

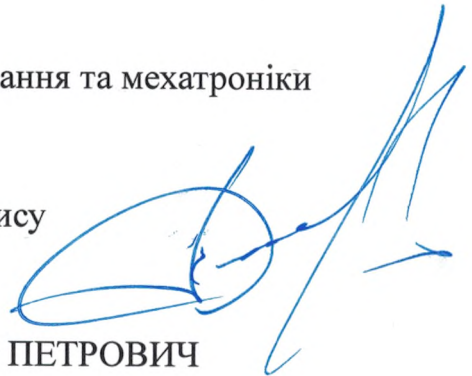
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»

Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

На правах рукопису



ЛЕВЧЕНКО ОЛЕКСАНДР ПЕТРОВИЧ

УДК 621.928:666.97

ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БУНКЕРА-ЖИВИЛЬНИКА
БЕТОНОЗМІШУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Науковий керівник:

Коробко Богдан Олегович,

доктор технічних наук, професор

Полтава – 2026

АНОТАЦІЯ

Левченко О.П. Обґрунтування параметрів бункера-живильника бетонозмішувальної установки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі підвищення ефективності роботи бетонозмішувальних установок шляхом обґрунтування раціональних параметрів системи живлення та дозування сипких матеріалів з урахуванням впливу вологості та фізико-механічних властивостей компонентів бетонної суміші.

У роботі проведено комплексний аналіз існуючих конструкцій бетонозмішувальних установок, виявлено їх основні недоліки, серед яких найбільш критичними є нестабільність подачі сипких матеріалів внаслідок склепіння у бункерах, похибки дозування через зміну вологості заповнювачів та високі енерговитрати системи живлення.

Розроблено математичну модель швидкості витікання сипкого матеріалу з бункера на основі кінематичних залежностей, яка враховує геометричні параметри бункера (кут нахилу стінок, площу розвантажувального отвору), фізичні властивості матеріалу (вологість, зернистість, насипну густину) та коефіцієнт витікання. Модель базується на аналогії з вільним падінням тіла та модифікована емпіричними коефіцієнтами для врахування взаємодії частинок та тертя об стінки бункера.

Встановлено, що швидкість витікання описується залежністю виду $v(\alpha, \mu, M) = C_d(M, \mu)\sqrt{2gH(\alpha)}$, де коефіцієнт витікання C_d зменшується при зростанні вологості та збільшенні зернистості матеріалу, а ефективна висота H залежить від кута нахилу стінок бункера.

Проведено дослідження впливу вологості на процес дозування сипких матеріалів. Встановлено, що зміна вологості піску на 1–2% призводить до зміни насипної густини на 10–15%, що викликає значні похибки у ваговому дозуванні та порушення заданого водо–цементного відношення у бетонній суміші.

Розроблено концепцію енергозберігаючої конструкції системи живлення бетонозмішувальної установки, яка передбачає індивідуальний привід для кожного бункера замість загального стрічкового конвеєра, що дозволяє зменшити енерговитрати та підвищити гнучкість технологічного процесу.

Запропоновано конструкцію розпушувача для вологих сипких дрібнозернистих матеріалів, який запобігає утворенню склепінь у приймальному бункері та забезпечує стабільну подачу матеріалу до дозатора. Заявка на патент на винахід розпушувача знаходиться на стадії перевірки.

Проведено оптимізацію роботи приймального бункера з урахуванням явища склепіння сипких матеріалів. Визначено раціональні параметри геометрії бункера (кут нахилу стінок не менше 55–60°, розмір випускного отвору) та режими роботи розпушувача.

Здійснено оптимізацію процесу виробництва бетону з точки зору енергоспоживання. Встановлено, що застосування запропонованих технічних рішень дозволяє знизити питомі енерговитрати на 15–20% порівняно з традиційними схемами бетонозмішувальних установок.

Результати досліджень впроваджено при проектуванні модернізованої бетонозмішувальної установки та можуть бути використані підприємствами будівельної індустрії для підвищення продуктивності та зниження собівартості виробництва товарного бетону та залізобетонних виробів.

Наукові результати дисертаційної роботи опубліковано у 5 наукових статтях, з яких 2 у виданні, що входить до наукометричної бази Scopus, представлено у вигляді доповідей на 1 всеукраїнських та 1 міжнародній науково–технічній конференції.

Ключові слова: бетонозмішувальна установка, система живлення, дозування сипких матеріалів, вологість заповнювачів, склепіння, розпушувач, енергозбереження, математична модель витікання.

ANNOTATION

Levchenko O.P. Substantiation of the feed hopper parameters for a concrete batching plant. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 133 "Sectoral Mechanical Engineering". – National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic", Poltava, 2026.

The dissertation is devoted to solving the actual scientific and technical problem of improving the efficiency of concrete mixing plants by substantiating rational parameters of the feeding and dosing system for bulk materials, taking into account the influence of moisture and physical–mechanical properties of concrete mixture components.

A comprehensive analysis of existing concrete mixing plant designs has been carried out, revealing their main disadvantages, among which the most critical are: instability of bulk material feeding due to arching in hoppers, dosing errors caused by changes in aggregate moisture content, and high energy consumption of the feeding system.

A mathematical model of bulk material discharge velocity from a hopper based on kinematic dependencies has been developed. The model accounts for hopper geometric parameters (wall inclination angle, discharge opening area), material physical properties (moisture content, grain size, bulk density), and discharge coefficient.

The influence of moisture content on the bulk material dosing process has been investigated. It was established that a 1–2% change in sand moisture leads to a 10–15% change in bulk density, causing significant errors in weight dosing.

An energy–saving design concept for the concrete mixing plant feeding system has been developed, providing individual drives for each hopper instead of a common belt conveyor, which reduces energy consumption and increases process flexibility.

A loosener design for wet fine-grained bulk materials has been proposed, preventing arch formation in the receiving hopper and ensuring stable material feeding to the dosing unit. A patent application for the loosener invention is under examination.

Scientific results have been published in 5 scientific articles, including 2 in a Scopus-indexed journal, and presented at 1 national and 1 international scientific conferences.

Keywords: concrete mixing plant, feeding system, bulk material dosing, aggregate moisture content, arching, loosener, energy saving, discharge flow model.

