту обертання лопатей змішувача.

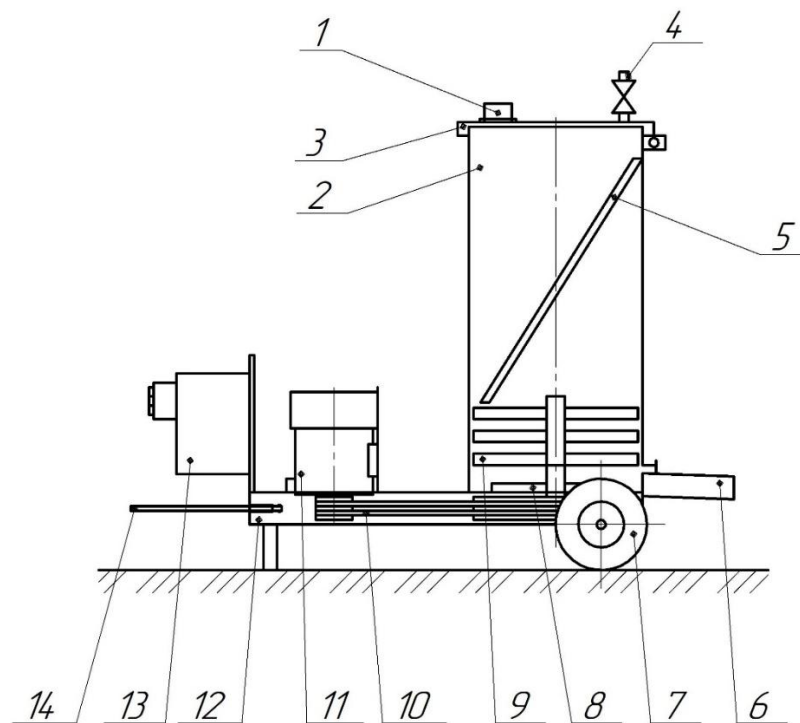


Рисунок 2.1 – Схема мобільної установки для приготування ніздрюватих бетонів

1 – засипний отвір; 2 – змішувальний контейнер; 3 – кришка; 4 – штуцер для подачі газів, або повітря; 5 – зовнішня стрічка; 6 – вивантажувальний жолоб; 7 – колеса; 8 – нижня стрічка; 9 – робочий орган; 10 – пасова передача; 11 – електродвигун; 12 – рама; 13 – пульт керування; 14 – ручка.

Принцип роботи спроектованого змішувача ґрунтується на обертанні лопатей, закріплених на вертикальному приводному валу в нижній частині змішувальної камери. Під час обертання лопаті здійснюють інтенсивний механічний вплив на суміш, забезпечуючи рівномірний розподіл компонентів у всьому об'ємі робочої зони. Згідно з наведеною схемою на рисунку 2.1 мобільна установка для приготування ніздрюватих бетонів використовується в будівництві для приготування різноманітних будівельних сумішей ніздрюватих бетонів і фібробетону та складається з рами 12, на якій встановлений через перехідну пластину електричний двигун 11 приводить в рух привід за допомогою клинопасової передачі 10 змішувального механізму, а саме змінних змішувальних лопаток 9 у змішувальному контейнері 2. Для того щоб уникнути витрат матеріалу під час процесу перемішування та для забезпечення безпеки використовується кришка 3, на ній знаходиться засипний отвір 1, щоб контролювати процес змішування та засипати матеріал. Для приготування суміші на кришці знаходиться штуцер 4, який використовується для подачі (за потребою) інертного газу або повітря.

Розвантаження змішувального контейнеру відбувається через вивантажувальний жолоб 6. З метою покращення змішування всередині змішувального контейнера по бокам встановлені додаткові лопатки 5 та 8, які забезпечують правильну орієнтацію та рух матеріалу в змішувальному контейнері під час процесу приготування суміші в вертикальній та горизонтальній площині. Керування пристроєм здійснюється за допомогою пульта керування 13, який кріпиться до рами для забезпечення максимальної зручності для оператора. Цей пульт використовується для запуску та зупинки робочого процесу, надаючи оператору легкий спосіб управління змішувачем.

Із метою зручного переміщення пристрій було обладнано колесами 7 прикріпленими до рами 12 та ручкою 14, для кращої мобільності установки, дані елементи дозволяють зручно переміщати змішувач на будівельному майданчику.

Виходячи з теоретичних міркувань та конструктивних рішень, є доцільним провести більш глибоке теоретичне вивчення основних параметрів установки і характеру дії сил на перемішуваний матеріал у змішувальному контейнері. Даний підхід дозволить встановити закономірності взаємодії робочих органів з сумішшю, визначити вплив на інтенсивність перемішування. За отриманими співвідношеннями можна провести подальші дослідження з обґрунтуванням раціонального вибору конструктивних та кінематичних параметрів змішувальної установки та визначити шляхи зниження енерговитрат при приготуванні ніздрюватих бетонів.

2.2 Аналіз сил що діють на лопать в момент змішування

Вибір раціональної форми робочого органу (лопатеї) змішувальної установки безпосередньо впливає на однорідність суміші та рівень енергоспоживання установки. При виборі конструкції робочих органів необхідно дотримуватися принципу технологічності. Форма лопаті повинна забезпечувати високу ефективність обтікання робочого органу, залишаючись при цьому простою у виготовленні. Спрощення складності профілю дозволяє знизити виробничі процеси та матеріаломісткість, що є визначальним чинником у формуванні конкурентоспроможної собівартості обладнання. На рисунку 2.2 приведений робочий орган змішувальної установки з різним профілем лопаті.

Аналіз фізичного процесу, котрий відбувається у змішувачі, показує, що основними складовими опору руху робочого органу (лопаті) в масі будівельної розчинної суміші будуть: тертя суміші по лопаті і стінках та нижній частині змішувального контейнеру. Ці складові опору залежать від властивостей будівельної розчинної суміші, геометричних параметрів робочого органу змішувача та його режиму роботи, ступеня заповнення бункера.

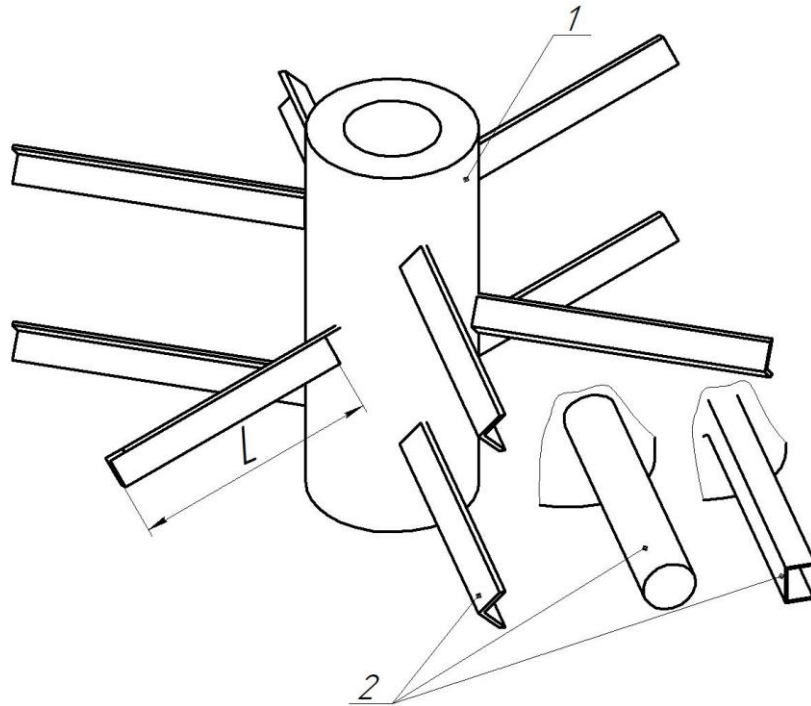


Рисунок 2.2 – Лопать установки для приготування ніздрюватих бетонів:
1 – маточина робочого органу; 2 – лопать з різним поперечним перерізом
(умовно трикутного, круглого та квадратного перерізу)

Для ефективного проектування змішувальної установки та подальшого її дослідження передбачається визначення та аналіз сил, що виникають під час перемішування бетонної суміші. У першу чергу потрібно встановити залежності між силою опору руху робочих органів у середовищі, сил тертя між компонентами суміші та елементами змішувача. Встановлення даних залежностей між цими силами, конструктивними параметрами лопатей та кінематичними режимами роботи дозволить оцінити енергоспоживання процесу перемішування та забезпечити стабільну роботу установки з необхідною якістю приготування бетонної суміші. На рисунку 2.3 зображена схема сил, що діють на робочий орган змішувача в процесі роботи.

Сили, які створюють опір та виникають при русі робочого органу установки для приготування ніздрюватих бетонів будуть складатися із сил опору, що діють на лопать довжиною L , прикладених до елементарної ділянки dS та помножено на кількість лопатей. Прийнемо, що суміш розміщується у

горизонтальній площині повністю покриває лопать, а положення елементарної ділянки dS задається відстанню від нижньої площини бункера.

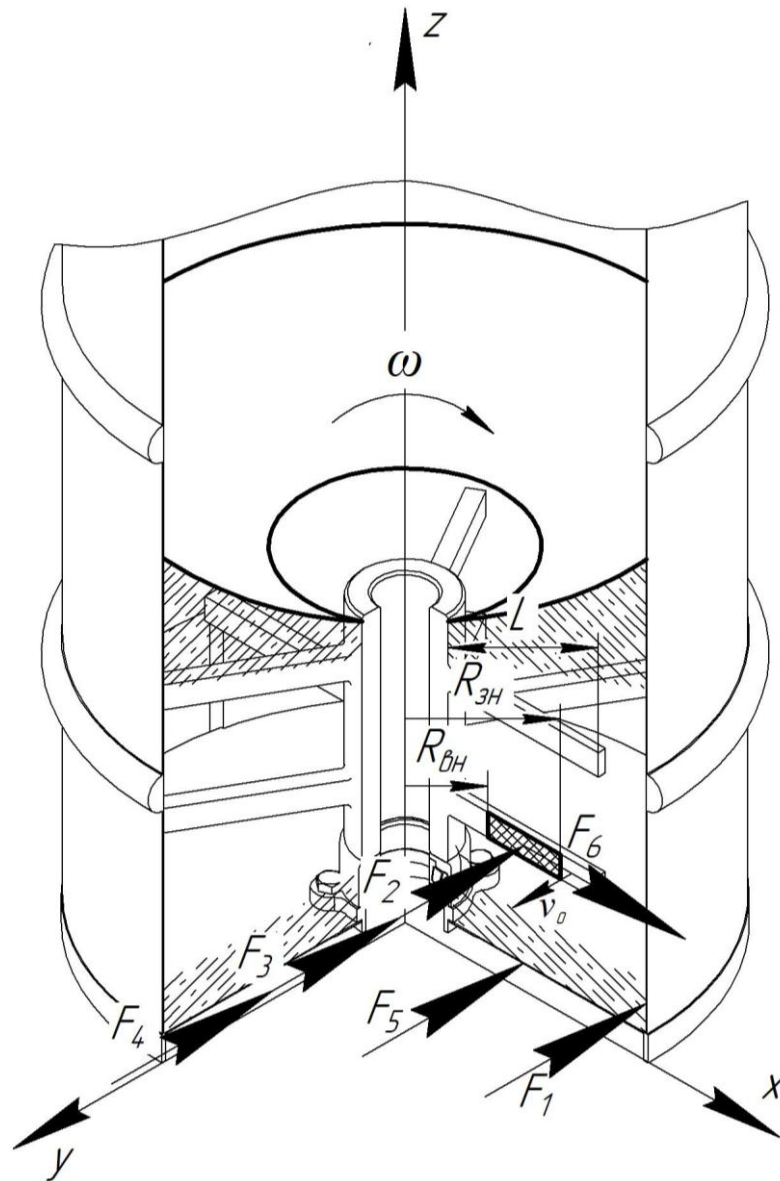


Рисунок 2.3 – Схема сил, що діють на робочий орган змішувача

На початку роботи однією з перших сил, що створює опір переміщення суміші, є сила тертя F_1 будівельної розчинної суміші. Вона виникає внаслідок взаємодії частинок в суміші та стінками змішувального контейнеру. Сила тертя F_1 впливає на початковий момент опору привода, визначає характер навантаження на вал і лопаті змішувача, а також формує початкові енерговитрати під час виходу установки до робочого режиму.

Сила тертя F_1 будівельної розчинної суміші, що виникає по стінці змішувального контейнера внаслідок дії відцентрової сили інерції маси суміші, яка розташована перед ділянкою dS ,

$$F_1 = k_f \cdot G_1 \cdot \frac{\omega^2 \cdot R_c}{g}, \quad (2.1)$$

де G_1 – вага будівельної розчинної суміші, що переміщується елементарною ділянкою dS , Н;

ω – кутова швидкість обертання робочого органа, об/с;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

k_f – коефіцієнт тертя будівельної розчинної суміші по днищу бункера;

R_c – радіус до центра ваги об'єму суміші, що переміщується елементарною ділянкою dS , може бути визначений як:

$$R_c = R_{zn} - R_{вн}, \quad (2.2)$$

де R_{zn} – радіус до зовнішнього краю об'єму суміші, яка переміщується елементарною ділянкою dS , м;

$R_{вн}$ – радіус до внутрішнього краю об'єму суміші, яка переміщується елементарною ділянкою dS , м.

Вплив на роботу змішувальної установки також має сила F_2 тертя будівельної розчинної суміші, що виникає внаслідок дії тиску її власної ваги. Сила F_2 викликана притисканням шарів суміші до поверхонь робочих органів під дією відцентрових сил.

Сила F_2 тертя будівельної розчинної суміші по ділянці dS внаслідок тиску власної ваги суміші, що захоплюється ділянкою dS ,

$$F_2 = k_f \cdot G_1 \cdot \cos^2 \delta, \quad (2.3)$$

де δ – кут нахилу ділянки dS до площини обертання, градус.

Сила, що виникає внаслідок дії робочого органу на суміш під час його обертального руху та викликає витіснення матеріалу з зони перед лопаттю називається сила лобового опору F_3 будівельної розчинної суміші. Показник сили F_3 визначається швидкістю переміщення, а також густиною і рухливістю розчинної суміші.

Сила F_3 лобового опору, що утворюється внаслідок руху робочого органу в будівельній розчинній суміші з лінійною швидкістю v_o визначається:

$$F_3 = C_f \cdot k_{л.о.} \cdot \rho \cdot \frac{v_o}{2}, \quad (2.4)$$

де C_f – коефіцієнт опору тертя;

ρ – густина будівельної розчинної суміші, кг/м³;

v_o – лінійна швидкість руху лопаті у будівельній розчинній суміші, м/с;

μ – динамічна в'язкість будівельної розчинної суміші, Па·с;

$k_{л.о.}$ – лобовий тиск на лопать.

Значення лінійної швидкості руху v_o лопаті в будівельній розчинній суміші залежить від радіуса обертання, тому формулу (2.4) слід записати, виразивши лінійну швидкість як

$$v_o = \omega \cdot R \quad (2.5)$$

де ω – кутова швидкість обертання робочого органу, рад/с;

R – радіус обертання, на якому визначається лінійна швидкість v_o , м.

Тоді

$$F_3 = C_f \cdot k_{л.о.} \cdot \mu \cdot \rho \cdot \frac{\omega \cdot R}{2}, \quad (2.6)$$

Один кінець лопаті знаходиться на осі обертання $R = 0$, а інший – на відстані, котра дорівнює її довжині $R = L$. Тоді опір руху робочого органу змішувача можна знайти, проінтегрувавши вираз (2.6) по радіусу обертання R (рисунок 2.3). Таким чином, у результаті отримаємо момент сил опору M_3 , що прикладений до лопаті і створюється силою лобового опору F_3 .

$$M_3 = \int_0^L \left(C_f \cdot k_{\text{л.о.}} \cdot \mu \cdot \rho \cdot \frac{\omega \cdot R}{2} \right) \cdot dR, \quad (2.7)$$

де L – максимальний радіус лопаті, що дорівнює його довжині, м.

Провівши інтегрування, одержимо вираз моменту сили лобового опору M_3 у такому вигляді:

$$M_3 = C_f \cdot k_{\text{л.о.}} \cdot \mu \cdot \rho \cdot \omega \cdot \frac{R^2}{4}, \quad (2.8)$$

Важливе значення відіграє сила F_4 , яка створює опір зсуванню будівельної розчинної суміші. Сила виникає внаслідок внутрішнього опору матеріалу деформаціям зсуву при дії руху лопатей робочого органу. Сила зсування F_4 будівельної розчинної суміші визначається ділянкою dS , що переміщується відносно суміші:

$$F_4 = \Delta \cdot k_\tau, \quad (2.9)$$

де Δ – площа зсування будівельної розчинної суміші внутрішньою стороною елементарної ділянки dS , м²;

k_τ – коефіцієнт опору, який характеризує в'язкі властивості будівельної розчинної суміші, Па.

Сила F_5 тертя будівельної розчинної суміші, яка переміщується нижнім рядом лопатей по днищу бункера внаслідок тиску суміші на дно від складової власної ваги G_2 :

$$F_5 = k_f \cdot G_2, \quad (2.10)$$

де G_2 – вага будівельної розчинної суміші, що переміщується нижнім кронштейном, Н.

При роботі змішувальної установки та створення обертального руху робочого органу виникає сила, що має назву відцентрова сила F_6 . Вона викликана рухом частинок суміші за криволінійною траєкторією при обертанні лопаті вертикального валу. Під дією відцентрової сили матеріал переміщується від осі обертання до пристінкової зони змішувального

контейнеру. Відцентрова сила F_6 створена лопаттю змішувальної установки буде визначатись:

$$F_6 = \frac{m_m \cdot \omega_0^2 \cdot L^2}{L}. \quad (2.11)$$

де m_m – маса матеріалу суміші, кг;

ω_0 – частота обертання матеріалу суміші.

Робота, яка витрачається на переміщення лопаті в змішувальній суміші, визначається сумою сил, що виникають у процесі змішування. Тому роботу визначають з такого виразу:

$$\begin{aligned} A_l = & (F_1 \cdot R_c + F_2 \cdot R_c + F_4 \cdot R_{\text{вн}} + F_5 \cdot x_1 + M_3) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = \\ & = (k_f \cdot G_1 \cdot \frac{\omega^2 \cdot R_c}{g} \cdot R_c + k_f \cdot G_1 \cdot \cos^2 \delta \cdot R_c + \Delta \cdot k_\tau \cdot R_{\text{вн}} + \\ & + k_f \cdot G_2 \cdot x_1 + C_f \cdot k_{\text{л.о.}} \cdot \mu \cdot \rho \cdot \omega \cdot \frac{R^2}{4}) \cdot (\varphi_2 - \varphi_1), \end{aligned} \quad (2.12)$$

де x_1 – радіус прикладання до нижньої лопаті рівнодійної від сили F_5 , м.

Визначення сил, які виникають при роботі змішувальної установки для приготування ніздрюватих бетонів, є необхідним етапом для аналізу процесу перемішування. Взяття до уваги дії сил є необхідним для правильного вибору потужності електродвигуна, забезпечення надійності та зниження енерговитрат у процесі змішування. Результати даного аналізу є основою для визначення раціональної форми робочих органів.

Аналізуючи визначені сили (F_2, F_3, F_4) можна з певністю сказати, що для зниження споживання електроенергії потрібно оптимізувати та підбирати такий робочий орган, у якого геометрія лопатей мала найменший лобовий тиск на лопать, що в свою чергу покращить ступінь обтікання та кращу проникність між шарами матеріалу.

2.3 Встановлення лобового тиску на лопать установки для приготування ніздрюватих бетонів

Лобовий опір виникає під час роботи змішувальної установки та зумовлений взаємодією поверхні лопаті з шарами суміші, яку перемішують. У процесі руху робочого органу суміш, розташована перед лопаттю, зазнає стискання, унаслідок чого відбувається її витіснення в напрямках із меншим тиском, тобто вгору, вниз та в бокові зони змішувальної камери. Одночасно за лопаттю формується область зниженого тиску, яка заповнюється сумішшю, що обтікає робочий орган. Ефективність перемішування обґрунтовується площею поперечного перерізу лопаті, тобто площею її проекції до площини, перпендикулярної до напрямку руху робочого органу. Зі збільшенням цієї площі зростає об'єм суміші, котра змушена огинати лопать, призводить до зростання сили опору руху робочого органу. Лобовий опір також доцільно розглядати як опір форми, оскільки його величина безпосередньо залежить від геометричних параметрів і обтікання лопаті.

Складова сили опору, що безпосередньо залежить від лобової площі лопаті та швидкості її руху в середовищі, визначається як сила лобового опору F . Саме ця складова є домінуючою у загальному балансі сил опору і визначає основну частину енергетичних витрат установки. За результатами аналізу встановлено, що частка лобового опору може сягати до 60 % від сумарного опору руху робочого органу, а отже, істотно впливає на споживання електричної енергії приводом змішувача.

Для визначення лобового тиску на лопать $k_{л.о.}$ установки для приготування ніздрюватих бетонів, у даній роботі пропонується методика на основі дослідження руху лопаті у ємності, яка заповнена розчинною сумішшю. На рисунку (рисунк 2.4) зображено геометричні параметри кожної з лопатей робочого органу. На лопать під час руху діє сила лобового опору F відносно маси розчину, що залишається нерухомою, по всьому периметру лопаті.

у формі квадратного перерізу; $S = (2L + 2b \cdot \cos \alpha) \cdot \Delta x$ для лопаті у формі умовно трикутного перерізу; $S = (2L + \pi \cdot b) \cdot \Delta x$ для лопаті у формі круглого перерізу.

$k_{л.о.}$ – лобовий тиск на лопать, Па.

Роботу A , на переміщення робочого органу в суміші можна розрахувати:

$$A = F \cdot L = S \cdot k_{л.о.} \cdot L, \quad (2.14)$$

де L – дистанція переміщення робочої поверхні лопаті, м.

Потужність P , яка необхідна для переміщення лопаті в розчинній суміші, визначається за такою залежністю:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{S \cdot k_{л.о.} \cdot L}{t} = v_o \cdot S \cdot k_{л.о.}, \quad (2.15)$$

де t – час, за який виконується робота A , с;

$v_o = L / t$ – швидкість руху лопатки, м/с.

Використавши рівняння 2.15 можна отримати рівність:

$$k_{л.о.} = \frac{P}{v_o \cdot S}, \quad (2.16)$$

Або для кожного виду лопатей з урахуванням того, що потужність P є добутком сили F на швидкість v_o ,

– для лопаті у формі квадратного перерізу:

$$k_{л.о.} = \frac{F}{(2L + 2b) \cdot \Delta x}, \quad (2.17)$$

– для лопаті у формі умовно трикутного перерізу:

$$k_{л.о.} = \frac{F}{(2L + 2b \cdot \cos \alpha) \cdot \Delta x}, \quad (2.18)$$

– для лопаті у формі круглого перерізу:

$$k_{л.о.} = \frac{F}{(2L + \pi \cdot b) \cdot \Delta x}. \quad (2.19)$$

Визначення експериментально коефіцієнта $k_{л.о.}$ базується на зіставленні вимірної сили лобового опору F із геометричними параметрами лопаті для визначення раціональної форми робочого органу.

2.4 Визначення потужності, що витрачається на перемішування частинок у робочому об'ємі змішувача

З метою забезпечення раціонального вибору конструктивних і кінематичних параметрів установки для приготування ніздрюватих бетонів, а також зниження енерговитрат у процесі приготування будівельних сумішей, виникає необхідність у визначенні потужності, що витрачається на перемішування частинок у робочому об'ємі змішувача для приготування ніздрюватих бетонів [102].

Загальна потужність P бетонозмішувача примусової дії, яка необхідна для змішування частинок матеріалу, складається з потужності, що витрачається на підтримку швидкісного режиму суміші в зоні вихрового руху $P_{ш.р.}$, та потужності, що витрачається на подолання сил опору руху лопаті $P_{о.р.л.}$ змішувальної установки [103].

Загальна потужність P установки для приготування ніздрюватих бетонів визначається:

$$P = P_{ш.р.} + P_{о.р.л.}, \quad (2.20)$$

де $P_{ш.р.}$ – потужність, що витрачається на підтримку швидкісного режиму суміші;

$P_{о.р.л.}$ – потужність, що витрачається на подолання сил опору руху лопаті.

Для обчислення спожитої потужності на підтримку швидкісного режиму суміші в зоні вихрового руху $P_{ш.р.}$ створюємо розрахункову схему, яку

зображаємо на рисунку 2.5 та визначимо енергію вихрового руху E в зоні вирви:

$$E = 2 \cdot \pi \cdot c \cdot a_0^2 \cdot (h_{max} - h_{min}) \int_{\pi}^{R_{max}} \left(\frac{d\delta}{dr} \right)^2 r dr, \quad (2.21)$$

де h_{max} – максимальна висота підйому матеріалу в бункері, м;

h_{min} – глибина утвореної воронки, м;

a_0 – положення вектору швидкості;

δ – кут нахилу вектору швидкості;

c – коефіцієнт, який приймаємо виходячи теоретичних досліджень.

прийняти рівним:

$$c = \frac{m}{R_0}, \quad (2.22)$$

де m – маса матеріалу, яка бере участь у вихровому русі, кг;

R_0 – радіус утворений у верхній частині воронки, м;

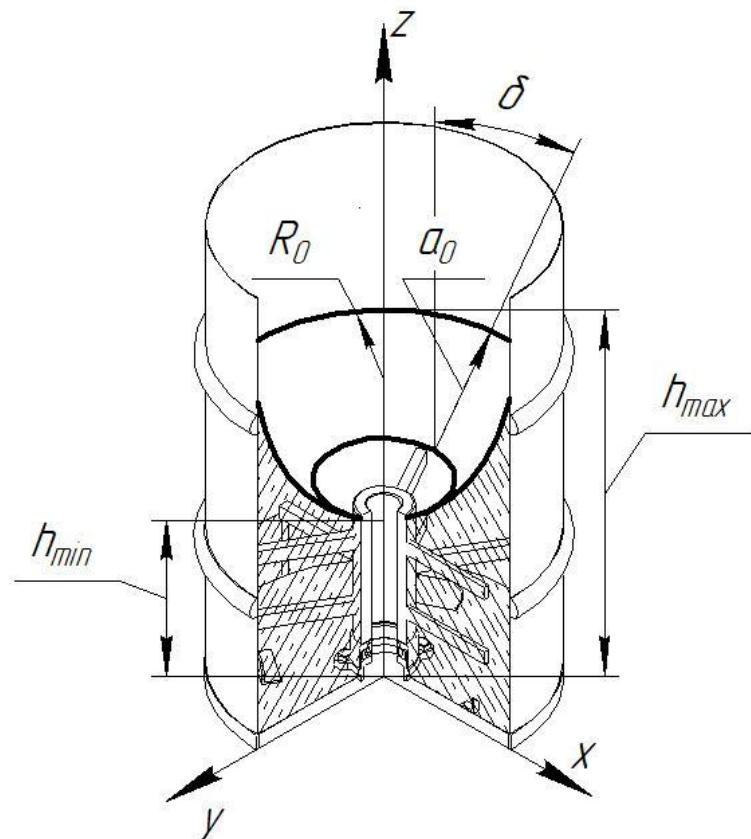


Рисунок 2.5 – Схема розрахунку воронки

Після перетворень та розв'язку рівняння 2.21 та спрощення отримуємо рівняння енергії вихрового руху у вигляді:

$$E = 2\pi \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot V_{вих}}{k} \cdot \frac{(h_{max} - h_{min})}{R_0} \cdot a_0^2. \quad (2.23)$$

Обсяг матеріалу, який бере участь у вихровому русі матеріалу $V_{вих}$, визначається наступним співвідношенням:

$$V_{вих} = \pi \cdot R_k^2 \cdot (h_{max} - h_{min}) - V_e \quad (2.24)$$

Підставивши рівняння 2.24 приводимо рівняння 2.23 до співвідношення:

$$E = 2\pi \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot V_{вих}}{k} \cdot \frac{(h_{max} - h_{min})}{R_0} \cdot \left[\omega^2 \cdot L^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot \mu^2} \right) - 2 \cdot g \cdot h_{min} \right]. \quad (2.25)$$

Використовуючи співвідношення 2.25 знаходимо вираз для величини потужності $P_{ш.р.}$, необхідної для підтримки вихрового руху частинок суміші при високошвидкісному змішуванні:

$$P_{ш.р.} = 2\pi \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot V_{вих}}{k} \cdot \frac{(h_{max} - h_{min})}{R_0} \cdot \omega \cdot \left[\omega^2 \cdot L^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{4 \cdot \mu^2} \right) - 2 \cdot g \cdot h_{min} \right]. \quad (2.26)$$

Таким чином, отримане рівняння 2.26 визначає значення потужності, яку необхідно витратити на підтримку вихрового руху частинок суміші.