ЗМІСТ**ВСТУП 9****РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ БЕТОНОЗМІШУВАЛЬНИХ
УСТАНОВОК І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ..... 15**

1.1. Вимоги до точності дозування і стабільності систем живлення бетонозмішувальних установок при виробництві монолітного та збірного залізобетону 15

1.2. Вплив вологості заповнювачів на стабільність витікання та загальну продуктивність бетонозмішувальних установок 26

1.3. Аналіз існуючих конструкцій дозуючих комплексів і методів запобігання склепінноутворенню в бункерах..... 30

1.4. Обґрунтування напрямку досліджень 36

1.5. Висновки до розділу 1. Мета та задачі дослідження..... 37

**РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ
ЖИВЛЕННЯ БЕТОНОЗМІШУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ 40**

2.1. Наукові передумови щодо стабілізації продуктивності бетонозмішувальних установок шляхом переведення режиму течії заповнювачів у масовий..... 40

2.2. Фізико–механічні особливості формування динамічних склепінь вологих матеріалів у бункерах систем живлення..... 42

2.3. Аналітична модель руйнування склепінь та зниження ефективного кута внутрішнього тертя під дією активного розпушувача..... 49

2.4. Аналітичне визначення закономірностей зміни масової витрати матеріалу під дією активного розпушувача..... 57

2.5. Висновки до розділу 2 63

**РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ
СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДОЗУВАННЯ В БЕТОНОЗМІШУВАЛЬНИХ
УСТАНОВКАХ 65**

3.1. Програма та методика експериментальних досліджень	65
3.2. Опис лабораторного комплексу, засобів вимірювання та методики проведення експериментів	70
3.3. Результати експериментальних дослідження впливу кінематики розпушувача на стабільність витікання за різної вологості.....	76
3.4. Статистична обробка результатів експерименту та перевірка адекватності математичної моделі.....	82
3.5. Висновки до розділу 3	85
РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БЕТОНОЗМІШУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	87
4.1. Конструктивне виконання модернізованої системи живлення бетонозмішувальних установок з активним розпушувачем	87
4.2. Інженерна методика розрахунку параметрів розпушувача залежно від заданої продуктивності бетонозмішувальної установки	97
4.3. Виробнича верифікація розробленої методики розрахунку на діючій бетонозмішувальній установці	102
4.4. Процедура впровадження та алгоритм налаштування режимів роботи системи дозування.....	105
4.5.Висновки до розділу 4	107
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	109
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	113
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність теми. Бетонозмішувальні установки є ключовою ланкою виробничого процесу сучасного будівництва, забезпечуючи механізоване приготування бетонної суміші для зведення монолітних та збірних залізобетонних конструкцій. Якість бетону безпосередньо залежить від точності дозування компонентів, рівномірності їх змішування та стабільності технологічного процесу. В умовах зростаючих вимог до продуктивності, енергоефективності та екологічності виробництва будівельних матеріалів удосконалення конструкцій бетонозмішувальних установок набуває особливої актуальності.

Однією з найбільш критичних проблем сучасних бетонозмішувальних установок є нестабільність подачі сипких матеріалів (цементу, піску, щебеню) з бункерів до дозувального обладнання. Основними причинами цього є утворення склепінь (зводів) у бункерах при роботі з вологими матеріалами, зміна насипної густини заповнювачів залежно від вологості та недосконалість конструкції систем живлення. Ці фактори призводять до значних похибок у ваговому дозуванні (до 5–7% замість нормативних 2–3%), порушення заданого складу бетонної суміші, зниження міцності готових виробів та перевитрат дорогих компонентів, насамперед цементу.

Традиційні системи живлення бетонозмішувальних установок використовують єдиний стрічковий конвеєр для транспортування всіх видів заповнювачів, що створює «вузьке місце» у технологічному процесі, обмежує можливості паралельного дозування та ускладнює автоматизацію. Великі пневматичні затвори у вагових мірниках спричиняють інерційні похибки зважування, а розміщення мірників на вібруючих елементах конструкції викликає нестабільність показань тензодатчиків.

Існуючі математичні моделі процесів витікання сипких матеріалів з бункерів, як правило, не враховують одночасний вплив геометричних параметрів

бункера, фізико–механічних властивостей матеріалу та його вологості, що обмежує можливості оптимізації конструктивних параметрів системи живлення та прогнозування її роботи в реальних виробничих умовах.

Підвищення енерговитрат є ще однією суттєвою проблемою. Значна частина електроенергії витрачається на привід стрічкових конвеєрів великої довжини, подолання опору тертя при транспортуванні матеріалів та роботу допоміжного обладнання. В умовах зростання тарифів на енергоносії та необхідності декарбонізації будівельної галузі пошук енергозберігаючих технічних рішень є актуальним завданням.

Таким чином, науково–технічна задача обґрунтування раціональних параметрів бетонозмішувальної установки, зокрема її систем живлення та дозування, з урахуванням впливу вологості та фізико–механічних властивостей сипких матеріалів є актуальною та має важливе значення для підвищення ефективності виробництва залізобетонних конструкцій.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є обґрунтування конструктивних та кінематичних параметрів системи живлення бетонозмішувальної установки для виробництва монолітного та збірного залізобетону, що забезпечують стабільність масової витрати та точність дозування сипких матеріалів незалежно від їх вологості за рахунок переведення режиму течії з воронкового в масовий шляхом активного механічного розпушування.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі **завдання**:

1. Встановити причини нестабільності дозування та зниження продуктивності систем живлення бетонозмішувальних установок при використанні заповнювачів зі змінною вологістю.

2. Теоретично обґрунтувати умови переходу від воронкового до масового режиму течії вологих матеріалів через зниження ефективного кута внутрішнього тертя шляхом механічного руйнування динамічних склепінь.

3. Встановити математичні залежності для визначення мінімально необхідної частоти обертання та довжину дії штирів розпушувача (із кутовим зміщенням 90°), за яких масова витрата матеріалу стає незалежною від його вологості та фракції.

4. Експериментально визначити порогову частоту обертання розпушувача як функцію вологості та фракційного складу матеріалу і перевірити адекватність розробленої теоретичної моделі.

5. Розробити інженерну методику розрахунку конструктивних і кінематичних параметрів розпушувача для бетонозмішувальних установок продуктивністю $30 \dots 120 \text{ м}^3/\text{год}$.

Об'єкт дослідження – процес живлення та дозування сипких заповнювачів у бетонозмішувальних установках.

Предмет дослідження – закономірності впливу конструктивних та кінематичних параметрів активного розпушувача на режим течії та стабільність дозування вологих сипких матеріалів.

Методи дослідження. У роботі використано комплекс аналітичних та експериментальних методів: основні положення механіки сипких середовищ (для опису напружено–деформованого стану та умов руйнування динамічних склепінь); теорію механізмів і машин (для обґрунтування кінематики активного розпушувача); методи планування багатофакторного експерименту; методи математичної статистики та регресійного аналізу (для обробки експериментальних даних та перевірки адекватності математичних моделей).

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше обґрунтовано механізм стабілізації витікання вологих сипких матеріалів, який полягає у переведенні воронкового режиму течії в масовий за рахунок механічного зниження ефективного кута внутрішнього тертя нижче критичного значення за допомогою активного розпушувача з кутовим зміщенням штирів на 90° .

2. Розроблено математичну модель процесу витікання сипких матеріалів, яка встановлює аналітичний зв'язок між масовою витратою матеріалу, його вологістю та кінематичними параметрами розпушувача (частотою обертання та радіусом дії штирів), що дозволяє визначати умови стабільного дозування.

3. Отримано експериментальне підтвердження існування порогової частоти обертання розпушувача ($\omega_{кр}$) перевищення якої робить коефіцієнт варіації продуктивності системи дозування незалежним від абсолютної вологості та фракційного складу заповнювачів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці конкретних технічних рішень для підвищення стабільності роботи та точності дозування бетонозмішувальних установок:

1. Розроблено інженерну методику розрахунку конструктивних та кінематичних параметрів розпушувача з урахуванням заданої продуктивності БЗУ (в діапазоні 30...120 м³/год) та максимальної вологості матеріалу.

2. Створено конструкцію активного розпушувача для запобігання динамічному склепінню вологих сипких матеріалів у бункерах систем живлення.

Впровадження результатів. Результати дисертаційної роботи впроваджено при модернізації системи живлення бетонозмішувальної установки продуктивністю 60 м³/год на підприємстві ТОВ «Асфер Груп», що дозволило усунути простой через утворення склепінь матеріалів та забезпечити нормативну точність дозування вологих заповнювачів.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. Зокрема, здобувачем самостійно: проведено аналіз літературних джерел та патентної документації; розроблено математичну модель витікання сипких матеріалів; спроектовано та виготовлено експериментальну установку; проведено експериментальні дослідження впливу вологості на дозування; розроблено конструкцію розпушувача; виконано оптимізаційні розрахунки; оформлено заявку на патент. Науковий керівник д.т.н.,

проф. Коробко Б.О. надавав консультації щодо методології досліджень, обговорення результатів та підготовки публікацій. У спільних публікаціях здобувачу належить основна роль у проведенні досліджень, обробці даних та формулюванні висновків.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях:

- VI Всеукраїнська науково–технічна конференція «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки» (Полтава, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023);
- XVIII International scientific and practical conference «Innovations in Scientific Research: World Experience and Realities» (Riga, Latvia, October 23–25, 2024);
- засіданнях кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» (2023–2025 рр.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 3 наукові статті у фахових виданнях, з яких 1 стаття у виданні, що входить до наукометричної бази Scopus, та 3 тези доповідей на конференціях. Подано 1 заявку на патент України на винахід (на стадії експертизи).

Основні публікації за темою дисертації:

1. Levchenko, O., Korobko, B. (2024). Optimization of the concrete production process in terms of energy consumption. Technology Audit and Production Reserves, 6(1/80), 11–15. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.319827> (Scopus)
2. Levchenko, O., Korobko, B., Ivakhno, O., & Rubel, V. (2026). Verification of the mathematical model of the mass flow rate of moist bulk materials for concrete mixing plant feeding systems. Technology Audit and Production Reserves, 3(1(89)), 6–11. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2026.360402> (Scopus)

3. Korobko, B., Levchenko, O., & Rudyk, R. (2023). Development of an energy-saving design for the feeding system of a concrete mixing plant. Academic Journal. Industrial Machine, Building Civil Engineering, 2(61), 46–51. <https://doi.org/10.26906/znp.2023.61.3552>

4. Korobko, B., & Levchenko, O. (2025). Optimization of the receiving bunker operation during the blocking of bulk materials. Construction Engineering, (41), 47–55. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0405>

5. Левченко, О., & Івахно, О. (2026). Теоретичне обґрунтування параметрів системи живлення БЗУ для стабілізації масової витрати вологих матеріалів. Збірник наукових праць. Галузеве машинобудування, будівництво, 1(66), 139-145. <https://doi.org/10.26906/znp.2026.66.4352>

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Повний обсяг роботи становить ____ сторінок, з яких ____ сторінок основного тексту. Робота містить рисунків, таблиць. Список використаних джерел включає найменувань.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ БЕТОНОЗМІШУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК І ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Вимоги до точності дозування і стабільності систем живлення бетонозмішувальних установок при виробництві монолітного та збірного залізобетону

Бетонозмішувальні установки (БЗУ) є ключовим ланцюгом у виробничому процесі сучасного будівництва, зокрема у зведенні як монолітних, так і збірних залізобетонних конструкцій. Ці установки забезпечують механізоване приготування бетонної суміші за заданим рецептом та у необхідних обсягах, з дотриманням вимог до якості, рівномірності, однорідності та енергоефективності [1, 2].

Бетон залишається найбільш масовим будівельним матеріалом у світі. За даними [3], щорічне світове виробництво бетону перевищує 10 мільярдів тонн, що робить цю галузь одним з найбільших споживачів природних ресурсів та енергії. У зв'язку з цим, підвищення ефективності роботи бетонозмішувальних установок має не тільки економічне, але й екологічне значення.

Бетонозмішувальні установки поділяються на установки періодичної дії (циклічні) та установки безперервної дії [4, 5].

Циклічні установки готують суміш порціями (замісами). Весь процес проходить у послідовному режимі: завантаження компонентів → змішування → вивантаження. Це дозволяє легко змінювати рецептуру, контролювати якість кожної порції, однак обмежує продуктивність у порівнянні з безперервними установками. Тривалість одного циклу зазвичай становить від 45 до 90 секунд залежно від типу суміші та об'єму змішувача [6].