Необхідна потужність для подолання сил опору руху лопаті змішувача $P_{о.р.л.}$, буде складатися з потужності $P_{т.м.}$, яка витрачається на подолання сили опору тиску матеріалу суміші на поверхню лопаті, $P_{т.л.}$, що витрачається на подолання сили опору тертя по внутрішній бічній поверхні циліндричного корпусу внаслідок відцентрової сили F_6 , $P_{з.с.}$ витрачається на подолання опору зсуву суміші матеріалу щодо суміші, розташованої над лопаттю, та $P_{т.к.}$ потужності на подолання опору тертя по основі циліндричного корпусу при робочою лопаткою матеріалу:

$$P_{о.р.л.} = P_{т.м.} + P_{т.л.} + P_{з.с.} + P_{т.к.}, \quad (2.27)$$

Обчислимо масу матеріалу суміші m_m , що переміщується лопаттю установки в змішувальному контейнері:

$$m_m = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0}{k} \cdot h \cdot \cos \alpha \cdot L^2, \quad (2.28)$$

де h – висота лопаті, м;

ε_0 – початкове значення щільності матеріалу, кг/м³;

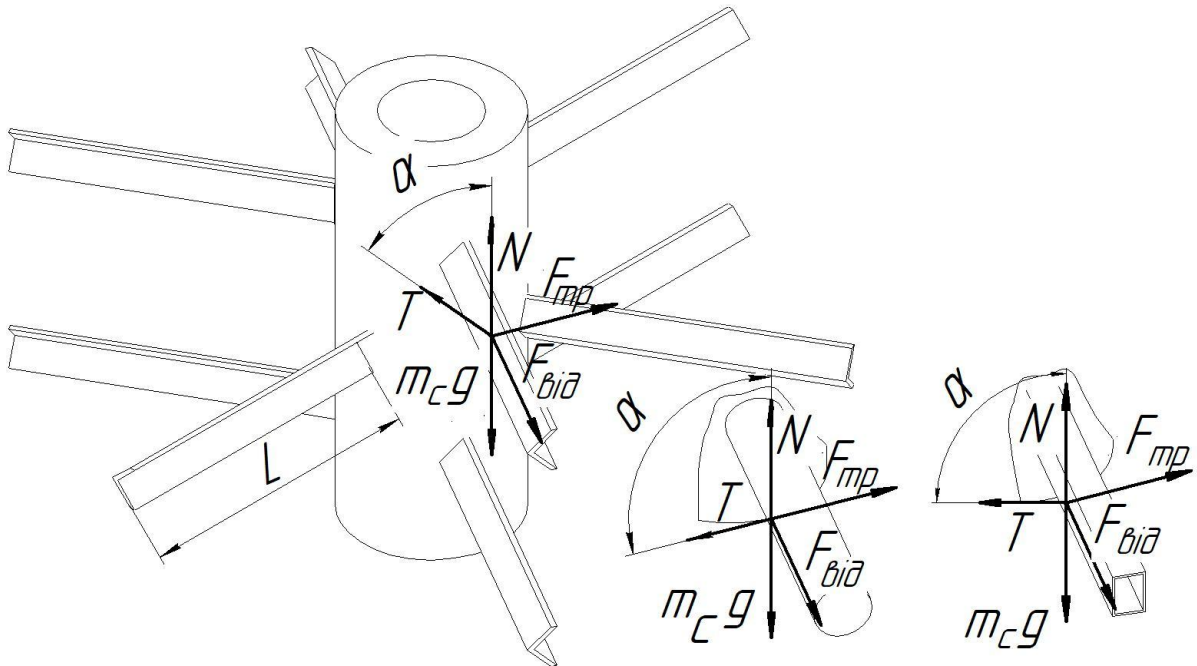
k – коефіцієнт розпушеності суміші;

α – кут відхилення лопаті від вертикалі.

Для обчислення потужності $P_{m.m}$, яка витрачається на подолання сили опору тиску матеріалу суміші на поверхню лопаті звернемося до розрахункової схеми, представленій рисунку 2.6. З урахуванням представлені схеми знаходимо:

$$T \cdot \sin \alpha = m_m \cdot g, \quad (2.29)$$

де T – величина сили тиску, що надається на лопать матеріалом, що переміщується, Н.



Рисунку 2.6 – Розрахункова схема до визначення сил, що діють на лопать умовно трикутного, круглого та квадратного перерізу

Значення потужності $P_{m.m}$, яка витрачається на подолання сили опору тиску матеріалу суміші визначатиметься наступним співвідношенням:

$$P_{m.m} = \mu \cdot T \cdot v_{c.m} = \frac{\mu \cdot m_m \cdot g}{\sin \alpha} \cdot v_{c.m}, \quad (2.30)$$

де μ – коефіцієнт тертя частинок матеріалу по лопаті;

$v_{c.m}$ – величина швидкості сходження матеріалу з лопаті змішувача в радіальному напрямку:

$$v_{c.m} = \frac{\omega_0 \cdot L}{2 \cdot \mu}, \quad (2.31)$$

де ω_0 – частота обертання матеріалу суміші;

L – довжина лопаті.

Після підстановки рівняння 2.31 в рівняння 2.30 та проведення відповідних перетворень отримуємо залежність:

$$P_{m.m} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0}{2 \cdot k} \cdot h \cdot L^3 \cdot \omega_0 \cdot g \cdot \operatorname{ctg} \alpha. \quad (2.32)$$

Величина потужності $P_{m.n}$, що витрачається на подолання сили опору тертя по внутрішній бічній поверхні циліндричного корпусу буде визначатись наступним співвідношенням:

$$P_{m.n} = \mu_0 \cdot F_6 \cdot \omega_0 \cdot L. \quad (2.33)$$

Відцентрова сила F_6 буде визначатись за рівнянням 2.11 та після відповідних перетворень буде мати вигляд:

$$F_6 = \frac{m_m \cdot \omega_0^2 \cdot L^2}{L} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0}{k} \cdot h \cdot L^3 \cdot \omega_0^2 \cdot \cos \alpha. \quad (2.34)$$

З урахуванням рівняння 2.34, підставивши в формулу 2.33 вираз буде мати такий вигляд:

$$P_{m.n} = \frac{\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \mu}{k} \cdot h \cdot L^3 \cdot \omega_0^3 \cdot \cos \alpha. \quad (2.35)$$

Величину дотичних напружень $\tau(r)$, що виникають у сипучому матеріалі на відстані від осі обертання знаходимо за формулою:

$$\tau(r) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_0 \cdot g}{k} \cdot r. \quad (2.36)$$

Тоді величина сили опору зсуву F_4 матеріалу лопаттю виведене в рівняння 2.9 дорівнюватиме:

$$F_4 = \Delta \cdot k_\tau = h \cdot L \cdot \cos \alpha \cdot \tau(r) = \frac{L \cdot h \cdot \varepsilon_0 \cdot g}{2k} \cos \alpha \cdot r. \quad (2.37)$$

Величина роботи $A_{з.с.}$, яка потрібна на подолання опору сили (2.36), визначатиметься співвідношенням:

$$A_{з.с.} = \int_0^L F_4 dr = \frac{L \cdot h \cdot \varepsilon_0 \cdot g}{4 \cdot k} \cdot L^2 \cdot \cos \alpha. \quad (2.38)$$

На підставі рівняння 2.38 знаходимо вираз, що визначає значення потужності $P_{з.с.}$, яка витрачається на подолання опору зсуву суміші матеріалу щодо суміші розташованої над лопаттю:

$$P_{з.с.} = A_{з.с.} \cdot \omega_0 = \frac{L \cdot h \cdot \varepsilon_0 \cdot g \cdot \omega_0}{4 \cdot k} \cdot L^2 \cdot \cos \alpha. \quad (2.39)$$

Величину потужності $P_{т.к.}$, яка витрачається на подолання опору тертя по основі циліндричного корпусу при переміщенні лопаттю матеріалу знайдемо відповідно до співвідношення:

$$P_{т.к.} = \mu \cdot m_m \cdot g \cdot \bar{v}_{сеп}, \quad (2.40)$$

де $\bar{v}_{сеп}$ – середнє значення окружної швидкості лопаті, яке визначається згідно з виразом:

$$\bar{v}_{сеп} = \frac{\omega_0}{2} \cdot L. \quad (2.41)$$

Підставивши формулу 2.41 в рівняння 2.39 з урахуванням виразу 2.28 спростуємо та приводимо рівняння до наступного результату:

$$P_{т.к.} = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot \frac{\pi \cdot h \cdot \varepsilon_0 \cdot g \cdot \omega_0}{k} \cdot L^3. \quad (2.42)$$

Якщо на маточині валу знаходиться n лопатей, тоді повну потужність P , що витрачається на приведення в рух у високошвидкісному лопатевому змішувачі матеріалу для приготування ніздрюватих бетонів, визначатиме наступний вираз:

$$P = P_{ш.р.} + \chi_l \cdot n \cdot (P_{т.м.} + P_{т.п.} + P_{з.с.}) + P_{т.к.}, \quad (2.42)$$

де χ_l – коефіцієнт, що враховує взаємний вплив лопаті одна на одну при їх русі.

Отримане шукане рівняння 2.42 дозволяє визначити сумарну потужність мобільного бетонозмішувача для приготування ніздрюватих бетонів залежно від його конструктивних характеристик і режиму роботи.

2.6 Висновки з розділу 2

При виконанні аналітичних досліджень робочих процесів і режимів роботи установки для приготування ніздрюватих бетонів було встановлено таких результатів:

1. При проведенні аналізу було розроблено конструктивну схему мобільної змішувальної установки примусової дії з вертикально розташованим валом для приготування ніздрюватих бетонів (рисунк 2.1.) Визначено раціональні технічні рішення, розташування елементів установки та описано принцип роботи.

2. Виконано дослідження взаємодії робочих органів змішувача з середовищем розчинної суміші. Визначено основні сили (сила тертя F_1 будівельної розчинної суміші (2.1); сила F_2 тертя будівельної розчинної суміші внаслідок тиску власної ваги суміші (2.3); сила F_3 лобового опору (2.4); сила F_4 , яка створює опір зсуванню будівельної розчинної суміші (2.9); відцентрова сила F_6 (2.11)) та їх дію на лопать при змішуванні робочого матеріалу.

3. Визначено, що лобовий опір є визначним чинником у загальній витраті енергії. Встановлено залежність лобового опору лопаті установки для

приготування ніздрюватих бетонів від форми лопаті $k_{л.о.}$. Отримані закономірності впливу геометричних параметрів форми робочих органів на опір середовищу та обґрунтовано критерій для ефективності досліджуваних лопатей формули 2.17, 2.18, 2.19.

4. Встановлені й обґрунтовані основні чинники, які визначають величину потужності, котра споживається у процесі змішування. Встановлено математичну залежність для визначення загальної потужності установки (2.42), що витрачається на перемішування частинок у робочому об'ємі змішувача, яка враховує витрати енергії на підтримку швидкісного режиму суміші (2.26) в зоні вихрового потоку та на подолання сил опору руху лопатей (2.27).

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ

Для підтвердження достовірності запропонованих теоретичних залежностей робочих процесів установки для приготування ніздрюватих бетонів під час процесу змішування й обґрунтуванням раціональних параметрів та режимів роботи було проведено експериментальні дослідження.

Основною метою було дослідити та на основі отриманих результатів дослідження визначити раціональні геометричні параметри робочого органу, які впливають на енергоефективність установки з метою зниження енергоспоживання. Крім того, експериментальні дослідження мають на меті підтвердити надійність основних конструктивних вузлів та оцінити ефективність запропонованих технічних рішень установки для приготування ніздрюватих бетонів.

Для вирішення поставленої мети було визначено такі завдання:

1. Виготовити спроектовану змішувальну установку, яка буде використовуватись для експериментальних досліджень.
2. Виконати ряд дослідів для кожного робочого органу змішувальної установки, який має різну форму лопаті.
3. Виконати побудову графічних залежностей енергоспоживання до форми робочого органу та провести аналіз результатів експериментів та математичного моделювання.
4. Провести оцінювання величини потужності, що споживається в процесі змішування розчинів різної рухомості при різних режимах руху робочого органу.
5. Виконати перевірку міцності та стійкості готових бетонних виробів під впливом навантажень.

6. На основі отриманих результатів розробити рекомендації щодо визначення параметрів установки для приготування ніздрюватих бетонів, які забезпечують зниження енерговитрат під час роботи бетонозмішувача.

3.1 Опис конструкції експериментальної установки та способів зміни технічних характеристик

На основі теоретичних досліджень та конструкторських напрацювань була створена експериментальна установка для приготування ніздрюватих бетонів з вертикально розміщеним валом, яка представлена на рисунку 3.1 [104, 105], головною ознакою створеної установки є її здатність легко змінювати робочі органи та частоту обертання лопатей змішувача.

Процес роботи змішувальної установки ґрунтується на інтенсивному перемішуванні компонентів шляхом обертання лопатей, розташованих на валу. Такий принцип сприяє активному переміщенню частинок суміші у межах всього робочого об'єму та забезпечує утворення однорідної структури суміші.



Рисунок 3.1 – Виготовлена установка для приготування ніздрюватих бетонів (натурний зразок)

Один з основних показників ефективності роботи змішувальної установки є енерговитрати при процесу змішування. Дослідження енергоспоживання дозволяє оцінити раціональність прийнятих конструктивних рішень, режимів роботи змішувальних лопатей та їх вплив на якість приготованої суміші.

Для проведення комплексного аналізу енерговитрат виготовленої змішувальної установки, призначеної для приготування компонентів під час виробництва ніздрюватого бетону необхідно враховувати конструктивні особливості робочого органу та умови його взаємодії з матеріалом, що змішується. Принцип роботи такого змішувача ґрунтується на обертанні лопатей, закріплених на вертикальному приводному валу в нижній частині змішувальної камери. Під час обертання лопаті здійснюють інтенсивний механічний вплив на суміш, забезпечуючи рівномірний розподіл компонентів у всьому об'ємі робочої зони.

Також споживання електричної енергії залежить від кількості обертів робочого органу. В запропонованій установці кількість обертів регулюється за допомогою зміни комбінації шківів на валу робочого органу та двигуні, розміщення яких показано на рисунку 3.2.



Рисунок 3.2 – Розміщення шківів на двигуні та валу робочого органу

Для зміни кількості обертів використовується чергування трьох шківів різного діаметру, а саме: 90 мм., 145 мм., 290 мм., які зображено на рисунку 3.3, встановлюють їх по чергово на вал двигуна та вал приводу робочого органу.



Рисунок 3.3 – Загальний вигляд шківів, що беруть участь у процесі проведення експериментальних досліджень

Внаслідок чого утворилося три комбінації використання шківів, та відповідно і кількості обертів робочого органу, які приведено в таблиці 3.1. Для приведення в рух приводу змішувальної установки було застосовано двигун AIP100L6, кількість обертів двигуна на роторі становить 940 об/хв.

Таблиця 3.1 – Показники частоти обертання валу установки за різних варіантів співвідношення діаметрів шківів

Діаметр шківа на двигуні	Діаметр шківа на робочому органі	Передаточне число	Кількість обертів валу робочого органу
90	275	3	310
140	275	1,96	480
90	140	1,55	620

У ролі змішувального контейнеру установки для приготування ніздрюватих бетонів використовується металева бочка об'ємом 100 літрів. Контейнер оснащений герметичною кришкою для запобігання втрат матеріалу під час інтенсивного перемішування.

Для підвищення ефективності процесу змішування на внутрішній поверхні змішувального контейнеру приварені спеціальні напрямні пластини, які запобігають ковзанню суміші у вздовж стінок контейнера та сприяють її більш рівномірному руху в робочій камері. Робоча камера змішувального бункера з встановленим робочим органом показана на рисунку 3.4.



Рисунок 3.4 – Робоча камера змішувального бункера з встановленим робочим органом

Для визначення енерговитрат при змішуванні матеріалу проводилася серія випробувань з різними комбінаціями приводних шківів для кожного типу робочого органу. Це дало змогу забезпечити можливість варіювання швидкості обертання приводного валу в широкому діапазоні. Заміри споживання електроенергії проводилися за допомогою засобів обліку витрати електричної енергії на кожен з режимів.

3.2 Дослідження лобового опору лопаті установки для приготування ніздрюватих бетонів

Лобовий опір являє собою одним із ключових аеродинамічних показників, який дозволяє оцінити раціональність геометричної форми лопаті робочого органу в аспекті мінімізації опору руху в розчинній суміші під час змішування. Величина залежить від багатьох факторів, включаючи профіль, кут нахилу та форму лопаті. Зменшення значення лобового тиску на лопать призводить до зниження силового потоку при роботі змішувача, що, у свою чергу, дозволяє двигуну працювати з меншими витратами електроенергії.

Відповідно до запропонованого і теоретично обґрунтованого у розділі 2.4 механізму взаємодії форми лопаті із розчинною сумішшю під час її руху визначення лобового тиску на лопать $k_{л.о.}$, здійснюється шляхом вимірювання зусилля необхідного для рівномірного переміщення робочого органу у розчині. На основі експериментального встановлення сили F та швидкості переміщення v_o проводяться розрахунок параметрів за формулами 2.17 – 2.19.

З метою детального вивчення характеру взаємодії робочого органу з будівельним розчином було використано дослідний стенд, загальний вигляд якого представлено на рисунку 3.5. Основою конструкції слугує прямокутна ємність 1, над якою розташована напрямна 2. Конструктивне виконання напрямної передбачає можливість її підйому, що суттєво спрощує операції завантаження компонентів в ємність. Переміщення робочого вузла виконує каретка 5, яка рухається по напрямній на опорах кочення за допомогою тягового тросу 4. Приводний механізм складається з електродвигуна 3 та барабана 6, на який через систему обвідних блоків 7 намотується тяговий трос. Автоматична зупинка привода у кінцевій точці забезпечується кінцевим вимикачем 8.

Керування швидкісними режимами стенда реалізовано шляхом

підключення двигуна до мережі через частотний перетворювач ACS 300. Таке технічне рішення дає змогу варіювати частоту обертання барабана та плавно регулювати швидкість руху каретки в заданих межах. Безпосередньо на рухомій платформі встановлено робочу лопать 9, положення якої регулюється поворотно-фіксуєчим пристроєм 10. Вимірювальний комплекс установки містить індуктивний датчик зусилля 12 та електронний секундомір 11. Для забезпечення високої точності експерименту фіксація часових параметрів автоматизована: секундомір активується під впливом датчика початкового положення 13 і зупиняється датчиком 14. Особливістю схеми є те, що початковий датчик зміщений відносно стартової позиції каретки на відстань, достатню для її розгону, завдяки чому вимірювання фізичних величин відбувається виключно на ділянці сталого рівномірного руху без прискорень.

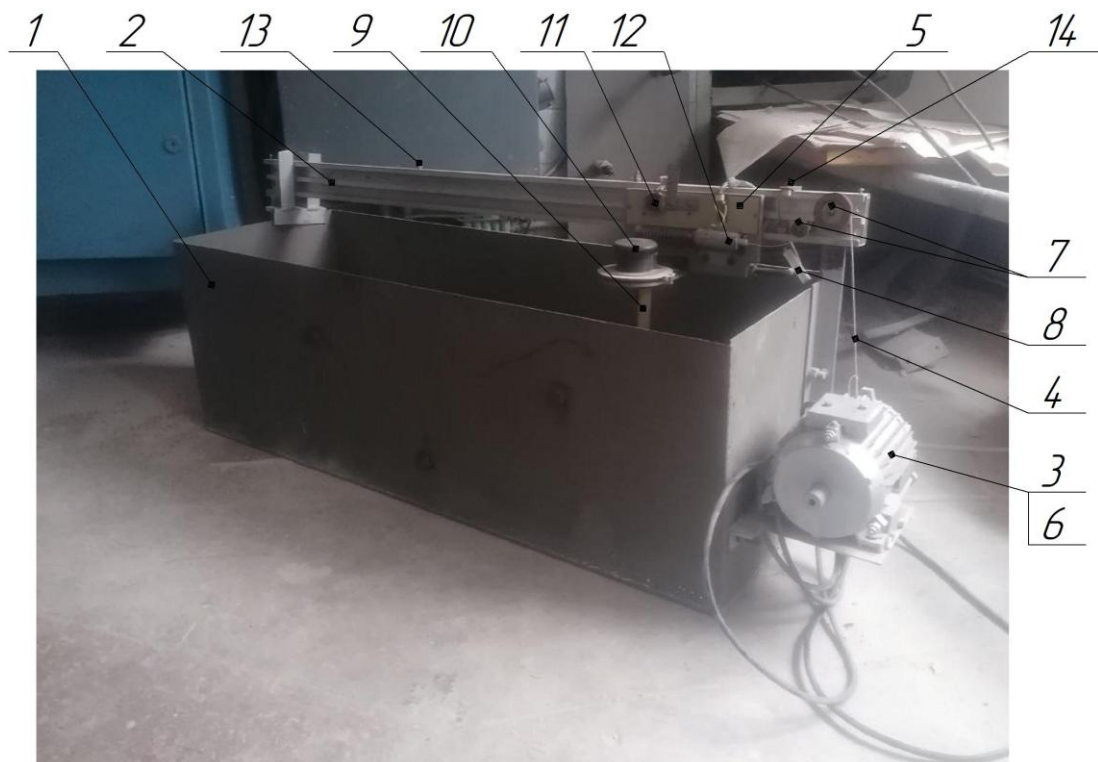


Рисунок 3.5 – Загальний вигляд стану для визначення сил опору форми лопаті

Для визначення сили лобового опору F , яка виникає при переміщенні каретки, використовується індуктивний датчик зусиль 12 зображений на рисунку 3.6, який складається з котушки індуктивності 1, тяги 2 та магнітного

сердечника 3. Між корпусом котушки та сердечником 3 встановлена пружина 4. Котушка 1 жорстко закріплена на каретці дослідного стенда, а тяга 2 з'єднана з тросом, що приводить каретку в рух. Отриманий сигнал перетворюється та реєструється самописним приладом Н3031, що забезпечує фіксацію зусилля під час рівномірного руху каретки.

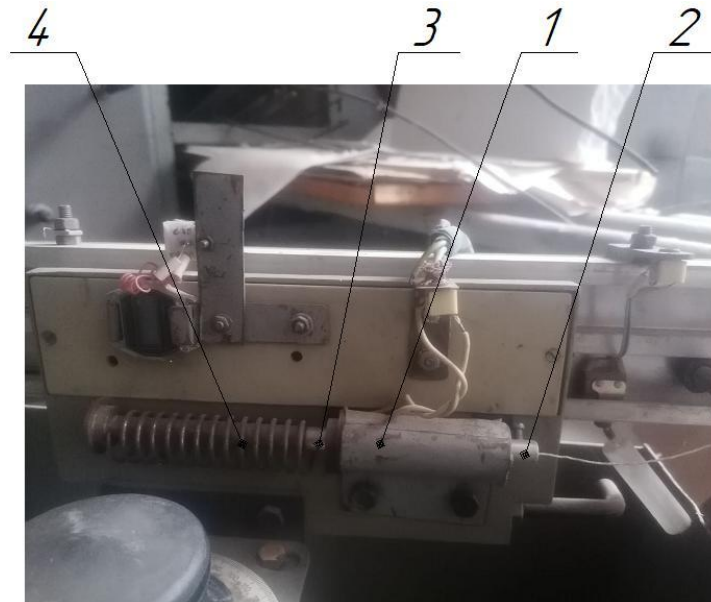


Рисунок 3.6 – Індуктивний датчик зусилля

На підготовчому етапі вимірювань пристрій калібрувався при нерухомій каретці шляхом навантаження троса за допомогою динамометра. При цьому на діаграмній стрічці самопишучого приладу з'являвся відповідний відрізок, ордината цього відрізка змінювалася прямопропорційно збільшенню переміщення стрижня. Приклади діаграм вимірювання для кожної форми лопаті зображено на рисунках 3.7–3.9.

Для розрахунку сили лобового опору F з одержаної діаграми потрібно визначити величину шуканої сили скориставшись формулою:

$$F = \mu_{\text{л.о.}} \cdot h, \quad (3.1)$$

де h – усталене значення в межах робочої дистанції, мм;

$\mu_{\text{л.о.}}$ – масштабний множник реєстрації зусилля F , було встановлено, що на 1 мм діаграми відповідає величина навантаження 3,66 Н тоді $\mu_{\text{л.о.}} = 3,66$.

Розглядаючи лопать з квадратним профілем, яка рухається у змішувальному контейнері з рухомістю $\Pi = 10$ см з постійною швидкістю 0,6 м/с згідно з показниками отриманої діаграми (рисунок 3.7) знайдемо величину зусилля:

$$F_1 = \mu_{л.о.} \cdot h_1 = 3,66 \cdot 12 = 43,92 \text{ Н}.$$

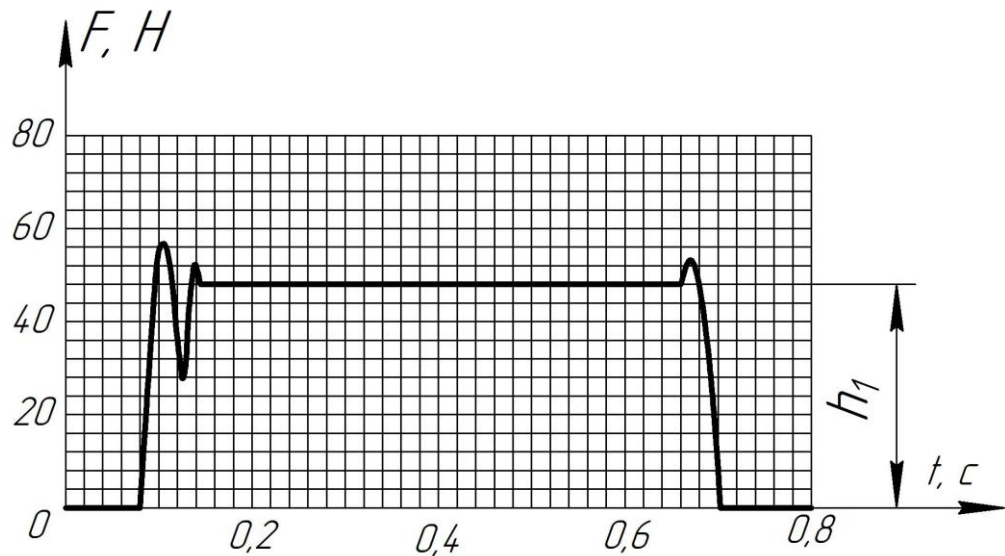


Рисунок 3.7 – Діаграма зміни сили лобового опору для лопаті у формі квадратного перерізу

Виходячи з отриманих даних лобовий тиск, що діє на лопать, $k_{л.о.}$ визначаємо за формулою 2.17

$$k_{л.о.} = \frac{F_1}{(2L + 2b) \cdot \Delta x} = \frac{43,92}{(2 \cdot 0,176 + 2 \cdot 0,025) \cdot 1,0} = 109,25 \text{ Па}.$$

де L – довжина лопаті, $L=0,176$ м;

b – ширина лопаті, $b=0,025$ м.