Безперервні установки працюють у режимі постійного потоку: компоненти дозуються, подаються, змішуються та вивантажуються без зупинки. Такі установки мають високу продуктивність (до 200 - 300 м³/год), але складніші в налаштуванні та контролі якості. Зміна рецептури на безперервних установках вимагає значного часу на переналаштування обладнання [7].

На рис. 1.1 показано схему бетонного заводу безперервної дії. Принцип роботи полягає у безперервному надходженні всіх компонентів у змішувач 10, де відбувається їх перемішування. Матеріали з бункерів 1 надходять через дозатори безперервної дії 2 на транспортер 3, який подає їх на похилий транспортер 4. Цемент з силосу 7 через дозатор 6 та тарувальний дозатор 5 подається у збірну воронку 9, звідки потрапляє у змішувач 10. Вода дозується насосом - дозатором 12. Блок управління 11 координує роботу всіх елементів установки.

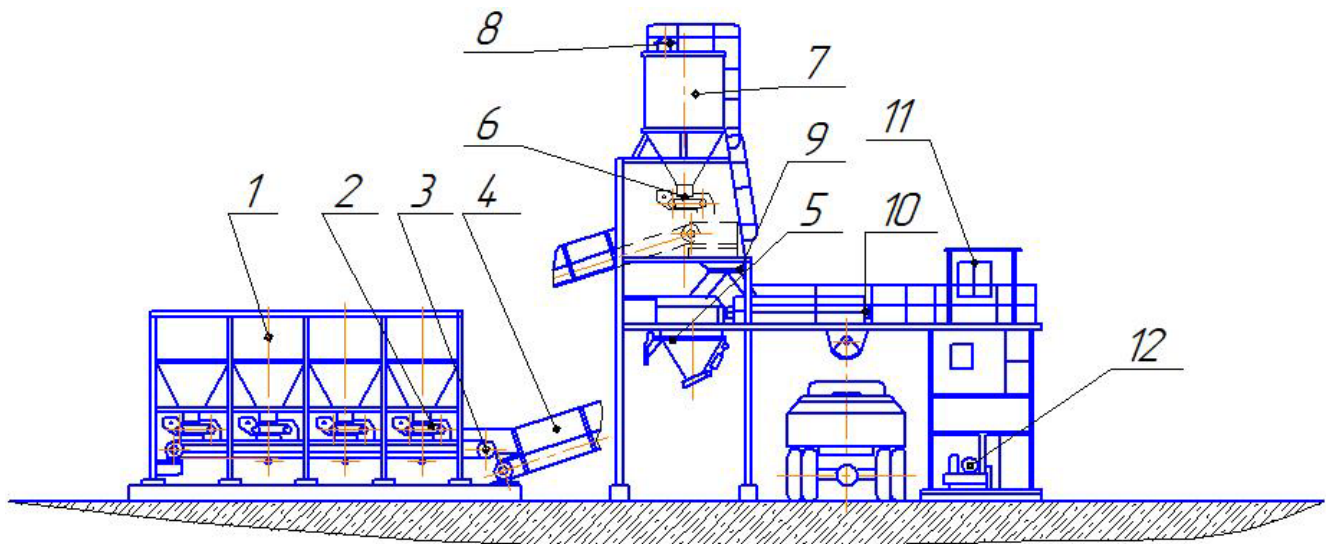


Рис. 1.1. Схема бетонного заводу безперервної дії: 1 – бункер; 2 – дозатор безперервної дії; 3 – транспортер; 4 – похилий транспортер; 5 – тарувальний дозатор циклічної дії; 6 – дозатор цементу; 7 – силос; 8 – фільтр; 9 – збірна воронка; 10 – змішувач безперервної дії; 11 – блок управління; 12 – насос - дозатор

Порівняльна характеристика установок періодичної та безперервної дії наведена у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика БЗУ різних типів

Параметр	Циклічні установки	Безперервні установки
Продуктивність, м³/год	15 – 120	80 - 300
Точність дозування, %	±1 – 2	±2 - 4
Гнучкість рецептур	Висока	Низька
Складність управління	Середня	Висока
Час зміни рецептури, хв	2 – 5	20 - 40
Енергоспоживання на 1 м³	Вище	Ниже
Придатність для спецбетонів	Так	Обмежено

За даними таблиці 1.1 видно, що циклічні установки забезпечують вищу точність дозування та гнучкість у виробництві різних марок бетону, тоді як безперервні установки ефективні для великосерійного виробництва однотипних сумішей.

Відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7 - 96 - 2000 «Суміші бетонні. Технічні умови» та ДСТУ Б А.3.1 - 9 - 2014 [28, 89], допустимі похибки дозування компонентів бетонної суміші наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Нормативні вимоги до точності дозування компонентів бетонної суміші

Компонент	Допустиме відхилення, %	Вплив на міцність бетону	Регламентуючий документ
Цемент	±1	До ±30% при відхиленні ±5%	ДСТУ Б В.2.7 - 96 - 2000
Вода	±1	До ±25% при відхиленні ±5%	ДСТУ Б В.2.7 - 96 - 2000
Заповнювачі дрібні (пісок)	±3	До ±7% при відхиленні ±5%	ДСТУ Б В.2.7 - 96 - 2000
Заповнювачі крупні (щебінь)	±2	До ±5% при відхиленні ±5%	ДСТУ Б В.2.7 - 96 - 2000
Хімічні добавки	±1	Залежить від типу добавки	ДСТУ Б В.2.7 - 96 - 2000

Як видно з таблиці 1.2, найбільш жорсткі вимоги - $\pm 1\%$ - висуваються до дозування цементу та води, оскільки саме ці компоненти визначають В/Ц відношення. Для заповнювачів норматив дещо ліберальніший: $\pm 2\%$ для великого і $\pm 3\%$ для дрібного. Проте практика виробництва показує, що при роботі з вологими заповнювачами ці нормативні значення систематично перевищуються навіть на технічно справному обладнанні.

Проектні властивості бетонних сумішей та бетонів забезпечуються точним дозуванням (відмірюванням) їх компонентів. Ця операція відбувається за допомогою дозаторів. Дозатори бувають об'ємні та вагові, періодичної та безперервної дії, з ручним, напівавтоматичним та автоматичним керуванням [28].

У сучасних умовах застосовують у більшості випадків автоматичні вагові дозатори періодичної дії, які забезпечують точність дозування $\pm 1-2\%$ для активних компонентів та $\pm 2-3\%$ для заповнювачів.

Ваговий дозатор періодичної дії складається з мірника (прямокутної або циліндричної судини з пірамідальною або конічною нижньою частиною), затвора та вагового механізму. До останнього часу на БЗУ використовувалися вагові дозатори з важільним ваговим механізмом, який був ненадійний, досить складний і погано піддавався автоматизації [29].

Останнім часом широко використовуються вагові дозатори на тензодатчиках, конструкція яких дуже проста: мірник встановлюється на тензодатчики (зазвичай 3-4 шт.) або підвішується до тензодатчиків. Найчастіше використовуються тензодатчики опору, опір яких змінюється залежно від деформацій, викликаних дією сили тяжіння. Електричний сигнал обробляється контролером [30].

Всі матеріали, за винятком води та розчинних добавок, дозуються за масою. Воду та рідкі добавки дозують за масою або обсягом. За обсягом (з контролем маси) також дозують легкі заповнювачі (керамзит, перліт) через складність їх зважування [33].

Матеріали в бетонозмішувач завантажуються одночасно, за винятком випадків використання гарячої води в зимовий час (температура понад 60°C) та гарячого цементу у спекотний літній час (температура понад 50°C). При цьому порядок завантаження змінюється таким чином, щоб спочатку активний гарячий компонент охолодився, змішавшись із заповнювачем, тільки після цього завантажується другий активний компонент [34].

Згідно з нормативами [35], активні компоненти (цемент, вода, розчини хімічних добавок) дозуються з точністю $\pm 2\%$, заповнювачі - з точністю $\pm 3\%$.

Для вибору дозатора необхідно розрахувати об'єм мірника, підібрати затвор та тензодатчики. Об'єм мірника розраховують на максимально можливу кількість компонента, що йде на один заміс бетонозмішувача (керуючись номенклатурою складів бетонних сумішей та враховуючи запас 10-15%). Потім підбирають конфігурацію та розміри мірника, і вибирається затвор. Після цього визначають тип та марку тензодатчиків [36].

Для приготування бетонної суміші користуються двома способами змішування сипучих матеріалів з рідиною: гравітаційне (вільне) змішування та примусове змішування [38].

Гравітаційні змішувачі (рис. 1.2а) служать для приготування рухомих сумішей. Вони являють собою барабан 1, що обертається, до внутрішніх стінок якого прикріплені під певним кутом ($20-30^{\circ}$) лопасті 2. При повільному обертанні барабана з частотою $0,2-0,3 \text{ c}^{-1}$ (12-18 об/хв) суміш за допомогою лопастей, а також сил тертя піднімається на певну висоту і тоді знову падає вниз [39].

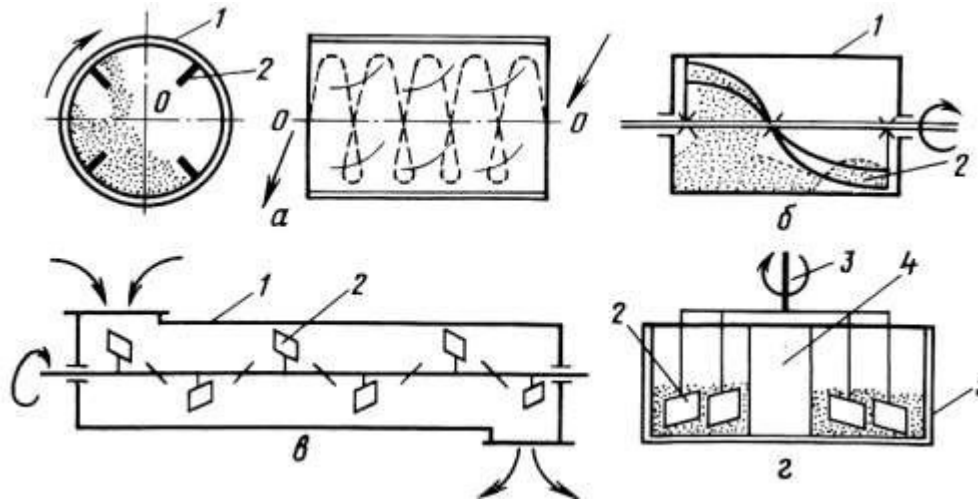


Рис. 1.2. Принципова схема змішувачів: а – гравітаційного; б – лопатевого; в – лоткового; г – роторного; 1 – барабан; 2 – лопасті; 3 – ротор; 4 – стакан; 5 – чаша

Щоб забезпечити однорідність суміші, треба зробити 30-40 циклів підймання і скидання в барабані. Для якісного перемішування суміші в барабані його об'єм у 2,5-3,0 рази повинен перевищувати об'єм суміші. Більше значення частоти обертання барабана відповідає змішувачам із меншим об'ємом, тому що при високій частоті обертання відцентрові сили інерції перешкоджають вільному змішуванню суміші, притискаючи її до стінок [40].

Переваги гравітаційних змішувачів - простота конструкції, можливість перемішування сумішей із великим (до 150-180 мм) заповнювачем, невисока енергоємність (3-5 кВт на 1 м³ замісу), простота обслуговування і експлуатації, низька собівартість приготування суміші, незначна зношуваність робочих органів.

Змішувачі примусової дії (рис.1.2б,в,г) відрізняються нерухомою ємністю, а процес замішування здійснюється за допомогою рухомих лопатей. Такий варіант дає можливість отримувати більш якісну суміш за короткий час. Сам розчин у таких пристроях буде змішуватися більш ретельно, на відміну від гравітаційних змішувачів [41].

Агрегат являє собою резервуар, всередині якого знаходиться крильчатка з лопатями, закріплена на валу. Лопаті постійно обертаються з частотою 30-60 об/хв. Це забезпечує інтенсивне змішування маси. Положення насадок-лопатей можна регулювати. Для повного використання об'єму лопаті оснащуються спеціальними скребками [42].