За тим самим методом для лопаті у формі умовно трикутного перерізу, яка рухається у контейнері за таких самих умов знайдемо величину зусилля за показниками діаграми (рисунок 3.8):

$$F_2 = \mu_{л.о.} \cdot h_2 = 3,66 \cdot 9 = 32,94 \text{ Н}.$$

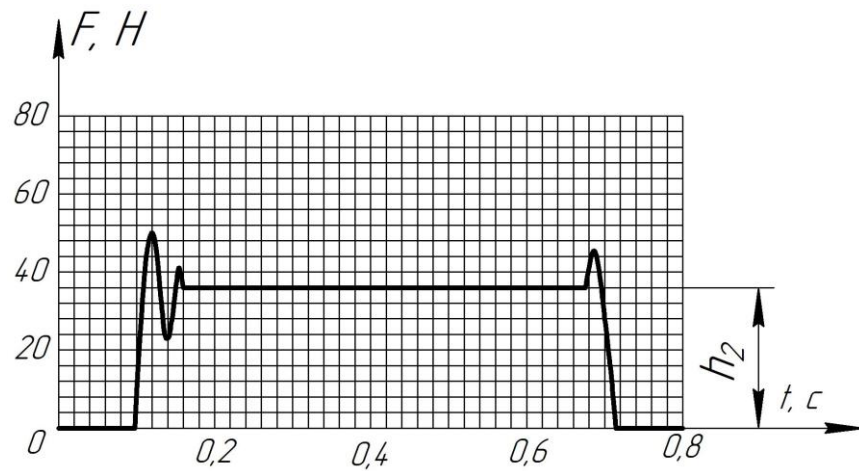


Рисунок 3.8 – Діаграма зміни сили лобового опору для лопаті у формі умовно трикутного перерізу

Лобовий тиск на лопать $k_{л.о.}$ у формі умовно трикутного перерізу визначаємо за формулою 2.18:

$$k_{л.о.} = \frac{F_2}{(2L + 2b \cdot \cos \alpha) \cdot \Delta x} = \frac{32,94}{(2 \cdot 0,176 + 2 \cdot 0,035 \cdot \cos 45^\circ) \cdot 1,0} = 82,04 \text{ Па.}$$

де L – довжина лопаті, $L=0,176$ м;

b – ширина лопаті, $b=0,035$ м.

Застосовуючи ідентичний підхід для лопаті у формі круглого перерізу, яка рухається у контейнері знаходимо величину зусилля за показниками діаграми (рисунок 3.9):

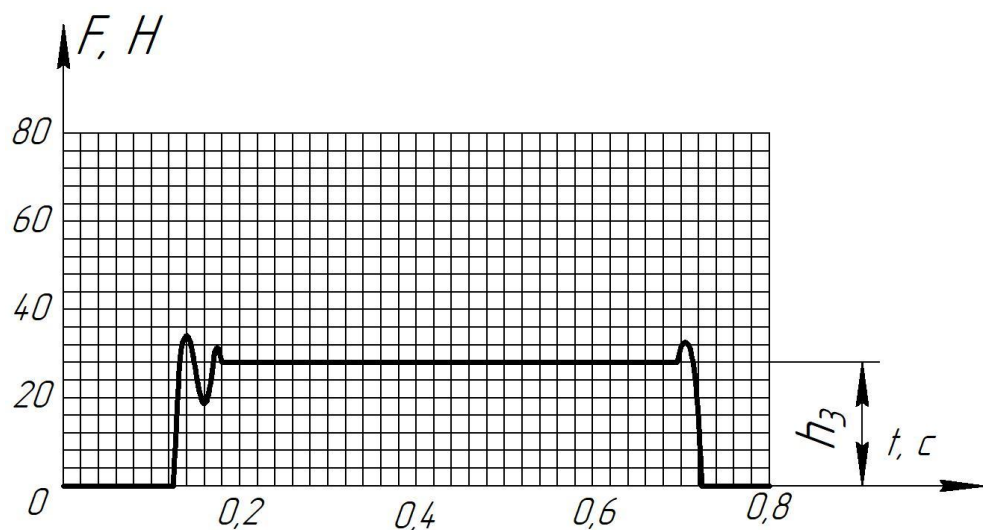


Рисунок 3.9 – Діаграма зміни сили лобового опору для лопаті у формі круглого перерізу

$$F_3 = \mu_{л.о.} \cdot h_3 = 3,66 \cdot 7 = 25,62 \text{ Н}.$$

Лобовий тиск на лопать $k_{л.о.}$ у формі круглого перерізу визначаємо за формулою 2.19:

$$k_{л.о.} = \frac{F_3}{(2L + \pi \cdot b) \cdot \Delta x} = \frac{25,62}{(2 \cdot 0,176 + 3,14 \cdot 0,03) \cdot 1,0} = 57,42 \text{ Па}.$$

де L – довжина лопаті, $L=0,176$ м;

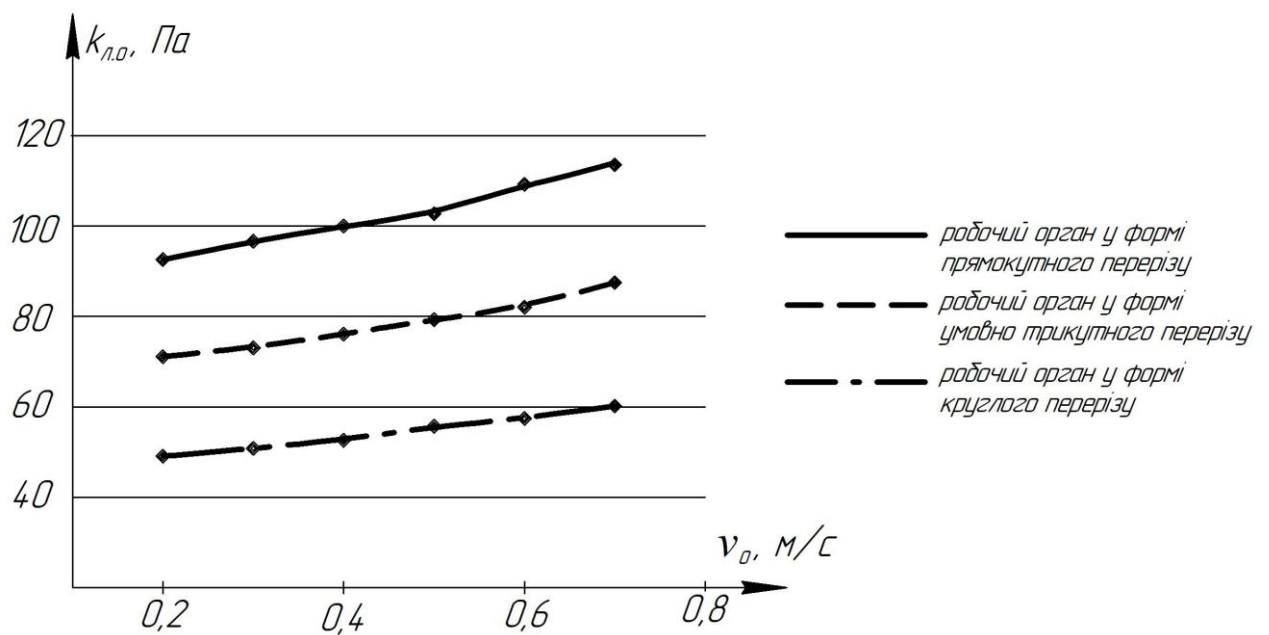
b – ширина лопаті, $b=0,03$ м.

Проаналізувавши криві зображених на рисунках 3.7–3.9 записані самописним пристроєм можна сказати, що при початку руху лопатки (ділянка 0,1...0,12 с) спостерігається зміна показів датчика зусилля та зміна сили F це пояснюється тим, що при русі лопатки відбувається її початкове прискорення та з'являються зусилля, які виникають в пружині датчика. На ділянці 0,18...0,7 с сила лобового опору F для руху лопатки залишається сталою як за модулем так і за величиною відхилень також можливо визначити її показник. На кінцевій ділянці 0,68...0,8 с спостерігається збільшення показань сили, що пояснюється результатом гальмування каретки разом з лопаткою.

За вказаною методикою були проведені виміри сили лобового опору для різних швидкостей руху лопаті у формі квадратного, умовно трикутного та круглого перерізу бетонної суміші за ДСТУ Б В.2.7-214:2009 з рухливістю суміші 10 см. Після чого були розраховані значення лобового тиску на лопать $k_{л.о.}$ та представлено в таблиці 3.2 та на рисунку 3.10.

Таблиця 3.2 – Розрахунок лобового тиску на лопать $k_{л.о.}$ з рухливістю суміші 10 см

Швидкість v_o , м/с	Форма лопаті робочого органу					
	Квадратного перерізу		У формі умовно трикутного перерізу		Круглого перерізу	
	Сила F , Н	$k_{л.о.}$, Па	Сила F , Н	$k_{л.о.}$, Па	Сила F , Н	$k_{л.о.}$, Па
0,2	37,23	92,61	28,54	71,08	21,89	49,06
0,3	38,86	96,67	29,34	73,08	22,67	50,81
0,4	40,21	100,02	30,56	76,11	23,46	52,58
0,5	41,29	102,71	31,83	79,28	24,86	55,71
0,6	43,92	109,25	32,94	82,04	25,62	57,42
0,7	45,65	113,56	35,12	87,47	26,84	60,15



Рисунку 3.10 – Залежність лобового тиску на лопать $k_{л.о.}$ від швидкості переміщення лопаті різної форми з рухливістю суміші 10 см

Дослідження впливу різних форм робочих органів показали, що зі зростанням обтічності лопаті лобовий тиск зменшується, що сприяє зниженню енергоспоживання та підвищенню ефективності процесу змішування ніздрюватих бетонів.

3.3 Дослідження споживання потужності привода від геометричних параметрів робочого органу змішувача

Робочий процес у змішувачах примусової дії ґрунтується на інтенсивному перемішуванні компонентів суміші за рахунок обертального руху лопатей навколо вертикального валу. З метою зменшення енерговитрат при приготуванні ніздрюватих бетонів приводом установки з електродвигуном АІР100L6 потужністю 2.2 кВт, було прийнято рішення виготовити та дослідити три робочі органи (лопаті) установки з різними геометричними параметрами (конфігураціями) зображені на рисунку 3.11.



а)



б)



в)

Рисунок 3.11 – Робочі органи установки для приготування ніздрюватих бетонів: а) – робочий орган з квадратним перерізом лопаті; б) – робочий орган з умовно трикутним перерізом лопаті; в) – робочий орган з круглим перерізом лопаті.

Експеримент з визначення енерговитрат полягав у пошуку раціональної кількості обертів валу робочого органу змішувача. На виготовленому обладнанні шляхом вибору лопатей, почергового встановлювались шківів різних діаметрів (рисунок 3.3) для одного типу робочого органу та різних типів лопатей (рисунок 3.11). Для забезпечення чистоти експерименту був контроль вихідних даних шляхом забезпечення однакових параметрів (обсяг та склад бетонної суміші, час змішування, температура навколишнього середовища, текучість суміші), приклад завантаження компонентів через лійку-дозатор представлено на рисунку 3.12. Вимірювання спожитої енергії виконувалось із застосування електричного лічильника (рисунок 3.13), процедура дослідження полягала в послідовному тестуванні кожного робочого органу (лопаті). Протягом кожного 10-хвилинного циклу випробувань при різних частотах обертання робочого органу при різних комбінаціях шківів здійснювалась фіксація енергоспоживання змішувальної установки.



Рисунок 3.12 – Завантаження компоненті суміші до змішувального бункеру

Тривалість одного циклу перемішування становило 40–50 секунд, після завершення якого здійснювалось повне вивантаження готової суміші. При роботі установки під час проведення експерименту спостерігалась стабільна робота дослідного обладнання, рівень шуму був в допустимих межах та

обладнання показало відсутність не бажаних вібрацій під час роботи.



Рисунок 3.13 – Фіксація початкового стану приладу обліку електроенергії

Базуючись на отриманих показниках споживаної потужності змішувальної установки під час експериментальних досліджень, узагальнених та наведених у таблиці 3.3, яка демонструє результати споживання електроенергії від частоти обертання приводного валу та форми робочого органу (лопатей).

Таблиця 3.3 – Показники споживання потужності установки під час експериментальних досліджень

Робочий орган	З квадратним перерізом			З умовно трикутним перерізом			З круглим перерізом		
Кількість обертів робочого органу, об/хв	310	480	620	310	480	620	310	480	620
Показники лічильника до експерименту, кВт/год	027761,24	027763,03	027765,58	027762,08	027764,28	027767,04	027762,58	027764,93	027767,81
Показники лічильника після експерименту, кВт/год	027761,71	027763,69	027766,35	027762,54	027764,93	027767,81	027763,03	027765,57	027768,57
Витрати електроенергії, кВт/год	0,47	0,66	0,77	0,46	0,65	0,77	0,45	0,64	0,76

Для проведення аналізу отриманих результатів, на основі даних таблиці 3.2 побудовано графік залежності витрат електроенергії від частоти обертання робочого органу, який представлено на рисунку 3.14. Дана залежність отриманих показників показує чітке збільшення витрат електроенергії від збільшення частоти обертання на приводному валу.

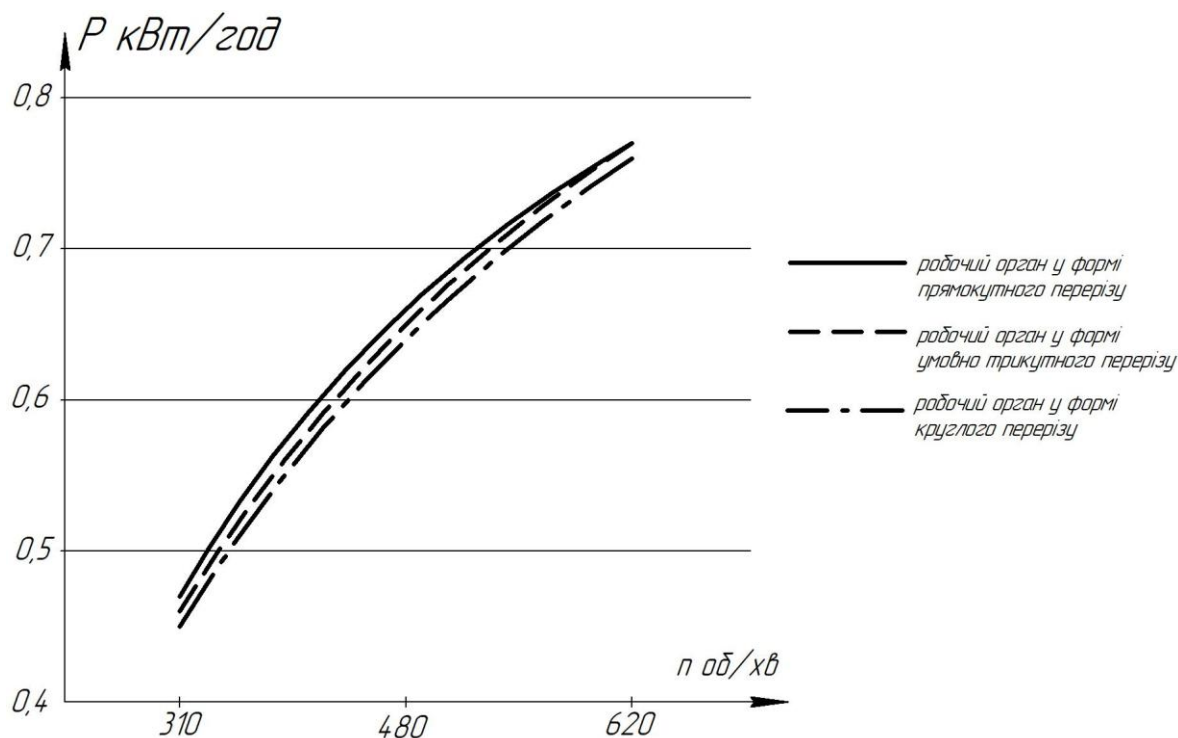


Рисунок 3.14 – Залежність витрат електроенергії від частоти обертання робочого органу

Після завершення циклу приготування суміші було виконано формування контрольних зразків для наступних випробувань (рисунок 3.15). Виготовлені “зразки-куби” мають розміри $100 \times 100 \times 100$ мм. Вибір такої методики пояснюється необхідністю підтвердження ефективності роботи установки та вибір робочого органу завдяки досягненню необхідних показників міцності за ДСТУ Б В.2.7-45:2010 [31].

Дослідні зразки витримувались до затвердіння упродовж 28 діб в умови: відносна вологість повітря 95 % та температури $+20$ °С. Це створює основу для подальшого проведення порівняння між енерговитратами при перемішуванні та міцнісними характеристиками отриманого матеріалу.



Рисунок 3.15 – Загальний вигляд дослідних зразків ніздрюватого бетону у формах

В результаті порівняльного аналізу експериментальних даних (таблиця 3.2) та графіку залежності витрат електроенергії рисунок 3.14 можна прийти до висновку, що мінімальні споживання електроенергії у робочого органу лопаті, який має круглий поперечний переріз. На основі дослідження можна зробити висновок, що найкращим варіантом робочого органу буде лопать у вигляді “шестикутної сніжинки” з трубчатого профілю діаметром 30 мм.

3.4 Дослідження впливу найбільш впливових факторів на споживану потужність змішувальної установки

Одним із ключових чинників, що визначають енергетичні витрати змішувача, є конструкція робочого органу.

З метою вивчення енерговитрат при використанні різних змінних робочих органів установки для приготування ніздрюватих бетонів було

проведено експериментальні вимірювання кількості спожитої енергії під час змішування суміші у змішувальній камері. Це дозволяє оцінити вплив профілю лопатей на інтенсивність перемішування та на величину споживаної потужності, а також визначити конструкцію, що забезпечує раціональне співвідношення між якістю змішування та енерговитратам. Саме умови взаємодії лопатей із середовищем, що перемішується, визначають величину споживаної потужності та рівень енерговитрат установки загалом.

Приймаючи до уваги попередні проведені дослідження і експериментальні випробування було визначено, що параметр, який найкраще показує економічність установки для приготування ніздрюватих бетонів, є витрати електричної енергії P . Таким чином в ході проведення експериментів визначено параметри, які найбільш впливають на економічність роботи установки для приготування ніздрюватих бетонів. Ними є: час перемішування матеріалу t , с; частота обертання робочого органу n , об/хв; рухливість суміші, яка перемішується установкою Π , см. При цьому були визначені інтервали варіювання, в межах яких спостерігається найменша витрати електричної енергії роботи установки для приготування ніздрюватих бетонів. Відповідні дані наведені у таблиці 3.4.

З метою побудови адекватної математичної моделі енерговитрат установки для приготування ніздрюватих бетонів при проведенні експериментальних досліджень було застосовано методи математичного планування та статистичного аналізу даних [106].

Використавши методи з планування експерименту [106, 107] для з'ясування, як впливають вище зазначені параметри на ефективність роботи установки для приготування ніздрюватих бетонів, ставимо за завдання знайти функціональну залежність впливу між вище зазначеними параметрами на витрати електроенергії P , у вигляді:

$$P = f(t, n, \Pi). \quad (3.2)$$

Таблиця 3.4 – Фактори, які впливають на витрати електроенергії установки для приготування ніздрюватих бетонів та їх інтервали варіювання

№	Найменування	Позначення	Розмірність	Верхній рівень (+)	Нульовий рівень (0)	Нижній рівень (–)	Інтервал варіювання
X ₁	Час перемішування	<i>t</i>	с	50	40	30	10
X ₂	Частота обертання робочого органу	<i>n</i>	об/хв	620	465	310	155
X ₃	Рухливість суміші	<i>П</i>	см	12	10	8	2

Для досліджуваних умов, при впливі дії даних параметрів на енерговитрати установки для приготування ніздрюватих бетонів, які відрізняються від лінійних, використовуємо план експерименту другого порядку. У ситуації, коли побудована модель, яку отримаємо, не буде відповідати проведенням дослідів, доведеться використовувати інші типи планування експерименту.

Дослід проводимо за планом, який наведено в таблиці 3.5. Зокрема, у першому дослідженні при визначенні раціонального часу впливу робочого органу на матеріал X₁ має значення «+» – 50 с., частота обертання робочого органу (лопатей) X₂ має значення «+» – 620 об/хв, рухливість суміші X₃ має значення «+» – 12 см.

Під час виконання експериментів згідно з вибраним планом доцільно рівномірно розміщувати повторення в центрі плану (нульовій точці, де всі фактори на основному рівні) по всій послідовності, дублюючи їх приблизно кожні 3–5 дослідів.

На першому етапі експерименту було обрано лопать у вигляді “шестикутної сніжинки” прямокутного перерізу. Проведення експерименту для інших лопатей (у формі умовно трикутного перерізу та з круглим профілем) проводився за таких самих параметрів.

Таблиця 3.5 – План проведення експериментів при числі параметрів, рівних 3

№ досліду		Матриця планування(x_i)			Квадрати параметрів (x_i^2)			Взаємодія ($x_i x_j$)		
		x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$
N_1	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	2	—	+	+	+	+	+	—	—	+
	3	+	—	+	+	+	+	—	+	—
	4	—	—	+	+	+	+	+	—	—
	5	+	+	—	+	+	+	+	—	—
	6	—	+	—	+	+	+	—	+	—
	7	+	—	—	+	+	+	—	—	+
	8	—	—	—	+	+	+	+	+	+
N_α	9	+	0	0	+	0	0	0	0	0
	10	—	0	0	+	0	0	0	0	0
	11	0	+	0	0	+	0	0	0	0
	12	0	—	0	0	+	0	0	0	0
	13	0	0	+	0	0	+	0	0	0
	14	0	0	—	0	0	+	0	0	0
n_0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0

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

$$y_i = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 \quad (3.3)$$

де y_i – витрати електроенергії;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ – коефіцієнти рівняння регресії;

x_1, x_2, x_3 – вихідні параметри.

Коефіцієнти рівняння після обчислень мають вигляд:

$$b_0 = 55,239; b_1 = 6,7; b_2 = 4,9; b_3 = -3,3; b_{11} = 4,606; \\ b_{22} = 2,66; b_{33} = -1,394; b_{12} = -0,125; b_{13} = 1,875; b_{23} = -0,875.$$

Розраховані значення коефіцієнтів перевіряємо за критерієм Стюдента та підставляємо в рівняння 3.3. Функціональна залежність, що описує вплив зазначених параметрів на енерговитрати установки для приготування ніздрюватих бетонів, має такий вигляд:

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 = 55,239 + 6,7x_1 + 4,9x_2 - 3,3x_3 + 4,606x_1^2 + 2,66x_2^2 - 1,394x_3^2 - 0,125x_1x_2 + 1,875x_1x_3 - 0,875x_2x_3. \quad (3.4)$$

Одержане рівняння встановлює залежність витрати електроенергії від значень визначених факторів. Перевірка адекватності моделі здійснювалась за критерієм Фішера.

$$F_p < F_{табл}, 16,64 < 19,3 \quad (3.5)$$

Оскільки розрахункове значення критерію Фішера менше за табличне, можна зробити висновок, що отримана на основі три-факторного експерименту функціональна залежність 3.3 адекватно описує вплив конструктивних і реологічних параметрів на енерговитрати P установки для приготування ніздрюватих бетонів. Докладне представлення проведеного планування експерименту наведено в додатку А та у публікаціях [108 – 110].

3.5 Аналіз впливу форми на споживану потужність змішувальної установки

Згідно з експериментальними дослідженнями змішувача для приготування ніздрюватих бетонів на основі описаної методики в додатку А виведено функціональну залежність, що описує вплив зазначених параметрів (таблиця 3.3) на енерговитрати установки для приготування ніздрюватих бетонів при використанні робочого органу у формі “шестикутної сніжинки” з формою лопаті умовно трикутного перерізу:

$$y_i = 56,6 + 6,7x_1 + 5,9x_2 - 4,2x_3 + 3,206x_1^2 + 2,606x_2^2 - 1,39x_3^2 - 0,655x_1x_2 + 1,87x_1x_3 - 0,875x_2x_3. \quad (3.6)$$

За цією ж методикою було виведено залежність, що описує вплив параметрів на енерговитрати установки при використанні робочого органу у формі “шестикутної сніжинки” з формою лопаті круглого перерізу:

$$y_i = 52,239 + 5,7x_1 + 3,9x_2 - 3,3x_3 + 4,606x_1^2 + 1,6x_2^2 - 1,394x_3^2 - 0,125x_1x_2 + 1,875x_1x_3 - 1,875x_2x_3. \quad (3.7)$$

Як видно з рівнянь 3.4, 3.6, 3.7, що всі три параметри мають вплив на енергоспоживання установки при приготуванні ніздрюватих бетонів і особливо не можна виділити окремий з них. Найбільш впливовими факторами отриманих залежностей становлять час перемішування X_1 та частота обертання робочого органу X_2 , що спостерігалось при проведенні експериментів та призводило до зростання енерговитрат змішувача. Це можна пояснити зростанням опору середовища при підвищенні частоти обертання n за час перемішування суміші t .

Використовуючи програмне забезпечення будуюмо 3-D поверхні, що демонструють вплив трьох основних факторів – часу впливу, рухливості суміші та частоти обертання на витрати електроенергії при змінних робочих органах при використанні вихідних значень діапазонів діючих параметрів з таблиці 3.5 за отриманими залежностями (3.4, 3.6, 3.7).

Поверхні залежності величини витрати електроенергії змішувача при фіксованому одному параметрі та змінним двом іншим в зазначених діапазонах показано на рисунках 3.16 – 3.18 (1 – робочий орган у формі прямокутного перерізу; 2 – робочий орган у формі умовно трикутного перерізу; 3 – робочий орган у формі круглого перерізу).

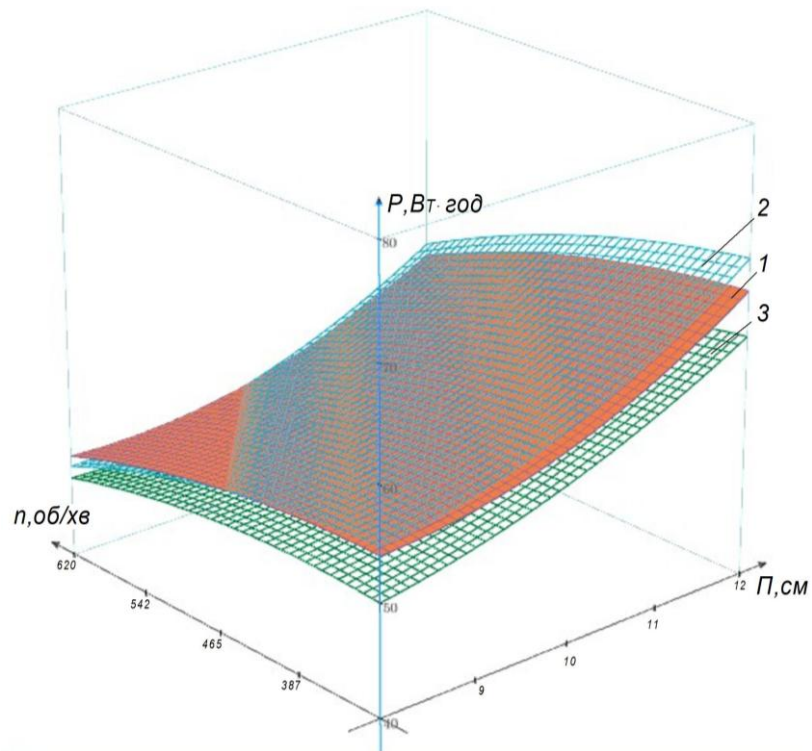


Рисунок 3.16 – Графік залежності витрат електроенергії P від частоти обертання робочого органу n в діапазоні $n = 310 \dots 620$ об/хв та рухливості суміші Π в діапазоні $\Pi = 8 \dots 12$ см

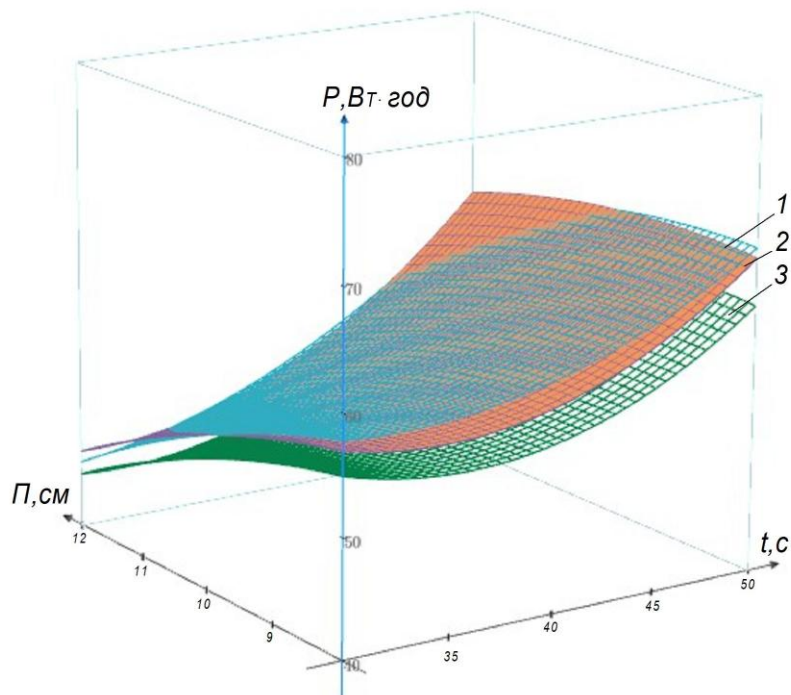


Рисунок 3.17 – Графік залежності витрат електроенергії P від часу впливу t в діапазоні $t = 30 \dots 50$ с та рухливості суміші Π в діапазоні $\Pi = 8 \dots 12$ см

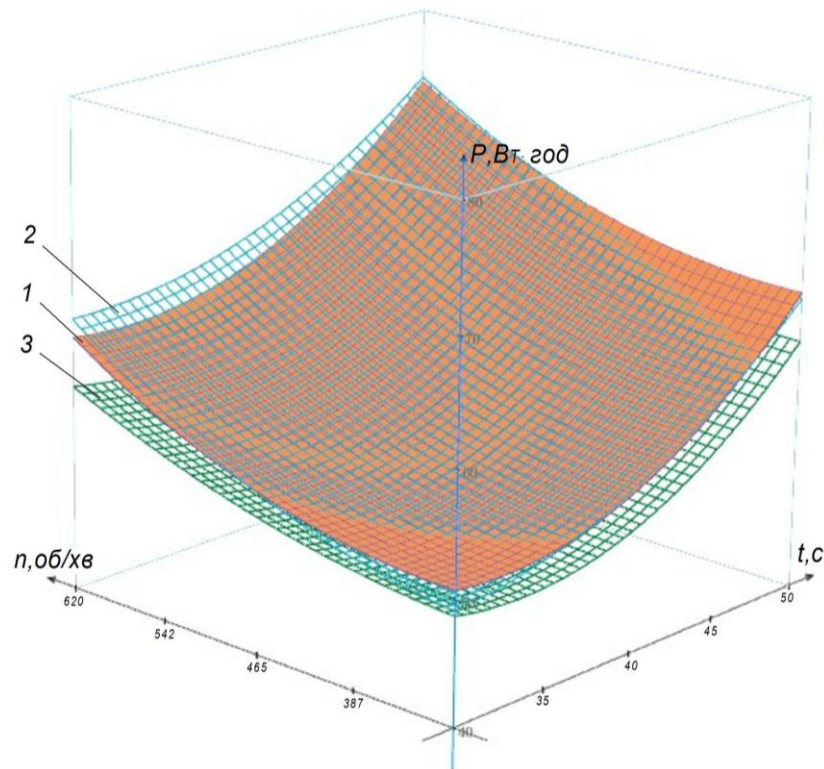


Рисунок 3.18 – Графік залежності витрати електроенергії P від частоти обертання n в діапазоні $n = 310 \dots 620$ об/хв та часу впливу t в діапазоні $t = 30 \dots 50$ с.