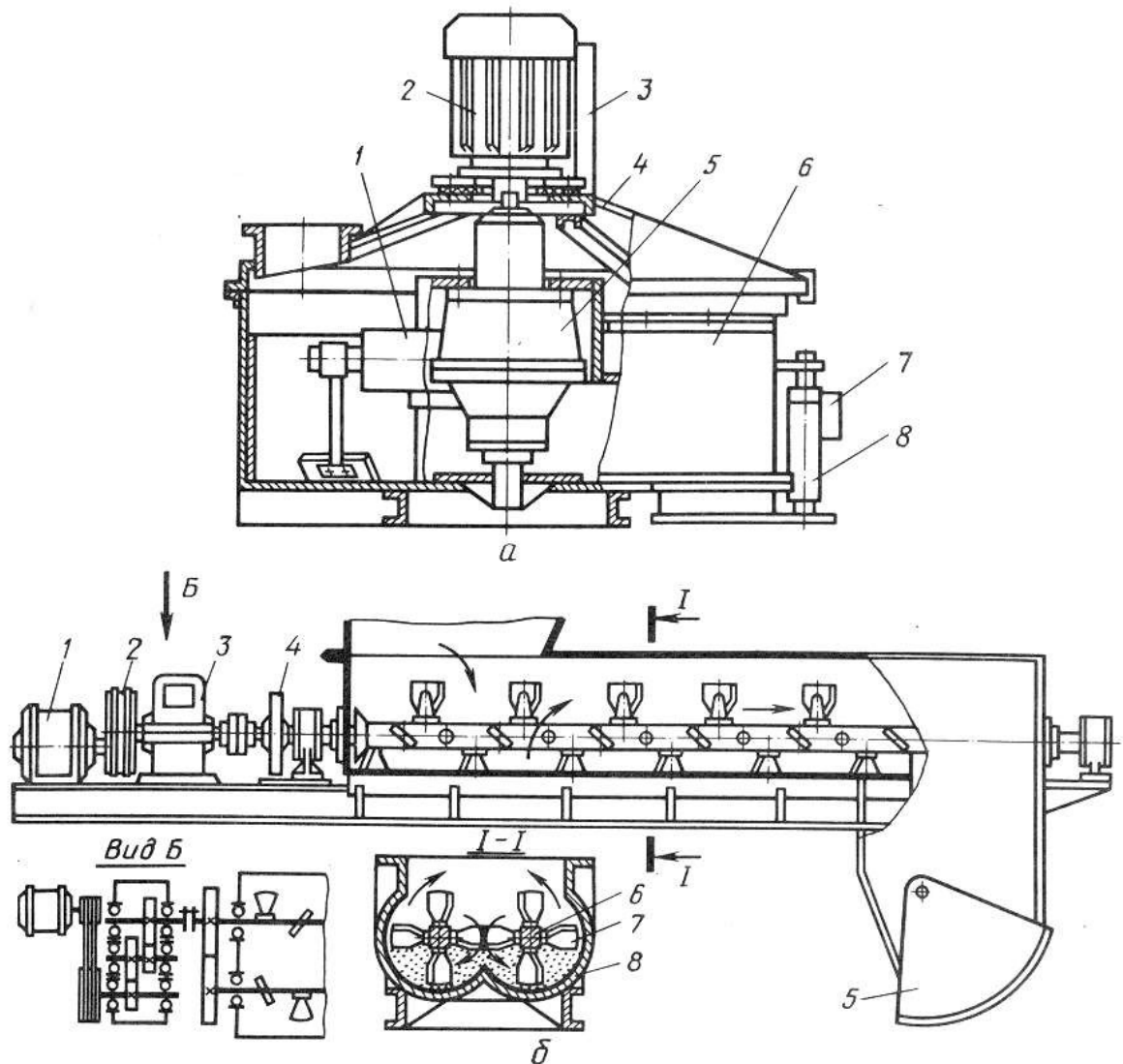


Рис. 1.3. Конструктивні схеми змішувачів примусової дії: а – роторного: 1 – ротор; 2 – двигун; 3 – пульт керування; 4 – кришка; 5 – редуктор; 6 – чаша; 7 – пневмоциліндр; 8 – засув; б – лоткового: 1 – двигун; 2 – пасова передача; 3 – редуктор; 4 – синхронізатор; 5 – засув; 6 – вали; 7 – лопаті; 8 – лоток.

Розчини швидко доходять до потрібної консистенції. Бетонозмішувачі примусової дії дозволяють скоротити процес замішування розчинів у 5 разів порівняно з гравітаційними. У залежності від того, який розчин слід готувати, висувають певні вимоги до конструкції лопатей. Для роботи з рідким цементом застосовуються насадки у вигляді вилок. Якщо необхідно замішати суміш з важких інгредієнтів, краще використовувати гребеневі лопаті [43].

Для більшої зносостійкості всередину змішувача встановлюють броню товщиною 8-12 мм з високомарганцевистої сталі або чавуну. Вона може бути різної висоти або покривати ємність повністю.

Для приготування бетонної суміші більш раціональним способом є використання змішувачів примусової дії. Головними перевагами є те, що 85% однорідності суміші досягається вже в перші 15 секунд замісу, а за наступні 15 секунд – 95% однорідності. Відбувається більш повне обволікання цементом кожної частинки піску та іншого заповнювача [44].

Порівняльні характеристики змішувачів наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 - Порівняльна характеристика типів змішувачів

Параметр	Гравітаційні	Примусової дії	Турбулентні
Час змішування, с	60-120	25-45	15-30
Однорідність суміші, %	85-90	95-98	98-99
Енергоспоживання, кВт·год/м³	2,5-4,0	4,5-7,0	8,0-12,0
Макс. розмір заповнювача, мм	150	70	40
Коефіцієнт заповнення	0,35-0,40	0,60-0,70	0,65-0,75
Зносостійкість	Висока	Середня	Низька
Вартість відносна	1,0	1,8-2,2	3,0-4,0

Крім того, змішувачі примусової дії можуть працювати з будь-якими рецептами (жорсткі, важкі бетони, легкі бетони, розчинні суміші, сухі будівельні суміші). Подача води здійснюється через форсунки по всьому периметру камери

змішувача, при цьому не утворюються грудки цементу і піску. Затвор з пневмоприводом забезпечує швидке (3-5 с) і зручне розвантаження суміші [45].

Турбулентні змішувачі використовуються для спеціальних бетонів (високої міцності, самоущільнювальних, з пластифікаторами). На рис. 1.4 показана технологічна схема приготування будівельного розчину та бетону на автоматизованому вузлі, в якому застосовані турбулентні змішувачі.

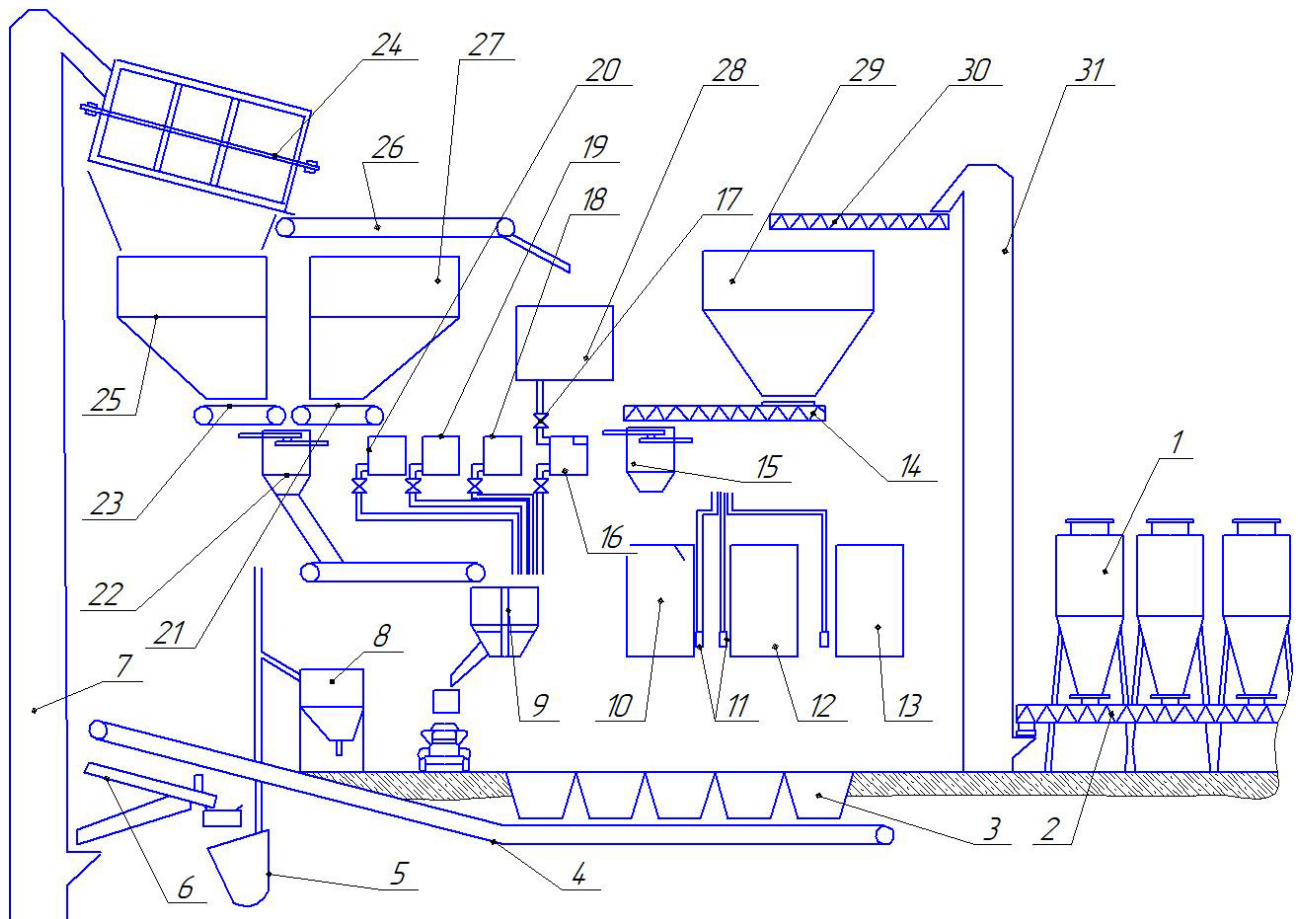


Рис. 1.4. Технологічна схема бетонозмішувального вузла з турбулентним змішувачем: 1 – силос; 2, 30 – шнек; 3 – склад матеріалів; 4, 26 – транспортер; 5 – шахтний підйомник; 6 – грохот; 7, 31 – елеватор; 8 – бункер для відходів; 9 – змішувач; 10, 12 – бак для добавок; 11 – насос; 13 – бак для вапна; 14, 21, 23 – живильник; 15, 16, 18, 19, 20, 22 – дозатор; 17 – клапан; 24 – піскосівалка; 25, 27, 29 – бункер; 28 – ємність для води.

Цемент із силосів 1 шнеком 2, елеватором 31 і шнеком 30 подається в бункер 29. З бункера цемент живильником 14 подається в дозатор 15, з якого надходить у змішувач 9. Заповнювачі зі складів 3 подаються транспортером 4 на грохот 6 для відсіювання великих включень. Просіяний пісок елеватором 7 подається в барабанну піскосівалку 24 для зволоження і далі в бункер 25. Великі включення з грохота 6 подаються шахтним підйомником 5 у бункер для відходів 8. Щебінь зі складу транспортується цим же ланцюжком машин і транспортером 26 у бункер 27 [46].

З бункерів пісок живильниками 21 і 23 подаються в дозатор 22 і далі у змішувач. Вода у змішувач подається з ємності 28 через клапан 17 і дозатор 16. Вапно з бака 13 і добавки з баків 12 і 10 насосами 11 подаються у відповідні дозатори 18, 19 і 20, з яких зливаються в змішувач.

Продуктивність бетонозмішувальних установок, що застосовуються у будівельній індустрії України, варіює від 15 - 30 м³/год для пересувних до 90 - 180 м³/год для великих стаціонарних вузлів. Вибір типу і продуктивності БЗУ визначається обсягами будівництва, режимом роботи та вимогами до номенклатури бетонних сумішей.