Проаналізувавши отримані експериментальні результати, які відображені на графіках (рисунки 3.16 – 3.18), простежується залежність впливу форми робочого органу на витрати електроенергії. На всіх трьох графіках робочий орган, який має круглий поперечний переріз лопаті змішувача показав найменшу спожиту електроенергію. Також було встановлено, що збільшення тривалості перемішування супроводжується пропорційним зростанням енерговитрат, що зумовлено необхідністю підтримання сталого режиму роботи приводу.

Провівши аналіз рівняння регресії в кодованих змінних (рівняння 3.4, 3.6, 3.7) та оцінивши ступінь впливу кожного фактору порівнявши їх коефіцієнти за модулем можна прийти до висновку, що всі вони є вагомими параметрами. Показник X_1 (час переміщення) має найбільший вплив $b_1 = 5,7 \dots 6,7$, дійсно показує при збільшенні часу впливу на

суміш зростають енерговитрати. Параметр X_2 (частота обертання) показує значний позитивний вплив в межах $b_2=3,9...5,9$, що показує при підвищенні швидкості обертання робочого органу зростає споживання електроенергії. Величина X_3 (рухливість суміші) змінюється в межах $b_3=-3,3...-4,2$ і має від'ємний знак. Пояснюється це тим, що при зменшенні рухливості суміші вона чинить більший опір при перемішуванні та збільшує енерговитрати, а при її збільшенні зменшуються споживання електроенергії.

Квадратичні ефект $-1,39 \cdot X_2^2$ має не великий вплив але при цьому занадто мала рухливість може знижувати ефективність змішування. Оптимальна рухливість – може бути всередині інтервалу. Значення X_1^2 має коефіцієнт $b_{11}=3,2...4,606$ і при наближенні до граничних значень часу витрати електроенергії зростають нелінійно.

Коефіцієнти при парних добутках показують, як взаємодія кожного з факторів може підсилити або компенсувати один одного. Взаємодія факторів $X_1 \cdot X_3$ має найбільший коефіцієнт $b_{13}=1,87...1,875$ та показує, що при одночасному збільшенні часу та рухливості суміші енерговитрати зростають значніше, ніж від кожного фактору окремо. Взаємодія факторів $X_1 \cdot X_2$ та $X_2 \cdot X_3$ мають від'ємні значення $b_{12}=-0,125...-0,655$ та $b_{23}=-0,875...-1,875$, таким чином дані пари факторів частково компенсують вплив один одного на загальні енерговитрати.

Разом з тим визначено при проведенні серії дослідів, що оптимальний час змішування ніздрюватих бетонів – 40 с, який забезпечує досягнення необхідної однорідності без надмірного енергоспоживання. Значний вплив на формування енергетичного режиму відіграє й рухливість суміші, раціональне значення якої становить 10 см, що гарантує ефективну взаємодію лопатей із матеріалом та стабільність технологічного процесу.

3.6 Перевірка показників міцності дослідних зразків ніздрюватого бетону

3.6.1 Методика проведення випробувань

Для оцінки властивостей досліджуваного матеріалу використовували метод оцінки на стиснення [111, 112]. Порядок проведення випробувань на стиск передбачала виготовлення та витримування кубічних зразків у нормальних умовах для затвердіння упродовж 28 діб за відносній вологість повітря 95 % та температури +20 °C та подальше руйнуванням на пресі для визначення максимального руйнівного навантаження. Перед початком випробувань проводиться оцінка візуального стану дослідного зразка, якщо не має тріщин і бетон не розкришується та має правильну геометричну форму проводяться подальші випробування [113, 114].

Ніздрюватий бетон марки D700 має межу міцності на стиск 2,5...5,0 МПа, а для бетонів марки D800 міцність на стиск становить 5,0...7,5 МПа. Також щільності газобетону для даних марок повинна бути в межах 700–800 кг/м³ відповідно.

Перед проведенням випробувань здійснювалося вимірювання геометричних параметрів, після чого зразок встановлюють на нижню плиту гідравлічного преса рівною стороною. Випробування газобетону на стиск проводять за стандартами ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [22] навантаження на зразок збільшується поступово до моменту руйнування, при цьому фіксувалося максимальне зусилля, за яким в подальшому розраховується границя міцності бетону. Міцність на стиск R_{cm} , МПа, визначається за формулою:

$$R_{cm} = \frac{F}{S}, \quad (3.8)$$

де F – максимальне руйнівне навантаження, Н;

S – площа поперечного перерізу зразка м².

Для куба зі стороною 100 мм площа перерізу становить 0,01 м² при максимальному навантаженні 29 кН при цьому розрахункова міцність дорівнює 2,9 МПа [31]. Значення міцності відповідає вимогам для газобетону класу D700 межу міцності на стиск 2,5...5,0 МПа .

3.6.2 Перевірка виробів з ніздрюватого бетону на міцність

Після завершення експериментальних досліджень із споживання електроенергії в залежності від використання форми робочого органу приготовану суміш (газобетон) використали для формування контрольних зразків для наступних випробувань (рисунок 3.5). Виготовлені “зразки-куби” мають розміри 100×100×100 мм, що відповідає перевірці дослідних зразків за ДСТУ Б В.2.7-45:2010 [31]. Вибір даної методики зумовлюється прагненням до підтвердження ефективності роботи установки та вибір робочого органу завдяки досягненню необхідних показників міцності. Дослідні зразки з газобетону були виготовлені за рецептурою, яку наведено в таблиці 3.6. відповідно до ДСТУ Б В.2.7-45:2010 [31].

Таблиця 3.6 – Склад дослідних зразків

№	Компоненти	Відносна частка	Відсоткова частка
1	Вода температурою 70 °С, л	10	27,73%
2	Цемент, кг	13	36,05%
3	Пісок, кг	13	36,05%
4	Каустична сода, кг	0,04	0,11%
5	Алюмінієва пудра ПАП-2, кг	0,02	0,06%

Для виготовлення дослідних зразків газобетону використовувалася чітка послідовність дій при виготовленні суміші. При непрацюючому двигуні установки в змішувальний контейнер заливається вода (за рецептурою) температурою 70 °С. Після заповнення контейнер закривається кришкою за

допомогою затискача, потім запускається двигун та через лійку-дозатор в зону змішування послідовно подається підготовлений пісок, а потім цемент. Процес перемішування цементу з піском триває в середньому 30 секунд, надалі через лійку дозатор подається водяний розчин алюмінієвої пудри ПАП-2 з каустичною содою. Процес перемішування піску, цементу, з водяним розчином алюмінієвої пудри і каустичної соди триває 40 секунд. Вивантаження готової робочої суміші проводили через зливний затвор, звідки вона по жолобу надходить у попередньо підготовлені форми. Після ополіскування змішувального контейнеру водою, процес приготування робочої суміші повторюється, за потреби продувається стиснем повітрям

З метою оцінки відповідності виготовленні газобетоні зразки піддавались під час випробуванню на міцність при стиску до моменту руйнування. Дослідні зразки представлені на рисунку 3.19.



Рисунок 3.19 – Дослідні зразки ніздрюватого бетону 100×100×100 мм

Випробування на міцність виконувалось на обладнанні (УВМ-35) та

фіксувалось максимальне навантаження перед руйнуванням дослідного зразка згідно ДСТУ Б В.2.7-45:2010 [31] .

Виготовлені “зразки-куби” встановлювались вертикально, з дотриманням співвісності осі навантаження та вісь дослідного зразка для забезпечення передачі навантаження без виникнення перекосів [115, 116]. Контактні поверхні повинні щільно прилягати до плит гідравлічного преса. Фото виникнення руйнівних навантажень дослідного зразка представлено на рисунку 3.20.

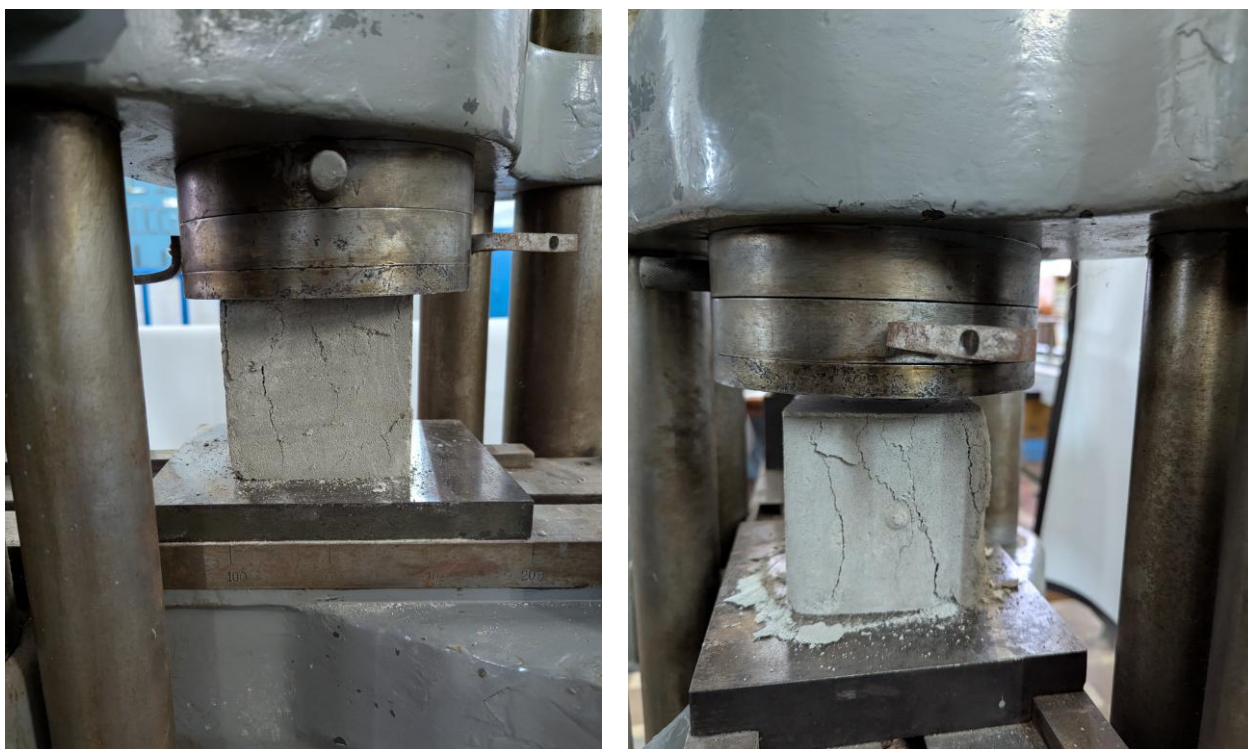


Рисунок 3.20 – Руйнування зразків ніздрюватого бетону

Також визначалася вага кожного дослідного куба окремо для знаходження їхньої густини та порівнювалась з табличними значеннями згідно ДСТУ Б В.2.7-45:2010. Зіставлення табличних даних дозволило встановити, що всі зразки відповідають марці за середньою густиною газобетону D 700. Результати дослідів були занесені в таблицю 3.7, та на її основі побудовано порівняльну гістограму максимального навантаження, яку зображено на рисунку 3.21 та викладено в наукових публікаціях [117, 118].

Таблиця 3.7 – Результати дослідів руйнівних випробувань

Форма робочого органу	Вага одного куба, кг	Марка за середньою густиною	Максимальне навантаження, МПа
Лопать у вигляді прямокутного перерізу	0,713	D700	2,91
	0,723	D700	2,93
	0,718	D700	2,93
Лопать у вигляді трикутного перерізу	0,727	D700	2,92
	0,735	D700	2,93
	0,737	D700	2,925
Лопать у вигляді круглого перерізу	0,738	D700	2,92
	0,726	D700	2,93
	0,738	D700	2,93

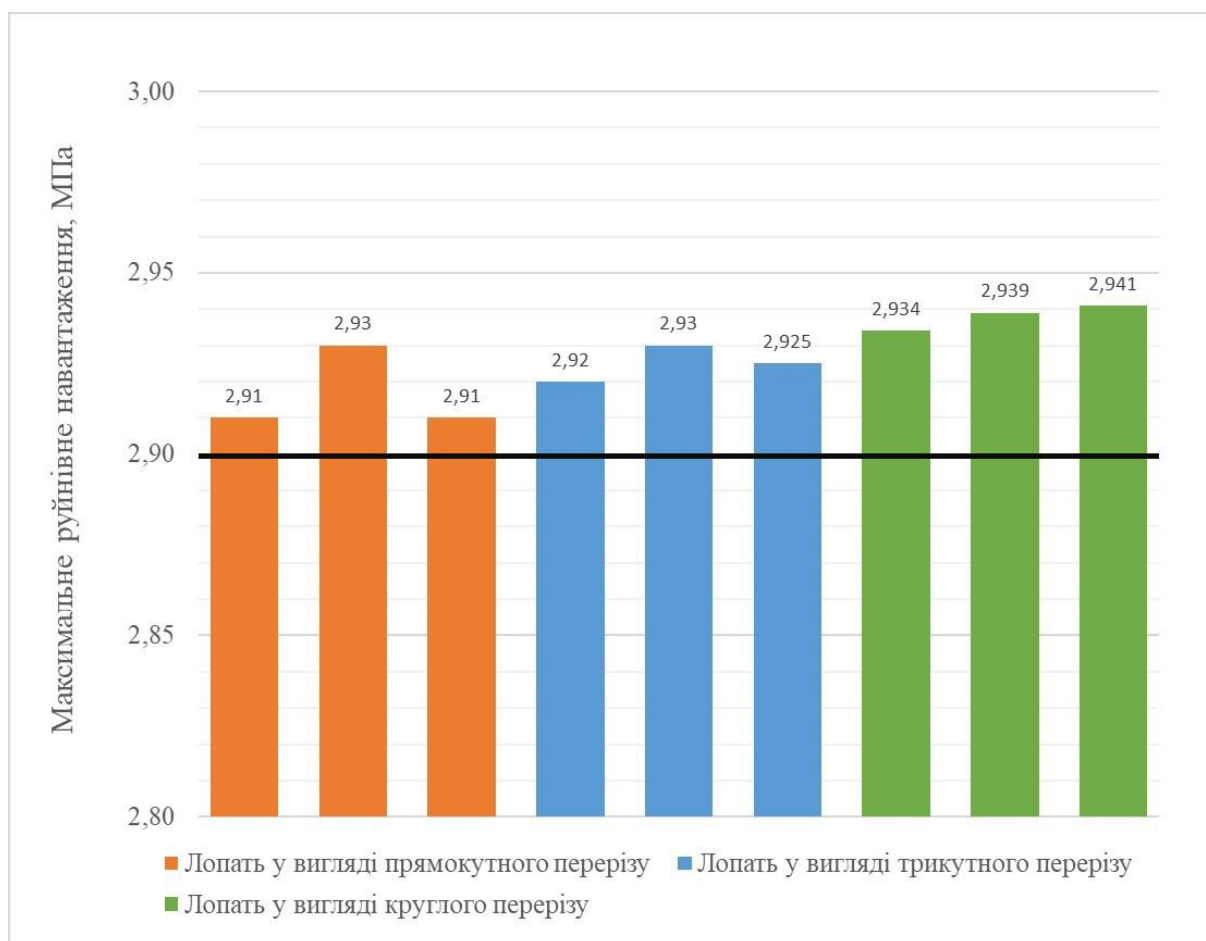


Рисунок 3.21 – Порівняльна гістограма максимального навантаження руйнування ніздрюватого бетону

Аналізуючи результати проведених дослідів при виготовленні зразків газобетону можна стверджувати, що отриманий матеріал відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-45:2010 та підтверджується марка бетону D 700. Отже запропоновані лопаті показали, що можуть якісно змішувати розчини.

3.7 Висновки до розділу 3

1. Для проведення експериментальних досліджень створено експериментальна установку для приготування ніздрюватих бетонів з вертикально розміщеним валом, яка має в комплекті змінні робочі лопаті різної конфігурації.

2. Виконано ряд дослідів для кожного робочого органу, який має різну форму лопаті (у формі прямокутного перерізу, у формі умовно трикутного перерізу, у формі круглого перерізу) змішувальної установки.

3. Проведено три-факторний експеримент з виведенням функціональної залежності для кожного робочого органу, який має різну форму лопаті (у формі прямокутного перерізу формула 3.4, у формі умовно трикутного перерізу формула 3.6, у формі круглого перерізу формула 3.7), що описує вплив зазначених параметрів на енерговитрати установки для приготування ніздрюватих бетонів.

4. Виконано побудову графічних залежностей енергоспоживання до форми робочого органу, який має різну форму лопаті (у формі прямокутного перерізу рисунок 3.16, у формі умовно трикутного перерізу рисунок 3.17, у формі круглого перерізу рисунок 3.18) та проведено аналіз результатів експериментів та математичного моделювання.

5. Виконано перевірку міцності готових бетонних виробів “зразків-кубів” під впливом навантажень до їх максимального руйнівного витримування.

6. На основі отриманих результатів проведено аналіз даних та

побудовано порівняльну гістограму максимального навантаження руйнування газобетону виготовлених різними робочими органами рисунок 3.21.

7. При проведенні аналізу отриманих експериментальних досліджень визначено, що час перемішування t розчину повинен бути в межах 42–47 с., частота обертання n робочого органу змішувача повинна становити 450–500 об/хв, рухливість суміші $П$ повинна перебувати в межах 9–11 см.

8. Дослідним шляхом підтверджено, що запропонована конструкція установки для приготування ніздрюватих бетонів з вертикально розміщеним валом придатна для використання при змішуванні суміші та роботі на будівельних майданчиках.

РОЗДІЛ 4. ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ У ВИРОБНИЧУ ПРАКТИКУ ТА ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ УСТАНОВКИ

4.1 Конструктивні особливості установки для приготування ніздрюватих бетонів

У сучасному будівництві все більшої популярності набуває використання мобільної та компактної техніки, особливо на малих та віддалених від основних будівельних майданчиків - приватних ділянках з обмеженим простором [119]. Одними із таких засобів, які найчастіше використовуються є мобільні бетонозмішувачі, що дозволять змішувати бетон безпосередньо на будівельному майданчику та знижувати витрати при цьому підвищувати ефективність робіт на віддалених ділянках.

На основі проведених теоретичних (розділ 2) та експериментальних (розділ 3) досліджень було створено мобільний бетонозмішувач примусової дії [105] призначений для приготування компонентів при виробництві ніздрюватого бетону, зокрема газобетону, який дістав назву - “Установка для приготування ніздрюватих бетонів”, (далі скорочено УдПНБ-100). Мобільний бетонозмішувач призначений для приготування компонентів при виробництві ніздрюватого бетону та легкого будівельного матеріалу, що базується на цементі (або іншому в'язучому матеріалі), воді та пороутворюючій суміші. Принцип роботи змішувача полягає у поєднанні цих компонентів у визначених пропорціях для отримання однорідної суміші, яка відповідає вимогам до ніздрюватих бетонів.

Конструкція установки для приготування ніздрюватих бетонів показано на рисунку 4.1, що може використовуватися в будівництві для приготування різноманітних будівельних сумішей, газобетону і фібробетону. Технічну

характеристику установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100 наведено у таблиці 4.1.



Рисунок 4.1 – Загальний вигляд дослідного зразка установки для приготування ніздрюватих бетонів (УдПНБ-100)

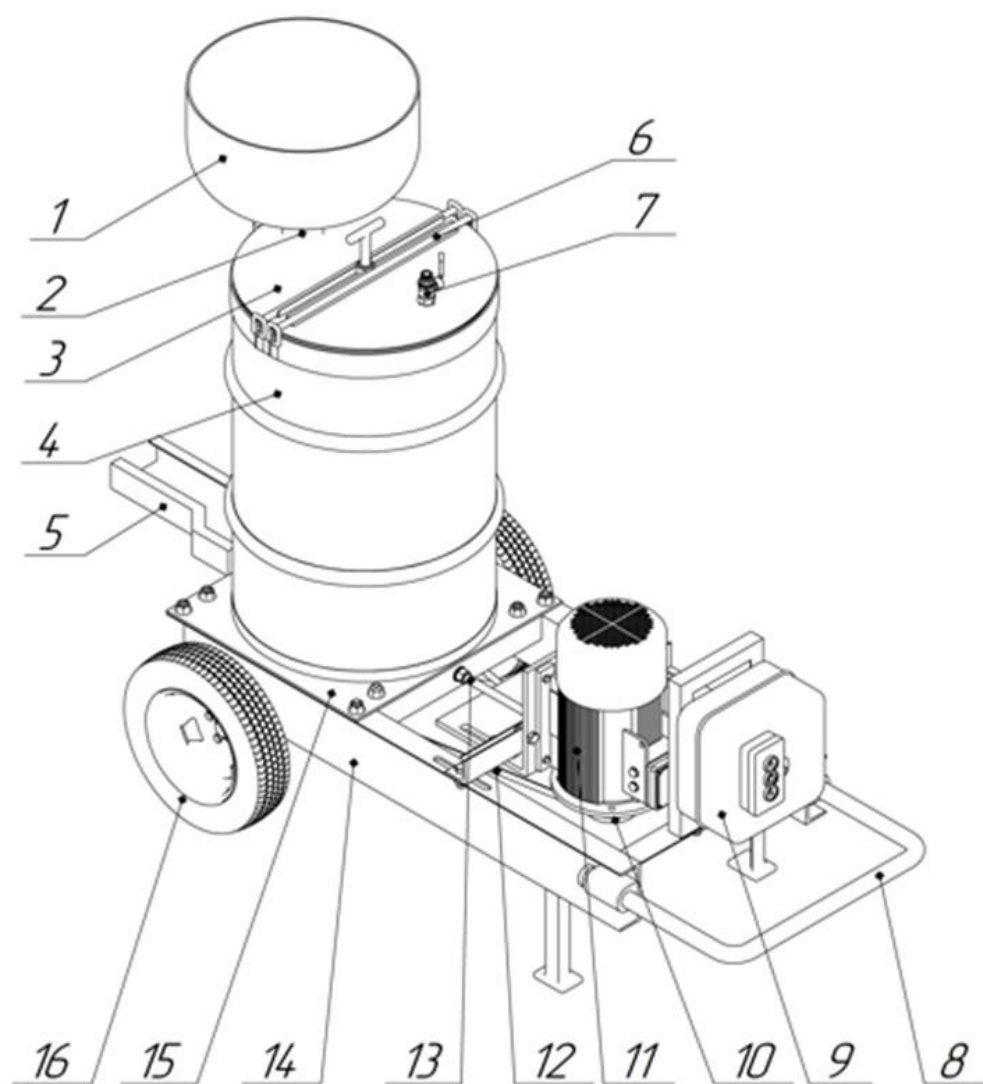
За результатами розробки мобільного бетонозмішувача примусової дії отримано патент на корисну модель [120]. Конструкція установки передбачає використання змінних лопатей різної форми, що сприяє зниженню витрачання електричної енергії однорідності суміші та стабільності її фізико-механічних властивостей. Запропонована установка може бути ефективно використана в умовах обмеженого робочого простору та легко переміщуватись по будівельному майданчику або між майданчиками силами оператора.

Таблиця 4.1 – Технічна характеристика установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100

Назва параметру	Позначення	Одиниця вимірювання	Величина
Об'єм змішувального контейнера	V_z	м ³	0,1
Об'єм готової суміші на виході	V	м ³	0,05
Діаметр завантажувального отвору змішувального контейнера	d	м	0,55
Робочий тиск в змішувальному контейнері	P	МПа	до 0,1
Частота обертів змішувальної лопатки	ν	об/хв	310...620
Тип привода	пасовий		
Передатне число привода	k	-	3,2
Потужність двигуна	P	Вт	2200
Частота обертів двигуна	n	об/хв	1000
Вага	m	кг	90
Габаритні розміри:			
- довжина	l	мм	1700
- ширина	b	мм	600
- висота	h	мм	1200

Конструктивна схема установки для приготування ніздрюватих бетонів (УдПНД-100) показана на рисунку 4.2. Змішувальна установка складається з рами 14, до якої прикріплюється електродвигун 11, який використовується для приведення в рух приводу 10 змішувального механізму, що передає зусилля через пасову передачу 12. Натяжка пасу регулюється за допомогою натяжного гвинта 13. Пасова передача приводить в дію змішувальні лопатки, які використовуються для змішування компонентів у змішувальному контейнері 4, який розташований на платформі 15. Для запобігання витрат матеріалу під час процесу змішування та для забезпечення безпеки використовується елемент, який накриває змішувальний контейнер, а саме кришка 3 яка є герметичною завдяки затискачу 6. На кришці 3 знаходиться

засипний отвір 2 призначений для відкривання та закривання доступу до змішувального контейнера, щоб контролювати процес змішування та засипати матеріал для приготування суміші.



1 – лійка-дозатор; 2 – засипний отвір; 3 – кришка; 4 – змішувальний контейнер; 5 – вивантажувальний жолоб; 6 – затискач кришки; 7 – штуцер для подачі газів, або повітря; 8 – ручка для буксування; 9 – магнітний пускач; 10 – привід 11 – електродвигун; 12 – пасова передача; 13 – натяжний гвинт; 14 – рама; 15 – платформа; 16 – опорні колеса.

Рисунок 4.2 – Конструктивна схема установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100

Для того щоб дозувати кількість матеріалів використовується лійка-дозатор 1, також на кришці знаходиться штуцер подачі повітря 7, розвантаження змішувального контейнера відбувається через вивантажувальний жолоб 5. Для покращення змішування всередині змішувального контейнера по боках встановлені додаткові лопатки, які забезпечують правильну орієнтацію та рух матеріалу в змішувальному контейнері під час процесу приготування суміші у вертикальній та горизонтальній площині.

Керування пристроєм здійснюється за допомогою магнітного пускача 9, який кріпиться до рами для забезпечення максимальної зручності для оператора. Цей пускач використовується для запуску та зупинки робочого процесу та зміни (за потреби) напрямку обертання змішувальної лопатки, надаючи оператору легкий і швидкий спосіб управління змішувачем.

Принцип роботи мобільного бетонозмішувача примусової дії, полягає у тому, що лопатки, розташовані на вертикальному валу в нижній частині пристрою, обертаються і активно перемішують суміш. Фото розташування робочих органів установки для приготування ніздрюватих бетонів зображено на рисунку 4.3.



Рисунок 4.3 – Робочі органи бетонозмішувача УдПНБ-100

Швидкість обертання змішувальних лопаток достатньо велика і досягає 310...620 об/хв в порівнянні з звичайними змішувачами і цим досягається краще змішування ніздрюватого бетону. Якщо на будівельному майданчику потрібно приготувати інший тип розчину швидкість обертання валу можна регулювати за допомогою шківів, які можна замінювати, таким чином змінюючи частоту обертів. Завдяки тому, що установка обладнана кришкою та спеціальним штуцером для подачі газів, який робить змішувач особливо ефективним для виготовлення ніздрюватих бетонів. При цьому обладнання зберігає свою універсальність, що дозволяє використовувати його для інших будівельних сумішей.

4.2 Методика розрахунку основних параметрів установки для приготування ніздрюватих бетонів

При проектуванні установки для приготування ніздрюватих бетонів із зазначеними технічними параметрами (таблиця 4.1), приведена узагальнена методика розрахунку базових конструктивно-технологічних параметрів. Методика базується на результатах комплексних експериментальних досліджень, спрямованих на оптимізацію основних конструктивних параметрів дослідного зразка установки для приготування ніздрюватого бетону, які проводилися під час змішування бетонних сумішей різного складу та показників рухливості в змішувальній ємності.

До ключових параметрів, що характеризують змішувач, належать:

- продуктивність змішувальної установки;
- геометричні розміри змішувальної ємності
- геометрія змішувальних лопатей;
- кутова швидкість робочого органу;
- ступінь заповнення змішувальної камери;
- довговічність та зносостійкість деталей;

Значення основних параметрів забезпечують комплексну основу для оцінки продуктивності та експлуатаційної ефективності змішувача з використанням набору ключових критеріїв, включаючи пропускну здатність, якість виробленої суміші, споживання конструкційних матеріалів, довговічність та зносостійкість критичних компонентів, а також раціональність та технологічність загальної конструкції.

Перелічені показники можуть слугувати основою для формулювання технічних вимог до установок, призначених для виробництва ніздрюватого бетону. У цьому контексті параметри змішувача слід вибирати таким чином, щоб за заданого рівня продуктивності забезпечувалися стабільні умови для отримання високоякісної бетонної суміші.

Вихідним параметром для визначення усіх основних параметрів установки для приготування ніздрюватих бетонів є її продуктивність.

В залежності від заданої продуктивності величина робочого об'єму бункера $V_{зм}$, м^3 визначається за формулою:

$$V_{зм} = \frac{\Pi \cdot t}{60 \cdot k_n \cdot k_{\theta}}, \quad (4.1)$$

де t – тривалість інтенсивного змішування ніздрюватих бетонів, хв;

k_n – коефіцієнт, що враховує об'єм, що займають робочі органи змішувача, $k_n = 1,18 \dots 1,2$;

k_{θ} – коефіцієнт використання робочого часу.

Також величину робочого об'єму бункера $V_{зм}$, м^3 можна представити у вигляді добутку:

$$V_{зм} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot H, \quad (4.2)$$

де d – діаметр змішувального бункера, м;

H – висота змішувального бункера, м.

Розрахункова схема змішувального бункеру установки для приготування ніздрюватих бетонів зображена на рисунку 4.4.

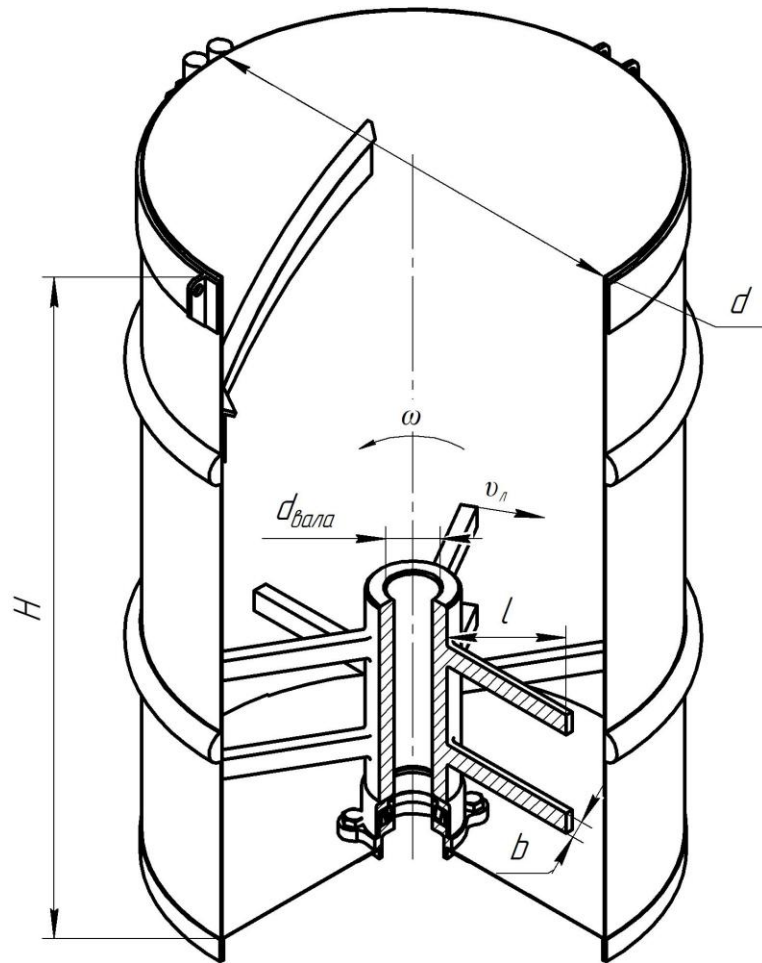


Рисунок 4.4 – Розрахункова схема установки УдПНБ-100

Висота корпусу змішувального бункеру H залежить від довжини лопатей, радіусу змішувального бункеру R та від ступеня заповнення змішувача. Для змішувача безперервної дії приймаємо залежність:

$$H = R \cdot (2,3...2,4), \quad (4.3)$$

де R – радіус змішувального бункеру, м.

Площа однієї лопаті S , м^2 змішувальної установки розраховуємо:

$$S = l \cdot b, \quad (4.4)$$

де l – довжина лопаті, м;

b – ширина лопаті, м.

Заповнення змішувального бункеру $V_{роб}$, м³ знаходимо за залежністю:

$$V_{роб} = V_{зм} \cdot \mu, \quad (4.5)$$

μ – коефіцієнт заповнення суміші в змішувальному бункеру,
 $\mu = 0,4 \dots 0,6$;

Кутову швидкість ω , об/хв, робочого органу змішувальної установки визначаємо за формулою:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n, \quad (4.6)$$

n – частота обертання робочого органу змішувальної установки, об/хв.

Частота обертання робочого органу n , об/хв, змішувальної установки визначається залежністю:

$$n = \frac{n_{дв}}{i_{пер}}, \quad (4.7)$$

де $n_{дв}$ – частота обертання електродвигуна змішувальної установки, об/хв;

$i_{пер}$ – загальне передаточне число привода змішувальної установки.

Лінійна швидкість v_l , м/с, кінця лопаті змішувальної установки визначаємо за формулою:

$$v_l = \omega \cdot R. \quad (4.8)$$

З експериментальних досліджень діапазон лінійної швидкості лопатей повинен бути в межах від 1,5 до 4,0 м/с.

Крутний момент $M_{кр}$, Н·м, на лопаті робочого органу визначається за формулою:

$$M_{кр} = \frac{P}{\omega}, \quad (4.9)$$

де P – потужність, яка необхідна для перемішування змішувальної установки, Вт.

Діаметр вала $d_{\text{вала}}$, мм, на якому встановлений робочий орган змішувальної установки визначається за формулою:

$$d_{\text{вала}} = \sqrt[3]{\frac{M_{\text{кр}}}{[\sigma] \cdot 0,1}}, \quad (4.10)$$

де $[\sigma]$ – допустиме напруження матеріалу вала при крученні, МПа.

Інтенсивність зношування $I_{\text{зн}}$, лопатей робочого органу розраховується за формулою:

$$I_{\text{зн}} = k_{\text{зн}} \cdot p \cdot v_{\text{л}} \cdot t, \quad (4.11)$$

де $k_{\text{зн}}$ – коефіцієнт зношування матеріалу лопаті;

p – питомий тиск на лопать, Па;

t – час роботи, с

Питомий тиск p , Па, на лопать робочого органу змішувальної установки визначаємо за формулою:

$$p = k_{\text{оп}} \frac{\rho \cdot v_{\text{л}}^2}{2}, \quad (4.12)$$

де $k_{\text{оп}}$ – коефіцієнт опору лопаті, $k_{\text{оп}} = 1,2 \dots 2,5$;

ρ – густина суміші, кг/м³;

Питомий тиск можна визначити також за іншою формулою:

$$p = \frac{M_{\text{кр}}}{R \cdot S}, \quad (4.13)$$

Розроблена методика була використана при проектуванні та виготовленні установки для приготування ніздрюватих бетонів (УПНБ-100) та підтвердила свою ефективність при проведенні експериментальних досліджень та випробувань. Вона призначена для розрахунку основних геометричних параметрів змішувального бункера в складі УдПНБ-100 передбачає послідовне виконання таких етапів:

1. На основі визначеної продуктивності визначається величина робочого об'єму бункера змішувальної установки (формули 4.1 та 4.2);

2. Визначається та призначається висота бункера змішувальної установки (формула 4.3);
3. Розраховується площа лопаті змішувальної установки (формула 4.4);
4. Визначається заповнення змішувального бункеру (формула 4.5);
5. Визначається потужність електродвигуна приводу змішувальної установки (розділ 2 рівняння 2.42);
6. Вибирається електродвигун приводу змішувальної установки за каталогами виробників;
7. Обчислюється кутова швидкість робочого органу змішувальної установки (формула 4.6) та частота обертання робочого органу (формула 4.7);
8. Розраховується крутний момент на лопаті робочого органу змішувальної установки (формула 4.9);
9. Обчислюється діаметр вала, на якому встановлений робочий орган змішувальної установки (формула 4.10);
10. Визначається інтенсивність зношування лопатей робочого органу (формула 4.11);
11. Розраховується питомий тиск на лопать робочого органу (формула 4.12 та 4.13).

4.3 Результати виробничих випробувань дослідного зразка установки для приготування ніздрюватих бетонів

Задля оцінювання ефективності та працездатності розробленої установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100 було проведено виробничі випробування в реальних умовах будівельного майданчика. Випробування проводилися на підприємстві ТОВ «АСФЕР ГРУП», акт випробувань наведений у додатку Г.

Випробування установки для приготування ніздрюватих бетонів здійснювалися під час будівництва двоповерхового житлового будинку за адресою м. Полтава, вул. Битви на Ворсклі, 30. У процесі впровадження установка використовувалася для приготування ніздрюватого газобетону та фібробетону з подальшим виконанням робіт із заливки підлоги. Отримані результати підтвердили працездатність установки та можливість її ефективного застосування в умовах реального будівництва (рисунок 4.5 та рисунок 4.6).



Рисунок 4.5. Установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100 в місці проведення бетонних робіт.



Рисунок 4.6 – Облаштування підлогового покриття з ніздрюватим методом заливки

Протягом виробничих випробувань (заливки підлоги з фібробетоном) користувалися наступним рецептом матеріалу: вода температурою 70°C – 27,73% цемент – 36,05%, пісок – 36,05, каустична сода – 0,11%, алюмінієва пудра ПАП-2 – 0,06%. При заливці підлоги фібробетоном додавали фібру з скловолокна (до 0,01% за об’ємом).

Під час проведення випробувань особливу увагу було зосереджено на тепловому режимі роботи електродвигуна. При приготування суміші протягом змінної тривалості 8 годин підвищення температури двигуна до критичних значень та спрацьовування теплового захисту не спостерігалось, що свідчить про його роботу в межах допустимих номінальних навантажень. Забезпечення оптимального режиму роботи електродвигуна було досягнуто завдяки стабільному навантаженню на робочі органи установки та рівномірній подачі компонентів. Особливу увагу під час дослідження було приділено стану пасової передачі. У процесі роботи установки протягом 8 годин не виявлено ознак надмірного нагрівання паса або його проковзування. Також контролювався тепловий стан підшипникового вузла приводного валу змішувальних лопатей. За результатами виробничих випробувань нагрівання підшипникового вузла під час змінної роботи не зафіксовано, що підтверджує надійність його роботи в заданих умовах експлуатації.

За час експлуатації установки протягом п'яти місяців не зафіксовано жодного випадку витoku води або робочої суміші через сальникові ущільнення підшипникового вузла. Це свідчить про надійну роботу вертикальної конструкції валу з нижнім розміщенням ущільнень. Поворотний жолоб забезпечує необхідний напрямок подачі робочої суміші у форми або на площу підлоги. Дозаторна лійка гарантує безперебійну та оперативну подачу компонентів до змішувальної ємності. Затвор забезпечує герметичне закриття змішувальної ємності, а також швидке відкриття та вивантаження готової суміші.

Проведені випробування виявили певні особливості експлуатаційного обслуговування установки, зокрема, необхідність ретельного промивання змішувальної ємності з метою запобігання порушенням роботи, спричиненим затвердінням залишків розчину. Після проведення незначних конструктивних доопрацювань за результатами виробничих випробувань, установка для

приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100 рекомендована до впровадження у будівельне виробництво.

Крім того, на підприємстві ТОВ «ПРИМУМ АКТИВ» були проведені аналогічні виробничі випробування установки УдПНБ-100 (додаток Г). Метою випробувань була перевірка надійності змішувача в умовах тривалої експлуатації та оцінка можливості для виробництва дослідної партії. У процесі практичного використання установка використовувалася як для приготування газобетону, так і для фібробетону, що дозволило оцінити її універсальність та технологічну ефективність.

Під час виготовлення газобетону, який є різновидом ніздрюватого бетону, використовувалися стандартні компоненти – пісок, цемент, алюмінієва пудра та гаряча вода, а в деяких випадках додатково вводилися пластифікатори та фіброволокно з метою покращення фізико-механічних характеристик матеріалу. При виконанні робіт із заливки підлоги з використанням фібробетону (рисунок 4.7) забезпечувалася висока точність поверхні, при якій перепад рівнів не перевищував 2 мм на довжині 2 м, що дозволило значно знизити витрати на подальші оздоблювальні роботи.



Рисунок 4.7 – Заливка підлоги фібробетоном

Конструкція установки передбачає можливість адаптації до конкретних виробничих умов завдяки вибору геометрії лопатей та шківів, а також характеризується високою мобільністю завдяки наявності коліс та розбірному виконанню, що забезпечує зручність транспортування та використання в умовах обмеженого робочого простору. Сукупність зазначених конструктивних рішень підтверджує доцільність впровадження установки та її перспективність для серійного виробництва.

Також результати дослідження установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100 було впроваджено в освітній процес кафедрою галузевого машинобудування та мехатроніки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» під час викладання дисциплін «Будівельна техніка» та «Машини для виробництва будівельних матеріалів та механізований інструмент» здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування» (додаток Г).

4.4 Рекомендації з подальшого удосконалення конструкції змішувача

Під час виготовлення експериментального зразка установки для приготування ніздрюватих бетонів та її виробничих випробувань були виявлені конструктивні та технологічні особливості, усунення яких дозволить підвищити продуктивність установки та покращити експлуатаційні показники. Проаналізувавши роботу основних вузлів та механізмів визначався напрям подальшого вдосконалення конструкції, спрямовані на зменшення матеріаломісткості та підвищення продуктивності обладнання.

Серед напрямків подальшого вдосконалення установки УдПНБ-100 можна виділити наступні пункти:

1. Прагнучи зменшити матеріалоємності доречно замінити існуючу конструкцію жолоба на простішу. Визначення раціональних параметрів форми конструкції жолоба дозволить зменшити масу вузла без погіршення його характеристик жорсткості. Водночас спрощена конструкція повинна забезпечувати зручну подачу суміші. Запропоноване рішення має сприяти підвищенню надійності та скороченню часу очищення після завершення робочого процесу.

2. Після розроблення раціональної форми жолоба потрібно приділити увагу герметичності розвантажувального затвора. Оптимізація форми ущільнювальних поверхонь зменшить втрати робочої суміші та запобіжить протіканню під час роботи. Також удосконалення розвантажувального затвора забезпечить більш рівномірне та контрольоване видалення суміші. У свою чергу, це вплине на підвищення точності дозування матеріалу при заливанні форм або конструкцій перекриття.

3. За висновками провідних спеціалістів підприємства було висловлено побажання щодо встановлення змішувальної установки у складі установки «УдПНД-100» для забезпечення примусової подачі бетонної суміші безпосередньо до місця заливки. Дане технічне рішення могло б значно розширити функціональність обладнання та зменшити потребу в додаткових транспортних операціях. Використання змішувальної установки збільшить дальність подачі суміші та його загальну продуктивність. Крім того, механізована подача суміші призведе до зниження трудомісткості виконання робіт та підвищення стабільності технологічного процесу.

Реалізація вище описаних удосконалень установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100, дозволить мінімізувати втрати робочої суміші, підвищити точність дозування та суттєво знизити трудомісткість при транспортуванні робочої суміші.

4.5 Попередній розрахунок економічної ефективності та впровадження установки для приготування ніздрюватих бетонів

З огляду на вище сказане, можна стверджувати, що для проведення операцій з приготування сумішей для виробництва ніздрюватих бетонів можна виконувати ефективно установку для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100. Критерієм вибору найбільш раціонального варіанту технологічного обладнання в роботі прийнято економічний ефект, що визначається як різниця приведених витрат за порівнюваними варіантами.

У цьому дослідженні оцінка ефективності здійснювалася для умов приготування сумішей з використанням розробленої та впровадженої установки УдПНБ-100, а також серійного змішувача FCM 5, який розглядався у першому розділі.

На підставі проведених розрахунків, наведених у додатку Б, можна обґрунтовано стверджувати, що виготовлення та впровадження установки у будівельне виробництво є економічно доцільним. Результати зведених розрахунків ефективності створення установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100 наведені у таблиці 4.2 свідчать, що розроблена конструкція установки забезпечує річний економічний ефект у 24756 гривень.

Таблиця 4.2 – Результати розрахунку ефективності створення установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100

№	Найменування показників	Значення	
		FCM-5	УдПНБ-100
1	Капітальні вкладення на змішувач, K , грн.	123200	77992
2	Оптова ціна змішувача, C_o , грн.	110000	69636
3	Річний фонд часу, T_p , год	1547	1594
4	Річна експлуатаційна продуктивність, B , м ³ /рік	444	456
5	Річні амортизаційні відрахування, S_{AM} , грн.	27013	17101
6	Вартість машино-години роботи змішувача, S_{m-r} , грн./год	205,81	195,04
7	Питома трудомісткість одиниці продукції, r_y , норм-год/м ³	3,873	3,855
8	Питома енергоємність одиниці продукції, ε_y , кВт·год/м ³	2,509	2,307
9	Питомі приведені витрати, Z_y , грн./м ³	758,73	704,44
10	Річна економія витрат на електроенергію, ε , кВт·год/рік	-	92
11	Річна економія на витратах матеріалів, M , кг/рік	-	4,1
12	Річна економія на витратах праці, R , чел./рік	-	0,004
13	Річний економічний ефект, E_p , грн.	-	24756

Таким чином розрахунки доводять доцільність розроблення, виготовлення та впровадження у практику будівельного виробництва УдПНБ-100, а також його конкурентоспроможність порівняно з існуючими серійними зразками.

4.6 Висновки з розділу 4

1. За результатами виконаних дисертаційних досліджень, а також аналізу конструктивних рішень різних типів змішувальних пристроїв запропонована та виготовлена нова конструкція установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100. Змішувальна установка відрізняється від своїх аналогів мобільністю та зручністю в користуванні, а також більшою сферою застосувань (різноманітних будівельних сумішей, газобетону і фібробетону).

2. За результатами проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблена методика розрахунку раціональних конструктивних параметрів установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100. На її підставі розроблена технічна документація на змішувач УдПНБ-100 та виготовлений натурний зразок.

3. У ході виробничих випробувань на будівельних підприємствах ТОВ «АСФЕР ГРУП» та ТОВ «ПРИМУМ АКТИВ» було проведено комплексне тестування установки для приготування ніздрюватих бетонів. Отримані результати підтвердили відповідність проектно-технічних характеристик обладнання, встановленими розрахунковими параметрами установки для приготування ніздрюватих бетонів.

4. Річний економічний ефект від упровадження спроектованої установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100 порівняно з аналогом у 2025 році становить 24756 грн.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В результаті комплексних експериментально-теоретичних досліджень вирішено важливу науково-технічну задачу з удосконалення загального підходу до обґрунтування робочих параметрів установки для приготування ніздрюватих бетонів шляхом встановлення раціональних геометричних параметрів і кінематичних характеристик руху робочого органу. Що дозволило забезпечити максимальну однорідність складу будівельної суміші та знизити енергоспоживання під час експлуатації змішувальної установки.

1. Аналіз стану питання і попередніх досліджень впливу форми робочих органів на перемішування суміші та енерговитрат дозволив запропонувати доцільну конструкцію змішувача. Визначено шляхи підвищення ефективності роботи змішувальної установки для приготування ніздрюватих бетонів.

2. Встановлено взаємодію між силами, які виникають при роботі змішувального органу установки для приготування ніздрюватих бетонів: силою F_1 , яка виникає внаслідок тертя по стінці змішувального контейнера при дії відцентрової сили, силою тертя F_2 , що виникає внаслідок тиску власної ваги суміші, силою лобового опору F_3 , силою F_4 , яка створює опір зсуванню будівельної розчинної суміші, силою тертя будівельної розчинної суміші F_5 , що переміщується нижнім рядом лопатей по днищу бункера, відцентровою силою F_6 створена лопаттю змішувальної установки. Виведено залежності лобового тиску на лопать $k_{л.о.}$, для розрахунку геометричних параметрів робочого органу установки для приготування ніздрюватих бетонів для лопаті квадратного, умовно трикутного та круглого перерізу.

3. Визначено основні параметри, які впливають на енерговитрати при приготуванні ніздрюватих бетонів, а саме t – час перемішування, n – частота обертання робочого органу, Π – рухливість суміші та отримано залежності між витратами енергії P на підтримку швидкісного режиму суміші у зоні

вихрового потоку $P_{ш.р.}$ та на подолання сил опору при взаємодії лопатей із матеріалом $P_{о.р.л.}$ змішувальної установки.

4. Встановлено вплив лобового тиску на лопать $k_{л.о.}$ різної геометричної форми робочих органів (для лопаті квадратного, умовно трикутного та круглого перерізу) установки для приготування ніздрюватих бетонів з робочою сумішшю. Визначено, що найменший лобовий тиску створюється на лопать круглого перерізу.

5. Досліджено залежність потужності, яка споживається установкою для приготування ніздрюватих бетонів, від геометричних і робочих параметрів змішувальної установки, а також властивостей робочої суміші, що переміщується. При проведенні аналізу отриманих експериментальних досліджень визначено, що час перемішування t розчину повинен бути в межах 42–47 с., частота обертання n робочого органу змішувача повинна становити 450–500 об/хв, рухливість суміші $П$ повинна перебувати в межах 9–11 см.

6. В результаті випробування на міцність готових бетонних виробів під впливом навантаження до їх максимального руйнівного витримування, виготовлених за допомогою робочого органу з лопатями різних перерізів (прямокутного, трикутного, круглого), було встановлено, що отриманий матеріал відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-45:2010 і має марку бетону D 700. Це підтверджує придатність запропонованої конструкції установки для приготування ніздрюватих бетонів з вертикально розміщеним валом для ефективного змішування суміші та використання на будівельних майданчиках.

7. За результатами виконаних дисертаційних досліджень виготовлена нова конструкція установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100. Розроблена методика розрахунку раціональних конструктивних параметрів установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНБ-100.

8. Вирішальним етапом стали виробничі випробування на будівельних підприємствах ТОВ «АСФЕР ГРУП» та ТОВ «ПРИМУМ АКТИВ», де було проведено тестування установки для приготування ніздрюватих бетонів. Отримані результати підтвердили відповідність проектно-технічних характеристик обладнання встановленим розрахунковим параметрам, при впровадженні визначено річний економічний ефект спроектованої установки УдПНБ-100 порівняно з аналогом у 2025 році становить 24756 грн.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Пілюшенко В. Л., Шкрабак І. В., Славенко Е. І. Наукове дослідження організація, методологія, інформаційне забезпечення : навч. посіб. Київ : Лібра, 2004. 344 с.
2. Назаренко І. І. Машини для виробництва будівельних матеріалів: підручник. Київ : КНУБА, 1999. 488 с.
3. Назаренко І. І. Фізичні основи механіки будівельних матеріалів : конспект лекцій. Київ : КНУБА. 2001. 104 с.
4. Назаренко І. І. Визначення раціональних параметрів гравітаційних бетонозмішувачів. *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2017. Вип. 90. С. 67-72.
5. Ємельянова І. А., Гордієнко А. Т., Субота Д. Ю. Особливості виконання бетонних робіт в умовах будівельного майданчика. *Науковий вісник будівництва*. 2018. №3(93). С. 205–214.
6. Ємельянова І. А., Аніщенко А. І. Визначення основних показників роботи технологічного комплексу обладнання, що складається з бетонозмішувача гравітаційно-примусового дії та стрічково-скребкового живильника. *Збірник наукових праць : Галузеве машинобудування, будівництво*. 2012. Вип. 1. С. 28–34.
7. Сівко В. Й., Поляченко В. А. Обладнання підприємств промисловості будівельних матеріалів і виробів : підручник. Київ : АВЕГА, 2004. 276с.
8. Сівко В. Й. Механічне устаткування підприємств будівельних виробів. Київ : ІСДО. 1994. 359 с.
9. Онищенко О. Г., Онищенко В. О., Литвиненко С. Л., Коробко Б. О. Будівельна техніка: підручник. Київ : Кондор, 2017. 424 с.
10. Онищенко О. Г., Ващенко К. М. Розрахунок потужності та визначення опорів, що виникають при роботі стрічкового шнекового розчинозмішувача. *Вісник КДПУ*. 2006. Вип. 1(36). С. 58–63.

11. Онищенко О. Г. Охорона праці при експлуатації будівельної техніки: довідник. Київ : Урожай, 1992. 208 с.
12. Бетонозмішувальна установка: пат. 15643 Україна: МПК В28С5/14. №u200512620; заявл. 27.12.2005; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7/2006.
13. Лопатевий змішувач: пат. 9899 Україна: МПК В28В5/00. №u200503662; заявл. 18.04.2005; опубл. 17.10.2005, Бюл. № 10/2005.
14. Одновальний лопатевий вібраційний змішувач: пат. 33788 Україна: МПК В28С5/14. №u200803115; заявл. 11.03.2008; опубл. 10.07.2008, Бюл. № 13/2008.
15. Саленко Ю. С., Вакуленко Р. А., Шевчук О. Ю., Лисенко О. В. Дослідження робочого режиму бетонозмішувача безперервної дії. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2020. Вип. 1. С. 133–139.
16. Вібраційний бетонозмішувач: пат. 155534 Україна: МПК В28С5/00. №u202304392; заявл. 18.09.2023; опубл. 06.03.2024, Бюл. № 10/2024.
17. Одновальний лопатевий вібраційний бетонозмішувач: пат. 50096 Україна: МПК В28С5/14. № u200912265; заявл. 30.11.2009; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10/2010.
18. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Основи бетонознавства. Київ : Основа. 2007. 616с.
19. Ушеров-Маршак О. В., Гоц В .І., Кабусь О. В. Бетони та будівельні розчини. Київ: Основа. 2022. 93 с.
20. Gagg, Colin R. Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis. *Engineering Failure Analysis*. 2014. Vol.40. P.114–140. DOI:10.1016/j.engfailanal.2014.02.004.
21. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б., Кочевих М. О., Гасан Ю. Г. Будівельне матеріалознавство: підручник. Київ: Ліра-К. 2012. 624 с.

22. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. Чинний від 01.09.2010. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України. 43 с

23. Лемешев М. С., Христич, О. В., Зузяк, С. Ю. Ресурсозберігаюча технологія виробництва будівельних матеріалів з використанням техногенних відходів. *Сучасні технології, матеріали і конструкції у будівництві*. 2018. № 1. С. 18–23.

24. Коверніченко Л. Структура штучних будівельних матеріалів і її особливості. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2019. № 11. С. 38–43. DOI: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-1\(11\)-05](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-1(11)-05).

25. Саницький М. А., Позняк О.Р., Марущак У. Д. Енергозберігаючі технології у будівництві. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2012. 236 с.

26. Васильєв О. С., Кулай В. П. Обґрунтування робочих процесів обладнання для приготування будівельних розчинів розріджених інертними газами. *Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки* : матеріали VII Всеукр. наук.-техн. конф., м Полтава, 25 квіт. 2024 р. Полтава, 2024. С. 122–124.

27. Вірченко В. В. Приготування будівельних розчинових сумішей за допомогою ефективних змішувачів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2006. Вип. 1(66). Ч. 1. С. 71 – 74.

28. Collepardi M. Innovative Concrete for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC. *Workshop on new Technologies and Materials in Civil Engineering*. Milan (Italy). 2003. P. 1–8.

29. Рунова Р. Ф., Гоц В. І., Саницький М. А. Конструкційні матеріали нового покоління та технології їх впровадження в будівництво. Київ : ЕксОб, 2008. 360 с.

30. Кривенко П. В., Ковальчук Г. Ю., Ковальчук О. Ю. Перспективи застосування лужних ніздрюватих бетонів. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*. Вип. 32. 2009. С. 69-73.

31. ДСТУ Б В.2.7-45:2010. Бетони ніздрюваті. Загальні технічні умови. Чинний від 01.01.2017. Вид. офіц. Київ: Мінрегіонбуд України. 45 с.

32. Панасюк В. А., Вировой В. М., Сільченко С. В. Аналіз зміни властивостей мікроструктури бетону у часі. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2011. № 22. С.120-124.

33. Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л. В'язучі речовини: підручник. – Київ: Основа, 2012. 448 с.

34. ДСТУ-Н Б В.2.7-175:2008 Настанова щодо застосування хімічних добавок в бетонах і будівельних розчинах. Чинний від 01.04.2010. Вид. офіц. Київ.: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. 17с.

35. 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). Чинний від 01.02.2025. Вид. офіц. Київ : Технічний комітет стандартизації ТК 303 «Будівельні конструкції», 2025.

36. Yiwang Bao, Li Tian, Jianghong Gong. Pore Structure and Microstructure of Foam Concrete. *Testing and Evaluation of Inorganic Materials. Advanced Materials Research*. Vol. 177. 2010. P. 530–532.

37. Коробко О. О., Суханов В. Г., Вировой В. М., Пархоменко Р. В. Аналіз механізмів поетапної організації мікроструктури бетонів. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2013. Вип. 25. С. 76–83.

38. Ушеров-Маршак О. В., Кабусь О. В. Функціональна сумісність компонентів – фактор розвитку сучасного бетону (на прикладі добавок до бетону). *Наука та будівництво*. 2018. № 1. С. 27–33.

39. Васильєв О. С., Кулай В. П. Переваги використання дозаторів циклічної дії з об'ємним дозуванням для приготування будівельних розчинів розріджених інертними газами. *Perspectives of contemporary science: theory and practice* : матеріали IX Міжнародної наук.-практ. конф., м. Львів, 14-16 жовтня 2024 р. Львів, 2024. С. 334-336.

40. Gyawali, T.R. Mixing of High Ductile Mortar (HDM) in Concrete Mixers. *Journal of Engineering Technology and Planning*. 2019. 1. Р. 1–10. <https://doi.org/10.3126/joetp.v1i0.38238>.

41. Марущак У., Сидор Н., Маргаль І., Солтисік Р. Модифіковані фібробетони для промислових підлог. *8 Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд і будівель на залізничному транспорті»*. 2019. С. 164–166.

42. Меньлюк О. І., Бабій І. М., Бочорішвілі Г. Д., Бочевар К. І. Матеріали та технології ізоляційних робіт в будівництві : монографія. Одеса : ФОП Бондаренко М.О., 2020. 497 с.

43. Солодкий С. Й., Каганов В. О., Горніковська І. Б., Турба Ю. В. Дослідження тріщиностійкості важких бетонів та пінобетонів, армованих поліпропіленовою фіброю, для дорожнього будівництва. *Східно Європейський журнал передових технологій*. 2015. № 4/5 (76). С. 40–46.

44. Баженов Ю.М. Сучасна технологія бетону. *Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка*. 2010. №36. С. 10-17.

45. Омельчук В.П., Амеліна Н. О. Технологія виготовлення і застосування ніздрюватобетонних виробів і конструкцій: методичні вказівки до вивчення дисципліни. Київ : КНУБА, 2011. – 16 с.

46. Очеретний В. П., Ковальський В. П., Машницький М. П., Бондар А. В. Залежність теплотехнічних та фізико-механічних властивостей ніздрюватих бетонів від параметрів виготовлення. *Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві*. 2009. № 2. С. 34–39.

47. Ілів В. В., Котів М. В. Отримання пінобетонів з пониженим водопоглинанням та підвищеною водостійкістю. *Вісник Національного університету "Львів. політехніка"*. 2008. № 627. С. 112–115

48. Коробко О. О., Вировой В. М., Суханов В. Г., Закорчемний Ю. О. Стійкість бетонів при періодичних зовнішніх впливах. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2018. № 181. С. 65–74.

49. ДСТУ Н Б В.2.6-202:2015 Настанова з проектування та улаштування конструкцій будівель із застосуванням виробів із ніздрюватого бетону автоклавного тверднення. Чинний від 01.07.2016. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2016. 98с.

50. Ковальчук О. Ю., Бойко О. В., Зозулинець В. В. Технологія виготовлення і застосування ніздрюватих бетонів. Київ : КНУБА, 2021. 13 с.

51. ПП Будпостач URL: <https://pp-budpostach.com.ua/ua/a68957-proizvodstvo-primenenie-yacheistyh.html> (дата звернення 15.06.2025)

52. Аніщенко А. І., Бугрименко М. Ю., Каленіч Д. С., Блажко В. В., Ведмідь В. В. Комплексний підхід до виробництва та ущільнення бетонних блоків для модульного будівництва. *Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова*. 2025 №112. 179–187с. <https://doi.org/10.33042/2311-7257.2025.112.1.22>

53. Іванов А. М. Технологічні основи виготовлення типових деталей обладнання промисловості будівельних матеріалів: навч.-метод. посіб. Харків : ХНУБА, 2016. 98 с.

54. Балера М. Д. Механічне обладнання підприємств будівельної індустрії : навч.-метод. посіб. Харків : ХНУБА, 2016. 47 с.

55. Палій О.В. Екологічні аспекти утилізації відходів руйнувань в Україні: використання переробленого матеріалу для сталого будівництва. *Екологічні науки*. 2024. №1. Том 2. С. 84-88. DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.12>.

56. ДСТУ 3632-97 Устаткування для виготовлення виробів із ніздрюватого бетону автоклавного твердіння. Загальні технічні вимоги та методи контролю. Чинний від 01.07.1999. Вид. офіц. Київ : Державний проектно-конструкторський інститут по машинах для промисловості будівельних матеріалів, 1999. 13с.

57. ДСТУ 9184:2022 Вироби стінові з ніздрюватого бетону. Технічні умови. Чинний від 01.02.2023. Вид. офіц. Київ : Технічний комітет стандартизації ТК 305 «Будівельні вироби і матеріали», 2022. 36с.

58. Позняк О. Р., Мельник В. М., Завадський І. О., Мельник А. Я. Виробництво, властивості і застосування газобетону неавтоклавного твердіння. *Національний університет «Львівська політехніка»*. 2017. 6 с.

59. Палій О. В. Підвищення екологічної безпеки за рахунок впровадження рециклінгу відходів руйнації у виробництво бетону : дис. ... д-ра. філос. : Житомир, 2024. 256 с.

60. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л. Проектування складів бетонів : монографія. Рівне : НУВГП, 2015. 353с.

61. Md Azree, Othuman. Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*. 2012. Vol. 26. 638–654 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.067>.

62. Большаков В.І., Мартиненко В.О., Ястребцов В.В. Виробництво виробів із ніздрюватого бетону за різальною технологією. Дніпропетровськ : Пороги, 2003. 141 с.

63. Сердюк В. Р., Христич О. В., Лемішев М. С. Проблеми стабільності формування макроструктури ніздрюватих газобетонів безавтоклавного твердіння. *Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка*. 2011. № 40. 166–170 С.

64. Установка розчинозмішувальна з вертикальним шнеком: пат. 81413 Україна: В28С5/16. № u201301300; заявл. 04.04.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. 12/2013.

65. Вертикальний змішувач із шнековою стрічкою зі змінною твірною: пат. 99566 Україна: МПК В28С5/16. № u201414200; заявл. 31.12.2014; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 11/2015.

66. Обладнання для подачі фібр в бетонозмішувач: пат. 63171 Україна: МПК В28В1/52. № u201104121; заявл. 05.04.2011; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18/2011.

67. 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. P. 637–650 . <https://doi.org/10.1007/978-981-15-9678-055>.

68. Grivas Ukraine URL: <https://grivas.ua/gotovye-reshenija/dlya-gazobeton/linija-mini-gb> (дата звернення 25.06.2025)

69. Завод «СПЕЦМАШ» URL: <https://zavodspetsmash.com/ua/g83513836-penobetonnoe-polistirol-betonnoe> (дата звернення 25.06.2025)

70. FOAMROCK URL: <https://foamrock.eu/ua/p1621579951-kompleks-dlya-proizvodstva.html> (дата звернення 25.06.2025)

71. Васильєв О. С., Кулай В. П. Застосування сучасних комп'ютерних технологій для моделювання процесів змішування при приготуванні будівельних розчинів розріджених інертними газами. *Perspectives of contemporary science: theory and practice* : матеріали IV Міжнародної наук.-практ. конф., м. Львів 26-28 трав. 2024 р. Львів, 2024. С. 542–545.

72. Rudyk R. Salnikov R. Analysis of the mixer geometry and rheology impact on concrete mixture mixing efficiency. *Техніка будівництва*. 2024. Вип. 41. С. 77–84. Doi: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0409>.

73. Матвєєв К. Д., Лузан П. Г., Кісільов Р. В. Обґрунтування конструктивних параметрів і режимів роботи лопатевої мішалки. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2010. Вип. 40, ч. I. С. 173–178.

74. Білецький В. С., Міщук Ю. С., Жиленков О. О. Дослідження і модернізація мішалок для пульп із застосуванням SolidWorks. *Збагачення корисних копалин*. 2017. Вип. 68(109). С. 12-20.

75. Лопать бетонозмішувача: пат. 110452 Україна: МПК B01F7/04. № u201603592; заявл. 05.04.2016; опубл. 10.10.2016, Бюл. № 19/2016.

76. Мобільний гравітаційний бетонозмішувач примусової дії: пат. 156153 Україна: МПК B28C5/16. № u202305777; заявл. 30.11.2023; опубл. 15.05.2024, Бюл. № 20/2024.

77. Бетонозмішувач з пневмоподаванням суміші: пат. 50251 Україна: МПК B28C5/00. № u200913700; заявл. 28.12.2009; опубл. 25.05.2010, Бюл. № 10/2010.

78. Sana M. Ali, Priyanka V. Khante, Sagar S. Babade. Design And Fabrication Of Portable Concrete Mixture Machine. *Datta Meghe Institute of Engineering Technology Research Wardha*, 2018, no.2(4), P. 700–704.

79. Яготинський маханічний завод URL: <https://ymz.ua/uncategorized/> (дата звернення 12.07.2025).

80. Апарат для перемішування рідин: пат. 114428 Україна: МПК B01F7/16. № u201609054; заявл. 26.08.2016; опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5/2017.

81. Рамна мішалка: пат. 151897 Україна: МПК B01F27/00. № u202201214; заявл. 14.04.2022; опубл. 28.09.2022, Бюл. № 39/2022.

82. Яготинський маханічний завод URL: <https://ymz.ua/uncategorized/> (дата звернення 15.07.2025).

83. Федік Л. Ю., Гуменюк Л. О., Гуменюк П. О. Виробничі процеси і обладнання об'єктів автоматизації: навчальний посібник. Луцьк : Вежа-Друк, 2020. 287 с.

84. Яготинський маханічний завод URL: <https://ymz.ua/uncategorized/> (дата звернення 17.07.2025)

85. Турбінна мішалка: пат. 52307 Україна: МПК B01F7/16. № u201001070; заявл. 02.02.2010; опубл. 25.08.2010, Бюл. № 16/2010.

86. Турбінна мішалка закритого типу: пат. 135502 Україна: МПК B01F3/08. № u201811456; заявл. 22.11.2018; опубл. 10.07.2019, Бюл. № 13/2019.

87. Васильєв Є. А., Попов С. В. Оптимізація конструкції лопатей вертикального змішувача примусової дії. *«Техніка та технології в агропромисловому виробництві : матеріали Міжнародної наук.-практ. конф., м. Полтава 7-8 жовтня 2021 р. Полтава, 2021. С. 27–30.*

88. Василега П. О. Електропривод робочих машин: підручник. Суми : СумДУ, 2022. 290 с.

89. Свиридюк Д. Я. Аналіз та оцінка конструктивно – технологічних параметрів бетонозмішувачів. *Теорія і практика будівництва*. 2011. Вип. № 8. С. 11–14.

90. Popov S.V., Shpylka A.M., Gnitko. S.M. The research of mortar components mixing process. *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, no.3.2(7), P. 27–31.

91. Ручинський М. М., Свиридюк Д. Я. Дослідження коливань вібраційного бетонозмішувача з урахуванням впливу перемішуваного матеріалу. *Техніка будівництва*. 2013. Вип. № 31. С. 35–42.

92. Назаренко І. І. Клименко К. В. Оцінка енергетичного балансу та критеріїв робочого процесу системи "барабан змішувача-бетонна суміш". *Гірничі, будівельні, дорожні та меліоративні машини*. 2015. Вип. 85. С. 59–65.

93. Paloma L. Barros, Farhad Ein-Mozaffari, Ali Lohi Power Consumption Characterization of Energy-Efficient Aerated Coaxial Mixers Containing Yield-Stress Biopolymer Solutions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2022. Vol 61/Issue 34 P. 12813–12824. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c02008>.

94. Haipeng Yang, Guanguo Ma, Wei Zhao DEM-Based Simulation Study on the Operational Performance of a Single Horizontal Shaft Forced-Action Mixer. *Buildings*. 2025. 15, 2627. P. 1–24. <https://doi.org/10.3390/buildings15152627>.

95. Коробко, Б.О., Васильєв О.С., Рогозін І.А. Аналіз кінематики суміші в корпусі змішувача з вертикальним шнеком зі змінною твірною. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. Вип. 3/7 (75) С. 48–52.

96. Rohozin I. A., Vasyliiev O. S., Pavelieva. A. K. Determination of Building Mortar Mixers Effectiveness. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. no.3.2(7). P. 360–366. DOI: 10.14419/ijet.v7i3.2.14553.

97. Ващенко К. М. Обґрунтування параметрів і режимів роботи стрічкового змішувача гідроприводної штукатурної станції : дис. ... канд. техн. наук. Полтава, 2007. 244 с.

98. Рогозін І. А. Обґрунтування параметрів штукатурно-змішувальної установки з вертикальним шнеком : дис. ... канд. техн. наук. Полтава, 2019. 234 с.

99. Васильєв О. С., Кулай В. П. Спектр використання будівельних розчинів розріджених інертними газами. *Modern problems of science education and society* : матеріали VIII Міжнародної наук.-практ. конф., м. Київ, 9-11 жовтня 2023 р. Київ, 2023. С. 307–309.

100. Васильєв О. С., Кулай В. П. Змішувач для приготування пінобетонної суміші. *Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки* : матеріали VI Всеукр. наук.-техн. конф., м. Полтава 11 трав. 2023 р. Полтава, 2023. С. 63–65.

101. Сердюк Л. І. Теорія розмірностей, теорія подібності та математичне моделювання : посіб. для студ. та аспірантів. Полтава : ПолтНТУ. 2005. 154 с.

102. Краснянський М.Ю. Електрозбереження: навчальний посібник. Київ : Кондор, 2018. 136 с.

103. Васильєв О. С., Кулай В. П. Аналіз необхідної потужності для приведення в рух лопатей установки для приготування ніздрюватих бетонів. *Технічні науки та технології*. 2025. №3(41). С. 472–479.

104. Кулай В. П., Васильєв О. С. Установка для приготування ніздрюватих бетонів. *Молодіжна наука: інновації та глобальні виклики* : збірник тез II Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених м. Полтава 7 листопада. 2025 р. Полтава, 2025. С. 244–245.

105. Васильєв О. С., Кулай В. П. Універсальна мобільна установка для приготування ніздрюватих бетонів та результати випробування отриманих виробів. *Вісник Вінницького політехнічного університету*. 2025. №3. С. 26 – 30. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-180-3-26-30>

106. Нечаєв В. П., Берідзе Т. М., Кононенко В. В. Теорія планування експерименту. Київ : Кондор. 2005. 232 с.

107. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Житковський В. В. Розв'язання будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту. Рівне : НУВГП, 2011. 174 с.

108. Vasiliev O., Kulai V. Study of factors affecting the energy consumption of the mixing plant for the preparation of aerated concrete. *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2025. Vol. 1 (64). – P. 147 –152. <https://doi.org/10.26906/znp.2025.64.4147>

109. Васильєв О. С., Кулай В. П. Вплив геометричних параметрів робочого органу змішувача для приготування ніздрюватих бетонів на споживання електроенергії. *Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки* : матеріали VIII Всеукр. наук.-техн. конф., м. Полтава 24 квіт. 2025 р. Полтава, 2025. С. 77–79.

110. Кулай В. П., Васильєв О. С. Дослідження енерговитрат установки для приготування ніздрюватих бетонів в залежності від форми робочих органів. *Техніка будівництва*. 2025. №43. С. 15 –22.

<https://doi.org/10.32347/tb.2025-43.0602>

111. ДСТУ Б В.2.7-46:2010. Будівельні матеріали. Цементи загальнобудівельного призначення. Технічні умови. Чинний від 01.09.2011. Вид. офіц. Київ: ГП «Орган по сертификации цементов «СЕПРОЦЕМ». 14 с.

112. ДСТУ Б EN 197-1:2015. Склад, технічні умови та критерії відповідності для звичайних цементів. Чинний від 01.07.2016. Вид. офіц. Київ: ГП «Орган по сертификации цементов «СЕПРОЦЕМ». 36 с.

113. ДСТУ Б В.2.7-224-2009. Бетони правила контролю міцності. Бетон. Чинний від 01.09.2010. Вид. офіц. Київ : Державний НДІБК. 27 с.

114. ДСТУ Б В.2.7-220-2009. Б Будівельні матеріали. Визначення міцності механічними методами неруйнівного контролю. Чинний від 01.09.2010. Вид. офіц. Київ: Державний НДІБК. 27 с.

115. Дворкін Л. Й., Міцність бетону : навчальний посібник. Київ : Кондор, 2021. 310 с.

116. Дворкін Л. Й., Гоц В. І., Дворкін О. Л. Випробування бетонів і будівельних розчинів. Проектування їх складів. Київ : Основа. 2014. 304 с.

117. Vasiliev O. S., Kulai V.P. Test results of samples made by the installation for the preparation of aerated concrete. *Підвищення ефективності експлуатації, обслуговування і сервісу дорожньо-будівельних машин та обладнання : збірка наукових праць Всеукр. наук. конф., м. Харків, 13 лист. 2025 р. Харків, 2025. С. 128 –130.*

118. Кулай В. П. Аналіз ефективності роботи обладнання для виготовлення будівельних розчинів на основі контролю якісних показників вихідного продукту. *Вісник СНАУ. 2025. №1(59). С. 39–42.*

119. Яковенко А. М., Кулай В.П. Комплекс мобільного обладнання для проведення робіт на невеликих будівельних майданчиках. *Вісник ХНАДУ. 2025. №108. С. 54-60.*

120. Мобільна установка для приготування ніздрюватих бетонів: пат. 161192 Україна: МПК В28С5/16 (2006.01). №u202405600; заявл. 26.11.2024; опубл. 19.11.2025, Бюл. № 47/2025.

Додатки

Додаток А

Визначення функціональної залежності витрати електроенергії установки для
приготування ніздрюватих бетонів на основі трифакторного експерименту
другого порядку

Приймаючи до уваги попередні проведені дослідження і експериментальні випробування було визначено, що параметр який найкраще показує економічність установки для приготування ніздрюватих бетонів, є витрати електричної енергії P . Таким чином в ході проведення експериментів визначено параметри які найбільш впливають на економічність роботи установки для приготування ніздрюватих бетонів. Ними є: час перемішування матеріалу t , с; частота обертання робочого органу n , об/хв; рухливість суміші яка перемішується установкою $П$, см. При цьому були визначені інтервали варіювання, в межах яких спостерігається найменша витрати електричної енергії роботи установки для приготування ніздрюватих бетонів. Відповідні дані наведені у таблиці А.1.

Таблиця А.1 – Фактори які впливають на витрати електроенергії установки для приготування ніздрюватих бетонів та їх інтервали варіювання

№	Найменування	Позна-чення	Розмір-ність	Верхній рівень (+)	Нульовий рівень (0)	Нижній рівень (-)	Інтервал варіювання
X_1	Час перемішування	t	с	50	40	30	10
X_2	Частота обертання робочого органу	n	об/хв	620	465	310	155
X_3	Рухливість суміші	$П$	см	12	10	8	2

Використавши методи з планування експерименту [106, 107] для з'ясування як впливають вище зазначені параметри на ефективність роботи установки для приготування ніздрюватих бетонів, ставимо за завдання знайти функціональну залежність впливу між вище зазначеними параметрами на витрати електроенергії P , у вигляді:

$$P = f(t, n, П). \quad (A.1)$$

Щоб спростити записи та наступні розрахунки верхній рівень варіювання факторів позначаємо як – (+1), середній – (0), нижній – (-1).

Це дозволяє переводити значення факторів у нову кодову шкалу за формулою А.2:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}. \quad (\text{A.2})$$

де X_i – значення конкретного фактору в кодовій шкалі;

X_i – значення цього ж фактору в натуральній шкалі;

X_{i0} – основний рівень фактору;

ΔX_i – інтервал варіювання фактору.

Для досліджуваних умов, при впливі дії даних параметрів на енерговитрати установки для приготування ніздрюватих бетонів які відрізняється від лінійного, використовуємо план експерименту другого порядку. У ситуації, коли побудована модель, яку отримаємо, не буде відповідати проведенням дослідів, доведеться використовувати інші типи планів експерименту. При відображенні плану експерименту цифра 1 не записується й кодовий запис рівнів факторів має вигляд відповідно: «+», «0» та «-».

Дослід проводимо за планом який наведено в таблиці А.2. Зокрема, у першому дослідженні при визначенні раціонального часу впливу робочого органу на матеріал X_1 має значення «+» – 50 с., частота обертання робочого органу (лопатей) X_2 має значення «+» – 620 об/хв, рухливість суміші X_3 має значення «+» – 12 см.

Під час виконання експериментів згідно з вибраним планом доцільно рівномірно розміщувати повторення в центрі плану (нульовій точці, де всі фактори на основному рівні) по всій послідовності, дублюючи їх приблизно кожні 3–5 дослідів.

Обробку результатів дослідів проводимо методами математичної статистики, що дозволяє отримати алгебраїчне рівняння, яке відображає

зв'язок між енерговитратами $\hat{P}(\hat{y})$ установки для виробництва пористого бетону та вхідними факторами.

Таблиця А.2 – План проведення експериментів при числі параметрів, рівних 3

№ дослідів		Матриця планування (x_i)			Квадрати параметрів (x_i^2)			Взаємодія ($x_i x_j$)		
		x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$
N_1	1	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	2	—	+	+	+	+	+	—	—	+
	3	+	—	+	+	+	+	—	+	—
	4	—	—	+	+	+	+	+	—	—
	5	+	+	—	+	+	+	+	—	—
	6	—	+	—	+	+	+	—	+	—
	7	+	—	—	+	+	+	—	—	+
	8	—	—	—	+	+	+	+	+	+
N_α	9	+	0	0	+	0	0	0	0	0
	10	—	0	0	+	0	0	0	0	0
	11	0	+	0	0	+	0	0	0	0
	12	0	—	0	0	+	0	0	0	0
	13	0	0	+	0	0	+	0	0	0
	14	0	0	—	0	0	+	0	0	0
n_0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0

У загальному вигляді для трифакторного експерименту рівняння регресії має вигляд:

$$\hat{y}_i = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i x_j \quad (A.3)$$

$i \neq j$

де $i, j = 1, 2, \dots, k$ – порядкові номери факторів;

$\hat{y}$ – енерговитрати P , Вт;

$x_1, x_2, \dots, x_k$ – кодовані вихідні фактори;

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_{12}, b_{13}, \dots, b_{ij}, b_{ii}$ – коефіцієнти рівняння регресії.

Коефіцієнти рівняння обчислюють за такими формулами:

$$b_0 = 0,1831[0y] - 0,0704 \sum_1^k [iiy]; \quad (A.4)$$

$$b_i = 0,1[iy]; \quad (A.5)$$

$$b_{ii} = -0,0704[0y] + 0,5[iiy] - 0,1268 \sum_1^k [iiy]; \quad (A.6)$$

$$b_{ij} = 0,125[ijy]. \quad (A.7)$$

$$[0y] = \sum_1^N y_u; \quad (A.8)$$

$$[iiy] = \sum_1^N x_{iu}^2 y_u; \quad (A.9)$$

$$[iy] = \sum_1^N x_{iu} y_u; \quad (A.10)$$

$$[ijy] = \sum_1^N x_{iu} x_{ju} y_u; \quad (A.11)$$

де y_u – значення енерговитрат (потужності) змішувальної установки, Вт у u -тому досліді;

x_{iu} – значення i -того фактору в u -тому досліді;

x_{ju} – значення j -того фактору в u -тому досліді ($i \neq j$).

Результати експериментів та обчислені значення коефіцієнтів наведено в таблиці А.3.

Функціональна залежність, що описує вплив зазначених параметрів на енерговитрати установки для приготування ніздрюватих бетонів, має такий вигляд:

$$\begin{aligned} \hat{y}_i = & b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2 + \\ & + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 = 55,239 + 6,7 x_1 + 4,9 x_2 - 3,3 x_3 + 4,606 x_1^2 + \\ & + 2,66 x_2^2 - 1,394 x_3^2 - 0,125 x_1 x_2 + \\ & + 1,875 x_1 x_3 - 0,875 x_2 x_3 \end{aligned} \quad (A.12)$$

Після отримання рівняння регресії проводять перевірку значущості коефіцієнтів b_i (відмінності їх від нуля) та адекватності самого рівняння для опису досліджуваних залежностей.

Перевірка значущості коефіцієнтів b_i від нуля. На основі результатів дослідів у нульових (центральных) точках плану (№ 15–17 у таблиці А.2) розраховують:

а) середнє арифметичне значення

$$\bar{y}_0 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} y_{0u}}{n_0}, \quad (\text{A.13})$$

де y_{0u} – значення енерговитрат у нульовій точці в u -тому досліді;

n_0 – число дослідів у нульовій точці;

б) дисперсію у нульовій точці

$$S_{\bar{y}}^2 = S_0^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2}{n_0 - 1}; \quad (\text{A.14})$$

в) середньоквадратичне відхилення, що характеризує помилку експерименту:

$$S_{\bar{y}} = S_0 = \sqrt{S_0^2} = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2}{n_0 - 1}}; \quad (\text{A.15})$$

г) середню квадратичну похибку визначення коефіцієнтів обчислюють за відповідними формулами залежно від кількості факторів, для $k = 3$:

$$\begin{aligned} S^2 \{b_0\} &= 0,1831 S_{\bar{y}}^2 & S \{b_0\} &= 0,4279 S_{\bar{y}} \\ S^2 \{b_i\} &= 0,1 S_{\bar{y}}^2 & S \{b_i\} &= 0,3162 S_{\bar{y}} \\ S^2 \{b_{ii}\} &= 0,3732 S_{\bar{y}}^2 & S \{b_{ii}\} &= 0,6109 S_{\bar{y}} \\ S^2 \{b_{ij}\} &= 0,125 S_{\bar{y}}^2 & S \{b_{ij}\} &= 0,3536 S_{\bar{y}} \end{aligned} \quad (\text{A.16})$$

Таблиця А.3 – Результати експериментів та обчислені значення при обробці експериментальних даних

№	$P, \text{Вт}$	X_1	X_2	X_3	X_1^2	X_2^2	X_3^2	$X_1 \cdot X_2$	$X_1 \cdot X_3$	$X_2 \cdot X_3$
1	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70
2	56	-56	56	56	56	56	56	-56	-56	56
3	64	64	-64	64	64	64	64	-64	64	-64
4	42	-42	-42	42	42	42	42	42	-42	-42
5	78	78	78	-78	78	78	78	78	-78	-78
6	64	-64	64	-64	64	64	64	-64	64	-64
7	61	61	-61	-61	61	61	61	-61	-61	61
8	54	-54	-54	-54	54	54	54	54	54	54
9	65	65	0	0	65	0	0	0	0	0
10	55	-55	0	0	55	0	0	0	0	0
11	59	0	59	0	0	59	0	0	0	0
12	57	0	-57	0	0	57	0	0	0	0
13	50	0	0	50	0	0	50	0	0	0
14	58	0	0	-58	0	0	58	0	0	0
15	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	56	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Σ_x	998	67	49	-33	609	605	597	-1	15	-7
	55,239	6,700	4,900	-3,300	4,606	2,606	-1,394	-0,125	1,875	-0,875

Результати експериментальних розрахунків заносимо до таблиці А.4.

Таблиця А.4 – Результати перевірки значущості коефіцієнтів b_i (відмінності їх від нуля)

№ досліду	Енерговитрати P , y_{0u} (вихід)	$\bar{y}_0 - y_{0u}$	$(\bar{y}_0 - y_{0u})^2$
15	55	0	0
16	56	-1	1
17	54	1	1
$\bar{y}_0$	55	$\sum_1^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2$	2
		$S_{\bar{y}}^2 = S_0^2 = \frac{\sum_1^{n_0} (\bar{y}_0 - y_{0u})^2}{n_0 - 1}$	1
		$S_{\bar{y}}$	1

Обчислюємо похибки визначення коефіцієнтів за формулою (А.16):

$$\begin{aligned} S\{b_0\} &= 0,4279S_{\bar{y}} = 0,4279 \cdot 1 = 0,4279 \\ S\{b_i\} &= 0,3162S_{\bar{y}} = 0,3162 \cdot 1 = 0,3162 \\ S\{b_{ii}\} &= 0,6109S_{\bar{y}} = 0,6109 \cdot 1 = 0,6109 \\ S\{b_{ij}\} &= 0,3536S_{\bar{y}} = 0,3536 \cdot 1 = 0,3536 \end{aligned}$$

Розрахункове значення t_p – критерію Стюдента для кожного коефіцієнта визначаємо за формулою:

$$t_p = \frac{|b_i|}{S\{b_i\}}. \quad (\text{A.17})$$

Отримане значення t_p порівнюємо з табличним значенням t_m при відповідній кількості ступенів вільності $f_y = n_0 - 1$. У нашому випадку при $n_0 = 3$ кількість ступенів вільності становить $f_y = 2$. Тоді, згідно з таблицею А.5, для 5% рівня значущості табличне значення критерію Стюдента дорівнює $t_m = 4,3$.

Таблиця А.5 – Табличні значення критерію Стюдента t_m для 5% рівня значущості

Кількість ступенів вільності $f_y = n_0 - 1$	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
Критерій Стюдента t_m	4,30	3,18	2,78	2,57	2,45	2,31	2,23	2,18	2,15	2,12

Якщо $|t_p| < t_m$, то відповідний коефіцієнт вважається статистично незначущим (не відрізняється від нуля), і член рівняння, що йому відповідає, виключають. Результати порівняння наведено в таблиці А.6.

Таблиця А.6 – Порівняння розрахункових значень t_p з табличним значенням критерію Стюдента $t_m=4,3$ для оцінки значущості коефіцієнтів b_i (відмінності від нуля)

	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{23}
Значення коефіцієнтів в b_i	55,239	6,700	4,900	-3,300	4,606	2,606	-1,394	-0,125	1,875	-0,875
$S\{b_i\}$	0,4279	0,3162	0,3162	0,3162	0,6109	0,6109	0,6109	0,3536	0,3536	0,3536
$t_p = \frac{ b_i }{S\{b_i\}}$	129,09	21,2	15,5	-10,4	7,5	4,3	-2,3	-0,4	5,3	-2,5
Позначка про нульове значення	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Коефіцієнти при квадратичних членах не рекомендується виключати з рівняння навіть якщо вони статистично незначущі (тобто за умови $|t_p| < t_m$).

Отже, уточнене рівняння регресії зберігає вигляд, аналогічний до рівняння (А.12).

Перевірка адекватності отриманої функціональної залежності фактичним експериментальним даним.

Оцінку адекватності моделі проводимо шляхом обчислення критерію Фішера F_p та порівняння його з табличним значенням $[F_p]$. Рівняння вважається адекватним, якщо $F_p < [F_p]$.

Табличне значення критерію Фішера $[F_p]$ визначається з таблиці А.7 за формулами:

$$f_y = n_0 - 1; f_{ad} = N - m - (n_0 - 1),$$

де n_0 – кількість дослідів на нульовому рівні;

N – загальна кількість експериментів у плані (включаючи досліди в нульових точках);

m – кількість значимих коефіцієнтів у рівнянні регресії (А.14).

$$f_y = n_0 - 1 = 3 - 1 = 2; \quad f_{ad} = N - m - (n_0 - 1) = 17 - 10 - 2 = 5; \quad [F_p] = 19,3.$$

Таблиця А.7 – Значення критерію Фішера для 5% рівня значущості

f_y	Значення F -критерію при f_{ad}								
	1	2	3	4	5	6	12	24	∞
2	18,5	19,2	19,2	19,3	19,3	19,3	19,4	19,5	19,5
3	10,1	9,6	9,3	9,1	9	8,9	8,7	8,6	8,5
4	7,7	6,9	6,6	6,4	6,3	6,2	5,9	5,8	5,6
5	6,6	5,8	5,4	5,2	5,1	5	4,7	4,5	4,4

Розрахункове значення F_p -критерію Фішера визначаємо за формулою:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}, \quad (\text{A.18})$$

де S_{ad}^2 – дисперсія адекватності;

S_y^2 – дисперсія у нульовій точці. При триразових вимірах у нашому випадку $S_y^2 = 1$.

Дисперсію адекватності (остаточну дисперсію) обчислюємо за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_{u=1}^N \left(y_u - \hat{y}_u \right)^2}{N - m - (n_0 - 1)}, \quad (\text{A.19})$$

де y_u – експериментальне значення енерговитрат установки (потужності P , Вт) в u -му досліді (з таблиці А.3);

$\hat{y}_u$ – значення енерговитрат (потужності P , Вт), розраховане за уточненим рівнянням регресії в u -му (А.14);

N – загальна кількість дослідів у плані;

m – кількість значущих коефіцієнтів у рівнянні регресії (з урахуванням вільного члена b_0).

Для обчислення остаточної дисперсії S_{ad}^2 спочатку визначаємо за отриманою функціональною залежністю розрахункові значення енерговитрат установки (потужності P , Вт) для кожного рядка матриці плану (таблиця А.2).

Результати розрахунків узагальнюємо в таблиці А.8.

Таблиця А.8 – Результати оцінки адекватності математичної моделі експериментальним даним

№	Значення енерговитрат P		Абсолютне відхилення		Відносна похибка $\varepsilon = \frac{\Delta y}{y_u} 100\%$
	фактичні енерговитрати y_u	розрахункові енерговитрати $\hat{y}_u$	$\Delta y = y_u - \hat{y}_u$	Δy^2	
1	70	71,232400	1,232400	1,5188098	1,76
2	56	54,082400	1,917600	3,6771898	3,42
3	64	61,432400	2,567600	6,5925698	4,01
4	42	44,282400	-2,282400	5,2093498	-5,43
5	78	74,082400	3,917600	15,3475898	5,02
6	64	64,432400	-0,432400	0,1869698	-0,68
7	61	64,282400	-3,282400	10,7741498	-5,38
8	54	54,632400	-0,632400	0,3999298	-1,17
9	65	66,545400	-1,545400	2,3882612	-2,38
10	55	53,145400	1,854600	3,4395412	3,37
11	59	62,745400	-3,745400	14,0280212	-6,35
12	57	52,945400	4,054600	16,4397812	7,11
13	50	50,545400	-0,545400	0,2974612	-1,09
14	58	57,145400	0,854600	0,7303412	1,47
15	55	55,239400	-0,239400	0,0573124	-0,44
16	56	55,239400	0,760600	0,5785124	1,36
17	54	55,239400	-1,239400	1,5361124	-2,30
Сумарне значення $\sum_1^N \left(y_u - \hat{y}_u \right)^2$				83,201902120	—

Обчислюємо остаточну (адекватності) дисперсію:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_1^N \left(y_u - \hat{y}_u \right)^2}{N - m - (n_0 - 1)} = \frac{83,201902120}{5} = 16,6403804.$$

Розрахункове значення критерію Фішера:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_{\bar{y}}^2} = \frac{16,6403804}{1} = 16,6403804 < 19,3.$$

Оскільки розрахункове значення F_p -критерію менше за табличне (граничне), можна зробити висновок, що отримана на основі три-факторного експерименту функціональна залежність (А.12) адекватно описує вплив конструктивних і реологічних параметрів на енерговитрати (потужність P) установки для приготування ніздрюватих бетонів.

Додаток Б

Розрахунок економічного ефекту від упровадження установки для
приготування ніздрюватих бетонів УдПНД-100

Установка для приготування ніздрюватих бетонів УдПНД-100 призначена для приймання сировинних компонентів ніздрюватого бетону, змішування до отримання робочої суміші (однорідної консистенції). Обладнання застосовується в цивільному та промисловому будівництві безпосередньо на будівельному майданчику як для виробництва стінових блоків із ніздрюватого бетону, так і під час монтажних робіт із формування підлогових основ.

На відміну від аналога FCM 5, установка для приготування ніздрюватих бетонів УдПНД-100 характеризується низкою конструктивно-експлуатаційних особливостей та елементів новизни:

- наявністю додаткових лопаток, установлених на бічних стінках внутрішньої поверхні змішувального контейнера, які забезпечують спрямований рух матеріалу як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах під час процесу змішування; це сприяє інтенсифікації конвективного перемішування за рахунок додаткового підймання та падіння суміші, що суттєво підвищує однорідність і якість отриманої робочої суміші порівняно з перемішуванням лише основним робочим органом;

- герметично зачиненим змішувальним контейнером з кришкою, оснащеною штуцером для подачі стиснутого повітря. Використання стиснутого повітря під час розвантаження через вивантажувальний жолоб мінімізує залишкову кількість суміші на дні контейнера;

- змінним робочим органом, підбір якого здійснено на основі експериментальних досліджень. Така конструкція забезпечує зниження енергоспоживання та рівня вібрації під час експлуатації, а також допускає швидку та просту заміну робочого органу за необхідності;

- високою універсальністю експлуатації, оскільки конструктивне виконання установки дозволяє використовувати її для приготування різних видів ніздрюватих бетонів, зокрема газобетону та пінобетону, а також звичайних бетонних сумішей із дрібним заповнювачем.

Б.1 Вихідні дані для розрахунку

Основні показники базової техніки (аналога FCM 5) [70] та розробленої установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНД-100, які є вихідними даними для розрахунку економічної ефективності, приведені у таблиці Б.1.

Таблиця Б.1 – Основні вихідні дані для розрахунку економічної ефективності

№	Найменування показника	Позначення	Змішувач FCM-5	Установка для приготування ніздрюватих бетонів УдПНД-100
1	Виробник	-	ФОП Коновалов Д.С.	Власне виготовлення
2	Маса, кг	G	110	90
3	Встановлена потужність електрообладнання, кВт	N	2.2	2,2
4	Виробнича продуктивність, м ³ /год для виготовлення ніздрюватого бетону D600 - D700	B	0,5	0,5
5	Кількість обслуговуючого персоналу, чол.	B	1-2	1-2
6	Розряд обслуговуючого персоналу	-	IV	IV
7	Термін служби до списання, років	$T_{сл}$	10	10
8	Ресурс до капітального ремонту, год	T_{ψ}	2000	2200
9	Оптова ціна, грн.	Π	110000	
10	Тривалість, днів, перебування техніки у поточному ремонті	d_{mp}	2,5	2

Продовження таблиці Б.1

№	Найменування показника	Позначення	Змішувач FCM-5	Установка для приготування ніздрюватих бетонів УДПНД-100
11	Тривалість перебування техніки в технічному обслуговуванні, днів	$d_{то}$	0,3	0,3
12	Кількість поточних ремонтів за міжремонтний цикл	a_{mp}	2	2
13	Кількість технічних обслуговувань за міжремонтний цикл	$a_{то}$	20	20
14	Трудовісткість капітального ремонту, люд.-год.	$r_{кр}$	20	20
15	Трудовісткість Поточного ремонту, люд.-год	r_{mp}	16	16
16	Трудовісткість технічного обслуговування, люд. • год	$r_{то}$	4	4
17	Коефіцієнт використання двигунів у часі	$k_{дв}$	0,6	0,6
18	Коефіцієнт використання двигуна по потужності	$k_{дт}$	0,55	0,5
19	Коефіцієнт, що враховує простоювання у роботі техніки, не враховане у годинній експлуатаційній продуктивності	k_{np}	0,82	0,82

Продовження таблиці Б.1

№	Найменування показника	Позначення	Змішувач FCM-5	Установка для приготування ніздрюватих бетонів УДПНД-100
20	Коефіцієнт переходу від технічної продуктивності до експлуатаційної	k_m	0,7	0,7
21	Коефіцієнт, що враховує накладні витрати на інші витрати	k_{nn}	1,1	1,1
22	Коефіцієнт, що враховує накладні витрати на заробітну плату	k_{nv}	1,3	1,3
23	Коефіцієнт, що враховує премії	k_{np}	1,25	1,25
24	Коефіцієнт, що враховує витрати на доставку техніки і монтаж	K_B	1,12	1,12
25	Коефіцієнт, що враховує змінність роботи техніки	k_{zm}	1,0	1,0
26	Коефіцієнт використання матеріалів	k_M	0,7	0,7
27	Квартальна норма амортизаційних відрахувань, %	H_{AM}	6	6
28	Тривалість зміни, год	t_{3M}	8	8
29	Тривалість перебезування , днів	d_n	1	1
30	Середній час роботи машини на одному об'єкті, год	T_{OB}	420	420

Продовження таблиці Б.1

№	Найменування показника	Позначення	Змішувач FCM-5	Установка для приготування ніздрюватих бетонів УдПНД-100
31	Тариф за 10 кВт-год електроенергії, грн.	C_{EL}	69	69
32	Вартість мастильних та допоміжних матеріалів на 10 кВт-год витраченої енергії, грн	v	6,5	6,5

Б.2 Розрахунок капітальних вкладень у нову техніку

Порівнювані змішувачі FCM-5 та УдПНД-100 належать за функціональним призначенням до класу будівельних машин, призначених для змішування компонентів розчинових і бетонних сумішей. Розрахунок оптової ціни розробленої установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНД - 100 виконано методом коригування собівартості базової техніки. Як базовий аналог прийнято серійний змішувач FCM-5.

Оптова ціна C_O , грн., визначається за формулою:

$$C_O = C \cdot (1 + P_C), \quad (\text{Б.1})$$

де C – собівартість змішувальної установки, грн.;

P_C – норматив рентабельності у частках собівартості. У даному розрахунку приймаємо $P_C = 0,30$.

На стадії ескізного проекту собівартість нової техніки C , грн., оцінюється за питомими показниками на одиницю конструктивної маси серійного змішувача-аналога з близькими основними техніко-експлуатаційними параметрами за формулою:

$$C = C_H^A \frac{G^H}{G^B}, \quad (\text{Б.2})$$

де C_H^A – скоригована собівартість аналогічної техніки для розрахунку ціни нової техніки;

G^H – конструктивна маса нової техніки, 0,09 т;

G^B – конструктивна маса аналогічної техніки, 0,11 т.

Коригування собівартості базової техніки (аналога) для визначення собівартості нової техніки здійснюється за формулою:

$$C_H^A = C_C^A \frac{C_{\Pi}'}{C_{\Pi}'' \cdot f_{\Pi}}, \quad (\text{Б.3})$$

де C_C^A – собівартість базової техніки, грн.

C_{Π}' – коефіцієнт зміни собівартості при переході від серійності звітнього року до серійності, що відповідає одиниці приведення, $C_{\Pi}' = 1,08$;

C_{Π}'' – коефіцієнт зміни собівартості при переході від серійності, що відповідає одиниці приведення до планової серійності випуску нової техніки в розрахунковому році, $C_{\Pi}'' = 1,0$;

f_{Π} – коефіцієнт зміни собівартості аналогічної техніки, що відповідає порядковому номеру розрахункового року, $f_{\Pi} = 1,0$.

Ураховуючи вищенаведені залежності, отримаємо:

1. Скориговану собівартість:

$$C_C^A = \frac{78630}{1,0 + 0,3} = 60485 \text{ грн.};$$

$$C_H^A = 60485 \frac{1,08}{1,0 \cdot 1,0} = 65324 \text{ грн.}$$

2. Собівартість нової техніки:

$$C = 65324 \times \frac{0,09}{0,11} = 53566 \text{ грн.}$$

3. Оптову ціну нової техніки:

$$C_O^B = 53566 \cdot (1 + 0,3) = 69636 \text{ грн.}$$

Розрахунково-балансова вартість $\Pi_{\text{б}}$, грн., установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНД-100 визначається за формулою:

$$\Pi_{\text{б}} = k_{\text{б}} \cdot \Pi_{\text{о}}, \quad (\text{Б.4})$$

де $k_{\text{б}}$ – коефіцієнт переходу від оптової ціни до розрахунково-балансової вартості, що враховує витрати на доставку техніки і монтаж ($k_{\text{б}}=1,12$).

Розрахунково-балансова вартість базової техніки становить:

$$\Pi_{\text{б}}^{\text{б}} = 1,12 \cdot 110000 = 123200 \text{ грн.};$$

Розрахунково-балансова вартість нової техніки становить:

$$\Pi_{\text{б}}^{\text{н}} = 1,12 \cdot 69636 = 77992 \text{ грн.}$$

За результатами попередніх розрахунків на стадії ескізного проекту розрахунково-балансові вартості установок, а отже, і капітальні вкладення в них становлять:

$$K_{\text{б}} = \Pi_{\text{б}}^{\text{б}} = 123200 \text{ грн.};$$

$$K_{\text{н}} = \Pi_{\text{б}}^{\text{н}} = 77992 \text{ грн.}$$

Б.3 Розрахунок річного фонду роботи установки для приготування ніздрюватих бетонів

Розрахунок річного фонду часу установки $T_{\text{р}}$, год, проводимо за формулою:

$$T_{\text{р}} = \frac{T_{\text{ф}}}{\frac{1}{t_{\text{зм}} \cdot k_{\text{зм}}} + D_{\text{р}} + \frac{d_{\text{п}}}{T_{\text{об}}}}, \quad (\text{Б.5})$$

де $T_{\text{ф}}$ – річний фонд робочого часу;

$t_{\text{зм}}$ – тривалість робочої зміни (для п'ятиденного робочого тижня $t_{\text{зм}} = 8$ год);

$k_{\text{зм}}$ – коефіцієнт змінності роботи змішувальної установки, $k_{\text{зм}} = 1,0$;

D_P – простої в машино-днях у всіх видах технічного обслуговування та ремонту, що припадають на одну машино-годину роботи;

d_{II} – тривалість одного перебазування, $d_{II} = 1$ день;

T_{OB} – тривалість роботи змішувальної установки на одному об'єкті,
 $T_{OB} = 420$ год.

$$D_P = \frac{\sum_{i=1}^m (d_{Pi} + d_{Ni}) \cdot a_i}{T_{II}}, \quad (Б.6)$$

де m – число різновидів технічних обслуговувань та ремонтів протягом міжремонтного циклу, (КР, ПР, ТО);

d_{Pi} – тривалість перебування у ремонті або технічному обслуговуванні:

базової техніки: $d_{Pi}^{KP} = 4$ днів; $d_{Pi}^{PP} = 2,5$ днів; $d_{Pi}^{TO} = 0,3$;

нової техніки: $d_{Pi}^{KP} = 3,5$ днів; $d_{Pi}^{PP} = 2$ днів; $d_{Pi}^{TO} = 0,3$;

d_{Ni} – тривалість очікування ремонтів ($d_{Ni}^{KP} = 20$ день; $d_{Ni}^{PP} = 10$ днів; $d_{Ni}^{TO} = 1$ день);

a_i – кількість i -тих ремонтів або технічних обслуговувань за міжремонтний цикл (базової техніки: $a_i^{TO} = 20$; $a_i^{PP} = 2$; $a_i^{KP} = 1$);

T_{II} – час міжремонтного циклу, $T_{II}^B = 2000$ год; $T_{II}^H = 2200$ год.

Тоді маємо для базової техніки, отримаємо:

1. Простої:

$$D_P^B = \frac{(4 + 20) \cdot 1 + (2,5 + 10) \cdot 2 + (0,3 + 1) \cdot 20}{2000} = 0,0375 \frac{\text{маш.} - \text{дн.}}{\text{маш.} - \text{год.}}$$

2. Річний фонд часу:

$$T_P^B = \frac{365 - 110}{\frac{1}{8 \cdot 1} + 0,0375 + \frac{1}{420}} = 1547 \text{ год.}$$

Для нової техніки, отримаємо:

1. Простої:

$$D_p^H = \frac{(3,5 + 20) \cdot 1 + (2 + 10) \cdot 2 + (0,3 + 1) \cdot 20}{2000} = 0,033 \frac{\text{маш.} - \text{дн.}}{\text{маш.} - \text{год.}}$$

$$T_p^H = \frac{365 - 110}{\frac{1}{8 \cdot 1} + 0,033 + \frac{1}{420}} = 1594 \text{ год.}$$

Б.4 Визначення річної експлуатаційної продуктивності

Річну експлуатаційну продуктивність, B , м³/рік, визначаємо за формулою

$$B = b_{EG} \cdot T_p \cdot k_{PP}, \quad (\text{Б.7})$$

де b_{EG} – годинна експлуатаційна продуктивність змішувальної установки, м³/год;

k_{PP} – коефіцієнт, що враховує простої, не відображені в годинній експлуатаційній продуктивності, $k_{PP} = 0,82$.

Годинна експлуатаційна продуктивність, b_{EG} , м³/рік, обчислюється за формулою:

$$b_{EG} = b_{TG} \cdot k_T, \quad (\text{Б.8})$$

де b_{TG} – годинна технічна продуктивність, 0,6 м³/год;

k_T – коефіцієнт переходу від технічної до експлуатаційної продуктивності, $k_T = 0,7$.

Для базової техніки (FCM-5):

$$b_{EG} = 0,5 \cdot 0,7 = 0,35 \text{ м}^3/\text{год};$$

Для нової техніки (УдПНД-100):

$$b_{EG} = 0,5 \cdot 0,7 = 0,35 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Річна експлуатаційна продуктивність базової та нової техніки становить відповідно:

$$B_B = 0,35 \cdot 1547 \cdot 0,82 = 444 \text{ м}^3/\text{рік};$$

$$B_H = 0,35 \cdot 1594 \cdot 0,82 = 456 \text{ м}^3/\text{рік.}$$

Б.5 Розрахунок річних поточних витрат у процесі експлуатації

Витрати на заробітну плату оператора змішувальної установки з нарахуваннями, S грн./рік, визначається за формулою:

$$S = k_{HB} \cdot k_{ПР} \cdot T_P \cdot C_{Ti} (1 + H), \quad (Б.9)$$

де k_{HB} – коефіцієнт, що враховує накладні витрати на заробітну плату, $k_{HB} = 1,3$;

$k_{ПР}$ – коефіцієнт, що враховує премії, $k_{ПР} = 1,25$;

C_{Ti} – годинна тарифна ставка робітника IV розряду, $C_{Ti} = 68,85$ грн.;

H – норма нарахувань на заробітну плату, $H = 0,3857$.

Витрати на заробітну плату для базової і нової техніки:

$$S_{3П}^B = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1547 \cdot 68,85 (1 + 0,3857) = 239837 \text{ грн.};$$

$$S_{3П}^H = 1,3 \cdot 1,25 \cdot 1594 \cdot 68,85 (1 + 0,3857) = 247124 \text{ грн.}$$

Річні амортизаційні відрахування на реновацію установки для приготування ніздрюватих бетонів S_{AM} , грн.:

$$S_{AM} = S_{AM}^{Iкв} + S_{AM}^{IIкв} + S_{AM}^{IIIкв} + S_{AM}^{IVкв}, \quad (Б.10)$$

де $S_{AM}^{Iкв}; S_{AM}^{IIкв}; S_{AM}^{IIIкв}; S_{AM}^{IVкв}$ – сума амортизаційних відрахувань відповідно за перший, другий, третій та четвертий квартали розрахункового року:

$$S_{AM}^{iкв} = \frac{B_{iкв} \cdot H_{AM}^{KB}}{100}, \quad (Б.11)$$

де $B_{(i-1)KB}$ – балансова вартість установки для приготування ніздрюватих бетонів на початок i -того розрахункового кварталу, грн.;

H_{AM}^{KB} – квартальна норма амортизаційних відрахувань, $H_{AM}^{KB} = 6\%$;

$$B_{iKB} = B_{(i-1)KB} - S_{AM}^{(i-1)KB}, \quad (Б.12)$$

де $B_{(i-1)KB}$ – балансова вартість установки для приготування ніздрюватих бетонів на початок попереднього розрахункового кварталу, грн.;

$S_{AM}^{(i-1)KB}$ — сума амортизаційних відрахувань за попередній розрахунковий квартал, грн.

Амортизаційні відрахування за кварталами для базової техніки становлять:

$$S_{AM}^{Iкв} = 123200 \cdot 0,06 = 7392 \text{ грн.};$$

$$S_{AM}^{IIкв} = (123200 - 7392) \cdot 0,06 = 6949 \text{ грн.};$$

$$S_{AM}^{IIIкв} = (123200 - 7392 - 6949) \cdot 0,06 = 6532 \text{ грн.};$$

$$S_{AM}^{IVкв} = (123200 - 7392 - 6949 - 6532) \cdot 0,06 = 6140 \text{ грн.};$$

Тоді річні амортизаційні відрахування базової техніки S_{AM} , грн., будуть становити:

$$S_{AM}^B = 7392 + 6949 + 6532 + 6140 = 27013 \text{ грн.}$$

Амортизаційні відрахування за кварталами для нової техніки становлять:

$$S_{AM}^{Iкв} = 77992 \cdot 0,06 = 4680 \text{ грн.};$$

$$S_{AM}^{IIкв} = (77992 - 4680) \cdot 0,06 = 4399 \text{ грн.};$$

$$S_{AM}^{IIIкв} = (77992 - 4680 - 4399) \cdot 0,06 = 4135 \text{ грн.};$$

$$S_{AM}^{IVкв} = (77992 - 4680 - 4399 - 4135) \cdot 0,06 = 3887 \text{ грн.}$$

Річні амортизаційні відрахування нової техніки становитимуть:

$$S_{AM}^H = 4680 + 4399 + 4135 + 3887 = 17101 \text{ грн.}$$

Витрати на утримання та експлуатацію установки для приготування ніздрюватих бетонів S_E включають:

- витрати на капітальний ремонт S_{KP} ;
- витрати на технічне обслуговування й поточні ремонти S_{TO} ;
- витрати на силову енергію S_{EL} ;
- витрати на мастильні матеріали S_{MM} .

За відсутності даних про ціни на капітальний ремонт витрати на капітальний ремонт S_{KP} , грн./рік, можна визначити за формулою:

$$S_{KP} = \frac{k_{HP} \cdot A_{KP} \cdot \Pi_B}{100}, \quad (\text{Б.13})$$

де A_{KP} – норма амортизаційних відрахувань на капітальний ремонт у відсотках від балансової вартості, $A_{KP} = 5\%$;

k_{HP} – коефіцієнт, що враховує накладні витрати за всіма видами витрат, окрім заробітної плати, $k_{HP} = 1,1$;

Витрати на капітальний ремонт базової та нової техніки відповідно:

$$S_{KP}^B = \frac{1,1 \cdot 5 \cdot 123200}{100} = 6776 \text{ грн./рік};$$

$$S_{KP}^H = \frac{1,1 \cdot 5 \cdot 77992}{100} = 4290 \text{ грн./рік}.$$

Витрати на технічне обслуговування та поточні ремонти S_{mo} , знаходимо:

$$S_{TO} = S_{TOB} + S_{ТОМ}, \quad (\text{Б.14})$$

де $S_{тов}$ – витрати на заробітну плату ремонтних робітників із нарахуваннями, грн/рік;

$S_{том}$ – витрати на матеріали та запчастини, грн/рік.

$$S_{TOB} = \frac{T_P}{T_{II}} k_{HB} \cdot k_{PP} \cdot C_P \sum_{i=1}^n a_i r_i (1 + H), \quad (\text{Б.15})$$

де C_P – середня годинна тарифна ставка робітника, що обслуговує установку для приготування ніздрюватих бетонів, для IV розряду = 68,85 грн.;

a_i – кількість ТО та ПР у ремонтному циклі;

r_i – трудомісткість i -го технічного обслуговування і поточного ремонту, нормо-год.

$$S_{TOB}^B = \frac{1547}{2000} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 68,85 \cdot [1 \cdot 70 \cdot (1 + 0,3857) + 2 \cdot 16 \cdot (1 + 0,3857) + 20 \cdot 4 \cdot (1 + 0,3857)] = 21825 \text{ грн./рік};$$

$$S_{TOB}^H = \frac{1594}{2200} \cdot 1,3 \cdot 1,25 \cdot 68,85 \cdot [1 \cdot 70 \cdot (1 + 0,3857) + 2 \cdot 16 \cdot (1 + 0,3857) + 25 \cdot 4 \cdot (1 + 0,3857)] = 20443 \text{ грн./рік.}$$

$$S_{TO} = k_{HP} \frac{S_{TOB}(1-H)}{k_{HB}} k_{EP}, \quad (\text{Б.16})$$

де k_{EP} – коефіцієнт переходу від витрат на заробітну плату до витрат на матеріали та запчастини (на даному етапі розрахунків приймаємо $k_{EP} = 1,25$).

$$S_{ТОМ}^B = 1,1 \frac{21185 \cdot (1 - 0,3857)}{1,3} \cdot 1,25 = 13765 \text{ грн/рік.};$$

$$S_{ТОМ}^H = 1,1 \frac{20433 \cdot (1 - 0,3857)}{1,3} \cdot 1,25 = 13276 \text{ грн/рік.}$$

Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт становлять:

$$S_{TO}^B = 21825 + 13765 = 35590 \text{ грн/рік.};$$

$$S_{TO}^H = 20443 + 13276 = 33709 \text{ грн/рік.}$$

Витрати на електроенергію S_{EL} , грн/рік, визначають за формулою:

$$S_{EL} = 0,1 \cdot k_{HP} \cdot W_{EL} \cdot C_{EL} \cdot T_P, \quad (\text{Б.17})$$

де C_{EL} – вартість 10 кВт-год, електроенергії, $C_{EL} = 69$ грн.;

W_{EL} – годинна витрата електроенергії, кВт/год.

$$W_{EL} = N_{EL} \cdot k_C, \quad (\text{Б.18})$$

де N_{EL} – встановлена потужність двигунів змішувальної установки;

k_C – коефіцієнт використання електродвигунів, $k_C = k_{ДВ} \cdot k_{ДТ}$.

Базова техніка:

$$W_{EL}^B = 2,2 \cdot 0,6 \cdot 0,55 = 0,72 \text{ кВт/год};$$

$$S_{EL}^B = 0,1 \cdot 1,1 \cdot 0,72 \cdot 69 \cdot 1547 = 8454 \text{ грн/рік.}$$

Нова техніка:

$$W_{EL}^H = 2,2 \cdot 0,6 \cdot 0,5 = 0,66 \text{ кВт/год};$$

$$S_{EL}^H = 0,1 \cdot 1,1 \cdot 0,66 \cdot 69 \cdot 1594 = 7985 \text{ грн/рік.}$$

Витрати на мастильні матеріали S_{MM} , грн./рік, визначають за формулою:

$$S_{MM} = 0,1 \cdot v \cdot W_{EL} \cdot T_p, \quad (Б.19)$$

де v – вартість мастильних та допоміжних матеріалів на 10 кВт·год. витраченої енергії, $v = 6,5$ грн.

$$S_{MM}^B = 0,1 \cdot 6,5 \cdot 0,72 \cdot 1547 = 724 \text{ грн.};$$

$$S_{MM}^H = 0,1 \cdot 6,5 \cdot 0,66 \cdot 1594 = 684 \text{ грн.}$$

Результати розрахунку річних витрат наводимо у вигляді таблиці Б.2

Таблиця Б.2 – Поточні річні витрати базової та нової установки

№	Найменування статей витрат	Позначення	Змішувач FCM-5			Установка для приготування ніздрюватих бетонів УдПНД-100		
			Сума витрат, грн.	Структура витрат, %		Сума витрат, грн.	Структура витрат	
				Загалом	у т.ч. S_E		загалом	у т.ч. S_E
1	Заробітна плата	$S_{ЗП}$	239837	75,34	-	247124	79,50	-
2	Амортизаційні відрахування на реновацію техніки	S_{AM}	27013	8,48	-	17101	5,50	-
3	Експлуатаційні витрати, в тому числі:	S_E	51484	16,18	100	46668	15,00	100
3.1	Витрати на капітальний ремонт	$S_{КР}$	6776	2,13	13,16	4290	1,38	9,19
3.2	Витрати на ТО і ПР	$S_{ТО}$	35590	11,19	69,12	33709	10,84	72,20
3.3	Витрати на електроенергію	S_{EL}	8454	2,66	16,42	7985	2,57	17,11
3.4	Витрати на мастильні матеріали	S_{MM}	724	0,21	1,29	684	0,22	1,47
	Разом	S	318394	100	-	310893	100	-

Б.6 Розрахунок питомих показників, які характеризують роботу установки для приготування ніздрюватих бетонів

Вартість однієї машино-години роботи установки для приготування ніздрюватих бетонів, S_{M-r} , грн./год, визначаємо за формулою:

$$S_{M-r} = \frac{S}{T_p}, \quad (\text{Б.20})$$

де S – загальні річні поточні витрати.

$$S_{M-r}^B = \frac{318394}{1547} = 205,81 \text{ грн/год.};$$

$$S_{M-r}^H = \frac{310893}{1594} = 195,04 \text{ грн/год.}$$

Питома трудомісткість одиниці продукції r_y , нормо-год/м³, обчислюємо за формулою:

$$r_y = \frac{T_p \left(B + \frac{r_p}{T_{II}} \right) + n_{II} \cdot r_{II}}{B}, \quad (\text{Б.21})$$

де T_p – річний фонд часу установки для приготування ніздрюватих бетонів;

B – кількість обслуговуючого персоналу;

B – річна експлуатаційна продуктивність;

r_p – сумарна трудомісткість усіх видів ремонтів та технічних обслуговувань за міжремонтний цикл, нормо-год.;

$$r_p = \sum_{i=1}^m a_i r_i, \quad (\text{Б.22})$$

$$r_p^B = 1 \cdot 70 + 2 \cdot 16 + 20 \cdot 4 = 182 \text{ нормо-год.};$$

$$r_p^H = 1 \cdot 70 + 2 \cdot 16 + 20 \cdot 4 = 182 \text{ нормо-год.};$$

де n_{II} – кількість перебазувань на рік, од.

$$n_{II} = \frac{T_p}{T_{OB}}, \quad (\text{Б.23})$$

де T_{OB} – тривалість безперервної роботи на одному об'єкті, $T_{OB} = 420$ год.

$$n_{PB}^B = \frac{1547}{420} = 3,68 \approx 4;$$

$$n_{PB}^B = \frac{1594}{420} = 3,8 \approx 4.$$

r_n – трудомісткість перевезення, нормо-год., визначається за формулою:

$$r_{II} = d_n \cdot t_{зм} \cdot k_{зм}, \quad (Б.24)$$

де d_n – тривалість одного перебазування;

$t_{зм}$ – тривалість робочої зміни, год. (для п'ятиденного робочого тижня $t_{зм} = 8$ год);

$k_{зм}$ – коефіцієнт змінності роботи установки.

$$r_{II} = 1 \cdot 8 \cdot 1 = 8 \text{ год.}$$

Питома трудомісткість :

$$r_y^B = \frac{1547 \left(1 + \frac{182}{2000} \right) + 4 \cdot 8}{444} = 3,873 \text{ нормо-год/м}^3;$$

$$r_y^H = \frac{1594 \left(1 + \frac{182}{2200} \right) + 4 \cdot 8}{456} = 3,855 \text{ нормо-год/м}^3.$$

Питома матеріаломісткість g_y , кг/м³, визначається за формулою

$$g_y = \frac{G + G_{PEM}}{T_{CL} \cdot B \cdot k_M}, \quad (Б.25)$$

де G – маса установки для приготування ніздрюватих бетонів;

G_{PEM} – сумарні витрати матеріалів, запчастин та комплектуючих виробів, $G_{PEM} = 0,25G$;

B – річна експлуатаційна продуктивність;

k_M – коефіцієнт використання матеріалів.

$$g_y^B = \frac{110 + 0,25 \cdot 110}{10 \cdot 444 \cdot 0,7} = 0,044 \text{ кг/м}^3;$$

$$g_y^H = \frac{90 + 0,25 \cdot 90}{10 \cdot 456 \cdot 0,7} = 0,035 \text{ кг/м}^3;$$

Питома енергоємність ε_y , кВт·год/м³, обчислюємо за формулою:

$$\varepsilon_y = \frac{W_{EL} \cdot T_P}{B}, \quad (\text{Б.26})$$

де W_{EL} – годинна витрата електроенергії;

T_P – річний фонд часу роботи установки;

B – річна експлуатаційна продуктивність.

$$\varepsilon_y^B = \frac{0,72 \cdot 1547}{444} = 2,509 \text{ кВт/м}^3;$$

$$\varepsilon_y^H = \frac{0,66 \cdot 1594}{456} = 2,307 \text{ кВт/м}^3.$$

Питомі приведені витрати Z_y , грн./м³, розраховує за формулою

$$Z_y = \frac{Z}{B} = \frac{S + E_H \cdot K}{B}, \quad (\text{Б.27})$$

де Z – річні приведені витрати, грн.;

S – річні поточні витрати;

E_H – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних укладень у нову техніку, приймаємо $E_H = 0,15$;

K – капітальні вкладення в нову техніку;

B – річна експлуатаційна продуктивність.

$$Z_y^B = \frac{318394 + 0,15 \cdot 123200}{444} = 758,73 \text{ грн./м}^3;$$

$$Z_y^H = \frac{310893 + 0,15 \cdot 77992}{456} = 707,44 \text{ грн./м}^3.$$

Б.7 Визначення економічної ефективності створення установки для приготування ніздрюватих бетонів

Розрахунок річного економічного ефекту E_p , грн., обчислюють за формулою:

$$E_p = (Z_y^B - Z_y^H) \cdot B, \quad (\text{Б.28})$$

$$E_p = (758,73 - 707,44) \cdot 456 = 24756 \text{ грн.}$$

Річна економія витрат праці на рік R , чол/рік, становить:

$$R = \frac{(r_y^B - r_y^H) \cdot B}{T_{\text{роб}}}, \quad (\text{Б.29})$$

де $T_{\text{роб}}$ – річний фонд часу одного виробничого робітника, $T_{\text{роб}}=1900$ год;

$$R = \frac{(3,873 - 3,855) \cdot 456}{1900} = 0,004 \text{ чол/рік.}$$

Річна економія витрат матеріалів M , кг/рік, становить:

$$M = (g_y^B - g_y^H) \cdot B, \quad (\text{Б.30})$$

$$M = (0,044 - 0,035) \cdot 456 = 4,1 \text{ кг/рік.}$$

Річна економія витрат на електроенергію ε , кВт·год/рік, становить:

$$\varepsilon = (\varepsilon_y^B - \varepsilon_y^H) \cdot B, \quad (\text{Б.31})$$

$$\varepsilon = (2,509 - 2,307) \cdot 456 = 92 \text{ кВт·год/рік.}$$

На підставі наведених розрахунків можна зробити висновок, що розроблення, виготовлення й упровадження у будівельне виробництво установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНД-100 є економічно доцільним. Результати розрахунків ефективності впровадження нової техніки зводимо в таблицю Б.3

Таблиця Б.3 – Результати розрахунку ефективності створення установки для приготування ніздрюватих бетонів УдПНД-100

№	Найменування показників	Значення	
		FCM-5	УдПНД-100
1	Капітальні вкладення на змішувач, K , грн.	123200	77992
2	Оптова ціна змішувача, C_o , грн.	110000	69636
3	Річний фонд часу, T_p , год	1547	1594
4	Річна експлуатаційна продуктивність, B , м ³ /рік	444	456
5	Річні амортизаційні відрахування, S_{AM} , грн.	27013	17101
6	Вартість машино-години роботи установки, S_{m-r} , грн./год	205,81	195,04
7	Питома трудомісткість одиниці продукції, r_y , норм-год/м ³	3,873	3,855
8	Питома енергоємність одиниці продукції, ε_y , кВт·год/м ³	2,509	2,307
9	Питомі приведені витрати, Z_y , грн./м ³	758,73	704,44
10	Річна економія витрат на електроенергію, ε , кВт·год/рік	-	92
11	Річна економія на витратах матеріалів, M , кг/рік	-	4,1
12	Річна економія на витратах праці, R , чел./рік	-	0,004
13	Річний економічний ефект, E_p , грн.	-	24756

Додаток В

Патент на корисну модель:

Мобільна установка для приготування ніздрюватих бетонів



(11) 161192

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
Державна організація
«Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій»
(УКРНОІВІ)

Цей паперовий документ ідентичний за документарною інформацією та реквізитами електронному документу з електронним підписом уповноваженої особи Державної організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій».

Паперовий документ містить 2 арк., які пронумеровані та прошиті металевими люверсами.

Для доступу до електронного примірника цього документа з ідентифікатором 2093191125 необхідно:

1. Перейти за посиланням <https://sis.nipo.gov.ua>.
2. Обрати пункт меню Сервіси – Отримати оригінал документа.
3. Вказати ідентифікатор електронного примірника цього документа та натиснути «Завантажити».

Уповноважена особа УКРНОІВІ



І.Є. Матусевич

19.11.2025



УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **161192** (13) **U**
(51) МПК
B28C 5/16 (2006.01)

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки:	u 2024 05600	(72) Винахідник(и):	Васильєв Олексій Сергійович (UA), Яковенко Андрій Михайлович (UA), Кулай Володимир Павлович (UA)
(22) Дата подання заявки:	26.11.2024		
(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності:	20.11.2025	(73) Володілець (володільці):	НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА", просп. Першотравневий, 24, м. Полтава, 36011 (UA)
(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію:	19.11.2025, Бюл.№ 47		

(54) МОБІЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ПРИГОТУВАННЯ НІЗДРЮВАТИХ БЕТОНІВ

(57) Реферат:

Мобільна установка для приготування ніздрюватих бетонів складається з рами, на якій встановлено електричний двигун, сполучений через клинопасову передачу із змішувальним механізмом, виконаним у вигляді лопаток, розташованих у змішувальному контейнері, вивантаження одержаної суміші відбувається через вивантажувальний жолоб. Установка обладнана кришкою для герметизації та штуцером для створення підвищеного тиску повітря всередині змішувального контейнера і змінними робочими лопатками.

UA 161192 U

UA 161192 U

Корисна модель належить до технологічного обладнання для будівельної сфери, яке використовується для приготування різноманітних будівельних сумішей, включаючи розчини та інші матеріали. Особливістю цього обладнання є те, що воно забезпечує ефективне змішування компонентів завдяки обертанню лопатей та герметичності бункера, що дозволяє отримати

5

Як аналог можна розглянути установку міксерного типу Eibenstock FloorMix 2300 [1], яка виконує процес змішування різних матеріалів бетону, фібробетону, пінобетону та інших матеріалів. Вона оснащена електродвигуном потужністю 2,3 кВт і номінальні частоти обертання 70/130/160/280. Вага становить 48 кг, а об'єм змішувального контейнера 110 літрів. Даний пристрій для змішування з великими зсувними зусиллями, перешкоджає утворенню грудок і запобігає відкладенню матеріалу всередині та по краях. Його конструкція характеризується компактними розмірами та невеликою металоємністю. Барабан здатний як обертатися, так і нахилитися під час розвантаження, що ускладнює конструкцію, і її не можна назвати простою. Важливо відзначити, що гравітаційний принцип дії має свої обмеження: він не забезпечує ефективного перемішування будівельних розчинів без крупного заповнювача, через що час перемішування таких сумішей необхідно збільшувати.

10

15

20

25

Як найближчий аналог мобільної установки для приготування ніздрюватих бетонів вибраний бетонозмішувач примусової дії RMS-165 [2]. Виріб призначений для приготування різних видів бетону. Даний бетонозмішувач оснащений лопатками, розташованими на вертикальному валу, що забезпечує високий рівень однорідності приготованої суміші. На даній моделі встановлений електричний двигун потужністю 3,0 кВт, об'єм змішування становить 80 літрів. Вага становить 120 кг, а розміри виробу 1000×800×1080 мм. Перевагою машини є її зручність в користуванні та простота конструкції. Недоліком є те, що бетонозмішувач має не великий об'єм змішування.

30

Спільними ознаками найближчого аналога і корисної моделі є рама, на якій встановлено електричний двигун який сполучений через клинопасову передачу із змішувальним механізмом у вигляді лопаток, розташованих у змішувальному контейнері, вивантаження одержаної суміші відбувається через вивантажувальний жолоб.

35

40

В основу корисної моделі поставлена задача - розробка вдосконаленої конструкції установки примусової дії для приготування будівельних розчинів, призначених зокрема для виробництва ніздрюватих бетонів.

45

50

55

Поставлена задача вирішується тим, що мобільна установка для приготування ніздрюватих бетонів складається з рами, на якій встановлено електричний двигун, сполучений через клинопасову передачу із змішувальним механізмом, виконаним у вигляді лопаток, розташованих у змішувальному контейнері, вивантаження одержаної суміші відбувається через вивантажувальний жолоб, згідно з корисною моделлю, установка обладнана кришкою для герметизації та штуцером для створення підвищеного тиску повітря всередині змішувального контейнера і змінними робочими лопатками.

Технічний результат полягає у створенні ефективної установки, яка забезпечує одержання сумішей необхідної однорідності та технологічної якості при зниженні енерговитрат і скороченні тривалості змішування.

Суть корисної моделі наведено на кресленні - мобільна установка для приготування ніздрюватих бетонів.

На кресленні представлена конструкція мобільної установки для приготування ніздрюватих бетонів, яка дозволяє використовуватися в будівництві для приготування різноманітних будівельних сумішей пінобетону і фібробетону та складається з рами 12, на якій встановлюється електричний двигун 11, який служить для приведення в рух приводу через клинопасову передачу 10 змішувального механізму, а саме змінних змішувальних лопаток 9, які є змінними та використовуються для змішування компонентів у змішувальному контейнері 2. Щоб уникнути зайвих витрат матеріалу під час процесу змішування та для забезпечення безпеки використовується кришка 3, на якій знаходиться засипний отвір 1, призначений для відкриття та закривання доступу до змішувального контейнера, щоб контролювати процес змішування та засипати матеріал. Для приготування суміші на кришці знаходиться штуцер 4, який використовується для подачі інертного газу або повітря. Розвантаження змішувального контейнера відбувається через вивантажувальний жолоб 6. Для покращення змішування всередині змішувального контейнера по боках встановлені додаткові лопатки 5 та 8, які забезпечують правильну орієнтацію та рух матеріалу в змішувальному контейнері під час процесу приготування суміші у вертикальній та горизонтальній площинах.

UA 161192 U

Керування пристроєм здійснюється за допомогою пульта керування 13, який закріплений до рами для забезпечення максимальної зручності для оператора. Цей пульт використовується для запуску та зупинки робочого процесу, надаючи оператору легкий і швидкий спосіб управління змішувачем.

- 5 Для зручного переміщення пристрій було обладнано колесами 7, прикріпленими до рами 12, та ручкою 14, які призначені для кращої мобільності установки, дані елементи дозволяють зручно переміщати змішувач на будівельному майданчику.

- 10 Універсальність конструкції дозволяє змішувачу працювати з різними видами сумішей, забезпечуючи високу продуктивність і якість продукту, а також адаптується під різні будівельні потреби.

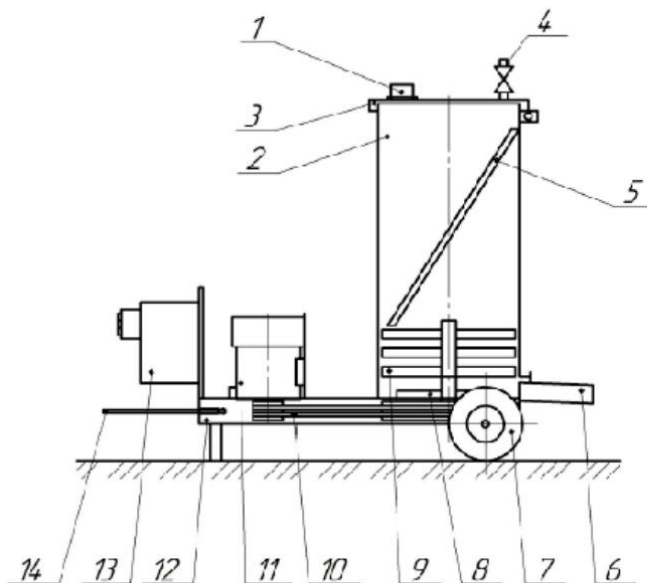
Джерела інформації:

1. Установка миксерная Eibenstock FloorMix 2300. - Режим доступу: https://www.motoblok.biz/ua/catalog/14323/mikseri-eibenstock/54578/ustanovka-mikserna-eibenstock-floormix-2300.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAjw3624BhBAEiwAkxgTOol-tSREfefG5bRkqnrOWMz2Ks1nXBwc6CnmXJw_grqjIM0SCnikChoC-hYQAvD_BwE.

- 15 2. Бетонозмішувач примусової дії RMS-165. - Режим доступу: <https://budprom.in.ua/en/stroitelnoye-oborudovaniye/betonomeshalki-i-rastvoromeshalki/betonomeshalka-prinuditelnogo-deystviya-rms-165>.

20 ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 25 Мобільна установка для приготування ніздрюватих бетонів, що складається з рами, на якій встановлено електричний двигун, сполучений через клинопасову передачу із змішувальним механізмом, виконаним у вигляді лопаток, розташованих у змішувальному контейнері, вивантаження одержаної суміші відбувається через вивантажувальний жолоб, яка відрізняється тим, що установка обладнана кришкою для герметизації та штуцером для створення підвищеного тиску повітря всередині змішувального контейнера і змінними робочими лопатками.



Комп'ютерна верстка А. Крижанівський

ДО "Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій", вул. Дмитра Годзенка, 1, м. Київ – 42, 01601

Додаток Г

Акти впровадження результатів дисертації
на тему: «Обґрунтування робочих процесів обладнання для
приготування ніздрюватих бетонів»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ТОВ «АСФЕР ГРУП»
Тузенко В.О.
« 07 » жовтень 2025 р.



АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи на тему «Обґрунтування робочих процесів обладнання для приготування ніздрюватих бетонів», виконаної в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Ми, що підписалися: з одного боку – директор ТОВ «АСФЕР ГРУП» Тузенко В.О., з іншого боку – представники Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»: доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки Васильєв О.С., аспірант Кулай В.П., склали цей акт про те, що в період з 08 вересня 2025 року по 26 вересня 2025 року було проведено випробування мобільної установки для приготування ніздрюватих бетонів.

Мобільна установка для приготування ніздрюватих бетонів розроблена в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», використовувався при будівництві невеликих об'єктів громадського призначення. Під час експлуатації виготовлено 34 м³ ніздрюватого бетону.

Головний інженер

Керівник аспіранта

Аспірант





Левченко О.П.

Васильєв О.С.

Кулай В.П.



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«ПРИМУМ АКТИВ»

36007, м. Полтава, вул. Решетилівська, 53
E-mail: priumaktiv@gmail.com Тел. 050-305-25-97
Р/р UA423052990000026003011208084
в АТ КБ «ПРИВАТБАНК» МФО 305299
код ЄДРПОУ 41130604 ІПН 411306016018

АКТ

про результати впровадження наукової розробки

« 15 » жовтня 2025 р.

м. Полтава

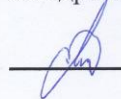
Ми, що нижче підписалися: з одного боку – директор ТОВ «ПРИМУМ АКТИВ» Олійник І.І., з іншого боку – представники Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»: доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки Васильєв О.С., аспірант Кулай В.П., склали цей акт про те, що в період з 04 серпня 2025 року по 22 серпня 2025 року було проведено випробування мобільної установки для приготування ніздрюватих бетонів, розробленої та виготовленої за результатами наукових досліджень аспіранта Кулая В.П. (тема дослідження: «Обґрунтування робочих процесів обладнання для приготування ніздрюватих бетонів»).

Під час випробувань було виготовлено 30 м³ бетонного розчину, який використовувався для заливки стяжок підлог, а також підтверджено технічні характеристики мобільної установки для приготування ніздрюватих бетонів. Дана розробка забезпечує зменшення енерговитрат з покращеними умовами експлуатації, відхилення між результатами теоретичних і лабораторних досліджень та даними які отримали під час виробничих випробувань – мінімальні.

Директор ТОВ
«ПРИМУМ АКТИВ»
Гор ОЛІЙНИК



Представники
Національного університету
«Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка»

 Олексій ВАСИЛЬЄВ
 Володимир КУЛАЙ



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»**

просп. Віталія Грицаєнка, 24, м. Полтава, 36011,
тел./факс (0532) 56 98 94, (0532) 60 87 30 (приймальня), web: www.nupp.edu.ua,
e-mail: rector@nupp.edu.ua, kanc@nupp.edu.ua,
Код ЄДРПОУ 02071100

12 01 20 26 № 27-10/88

На № _____ від ____ 20__

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи
здобувача наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування»

Кулая Володимира Павловича

на тему «Обґрунтування робочих процесів обладнання для приготування
ніздрюватих бетонів»

Результати дисертаційної роботи Кулая Володимира Павловича на тему «Обґрунтування робочих процесів обладнання для приготування ніздрюватих бетонів» впроваджено кафедрою галузевого машинобудування та мехатроніки в освітній процес Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» під час викладання дисциплін «Будівельна техніка» та «Машини для виробництва будівельних матеріалів та механізований інструмент» та виконання кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування».

Проректор з науково-педагогічної
роботи

Директор Департаменту забезпечення
якості вищої освіти

Директор навчально-наукового
інституту інформаційних
технологій та робототехніки



Анатолій Анатолій МАРТИНЕНКО

Олег Олег МАКСИМЕНКО

Володимир Володимир ПЕНЦ