Теоретична продуктивність циклічної установки визначається співвідношенням

$$Q_{\text{теор}} = (V_{\text{зам}} \times 60 \times K_{\text{вих}}) / T_{\text{ц}}, \quad (1.1)$$

де $V_{\text{зам}}$ - об'єм замісу, м³;

$K_{\text{вих}}$ - коефіцієнт виходу суміші (0,65 - 0,75);

$T_{\text{ц}}$ - тривалість циклу, хв.

Фактична продуктивність з урахуванням простоїв та технологічних зупинок

$$Q_{\text{факт}} = Q_{\text{теор}} \times K_{\text{вик}}, \quad (1.2)$$

де $K_{\text{вик}}$ - коефіцієнт використання обладнання (0,75–0,85).

Для сучасних стаціонарних установ він перевищує 0,80 через регулярні зупинки, пов'язані зі склепінням у бункерах при роботі з вологими матеріалами. Саме цей чинник є ключовим об'єктом дослідження в даній роботі.

Загальна похибка дозування формується з кількох складових: інерційності затворів, вібрацій на вузлах вимірювання та відхилення, зумовлених зміненою вологістю заповнювачів

$$\Delta_{\text{заг}} = \sqrt{(\Delta_{\text{інерц}}^2 + \Delta_{\text{вібр}}^2 + \Delta_{\text{волог}}^2 + \Delta_{\text{стат}}^2)} \leq 1,5\%, \quad (1.3)$$

де $\Delta_{\text{інерц}}$ - інерційна похибка затвора ($\pm 0,5 - 2\%$);

$\Delta_{\text{вібр}}$ - похибка від вібрацій на тензодатчиках ($\pm 0,5 - 2\%$);

$\Delta_{\text{волог}}$ - похибка від неврахованої вологості ($\pm 0,3 - 3\%$);

$\Delta_{\text{стат}}$ - статистична помилка ($\pm 0,2 - 0,5\%$).

У виробничих умовах складів $\Delta_{\text{волог}}$ є найменш передбачуваною та найважливішою контрольованою, після чого вологість заповнювачів змінюється внаслідок зміни залежно від погодних умов і стану відповідності.

Точність дозування безпосередньо впливає на якість готового бетону. Встановлено, що відхилення дозування цементу на $\pm 5\%$ призводить до зміни міцності на $\pm 10 - 30\%$, а відхилення дозування води на $\pm 2\%$ - до зміни рухливості суміші на $\pm 3 - 5$ см. У серійному виробництві збірного залізобетону вимагається, щоб коефіцієнт варіації міцності бетону не перевищував 13,5%, що в свою чергу вимагає надійної стабільності дозування на кожному замісі.

Системи живлення БЗУ проектується з розрахунку на гравітаційне (самопливне) витікання заповнювачів (див. рис. 1.5). Стабільність масової витрати порушується під впливом змінних фізико - механічних властивостей

матеріалів. Найбільш критичним фактором є нерівномірність подачі дрібного заповнювача, що викликає збільшення параметра $\Delta_{\text{інерц}}$ та систематичне порушення водоцементного відношення у готовій суміші.

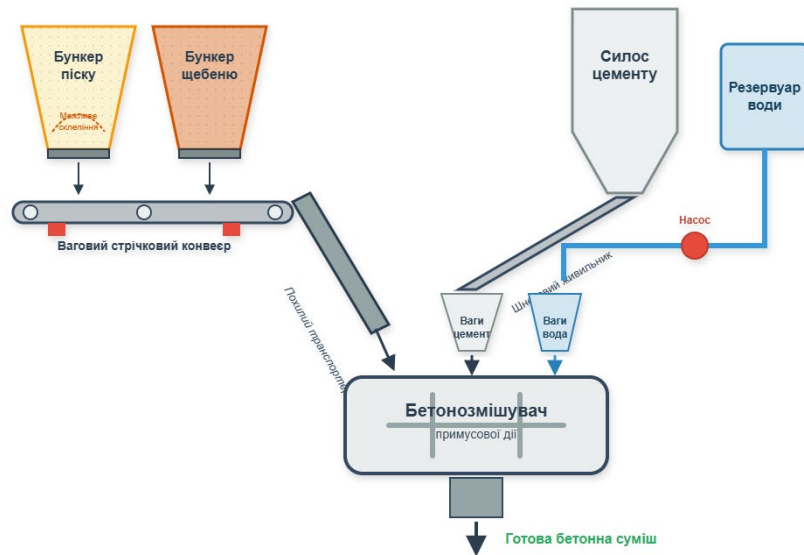


Рис. 1.5 – Традиційна схема системи живлення бетонозмішувальної установки

Таким чином, ключова технологічна вимога до системи живлення БЗУ полягає не лише у забезпеченні нормативної точності дозування в ідеальних умовах, а у збереженні цієї точності при роботі з заповнювачами змінної вологості — в умовах, які є стандартними для реального будівельного виробництва.

1.2. Вплив вологості заповнювачів на стабільність витікання та загальну продуктивність бетонозмішувальних установок

Серед комплексу фізико - механічних властивостей сипких заповнювачів найбільш нестабільним параметром є поверхнева вологість. Залежно від погодних умов вологість піску на відкритих складах змінюється в межах від 0 до 12% [92, 102]. Збільшення вологості кардинально змінює характер взаємодії

частинок. Навколо зерен формуються водні плівки, що генерують капілярні сили зчеплення

$$F_{\text{кап}} = 2\pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos \theta, \quad (1.3)$$

де r - радіус частинки (зерна піску), м; σ - коефіцієнт поверхневого натягу води, Н/м; θ - крайовий кут змочування, град.

Зростання сил $F_{\text{кап}}$ призводить до стрімкого збільшення ефективного кута внутрішнього тертя матеріалу. З точки зору механіки сипких тіл [71, 78], стабільний масовий режим трансформується у нестабільний воронковий режим. Наслідком є утворення динамічних і статичних склепінь над розвантажувальним отвором бункера.

Вплив вологості на продуктивність БЗУ та точність дозування підтверджено експериментальними дослідженнями роботи установки номінальною продуктивністю 60 м³/год (бункер піску $V = 12$ м³, отвір 800x300 мм) [98, 102]. Результати зведено у таблицю 1.2 (див. рис. 1.6)

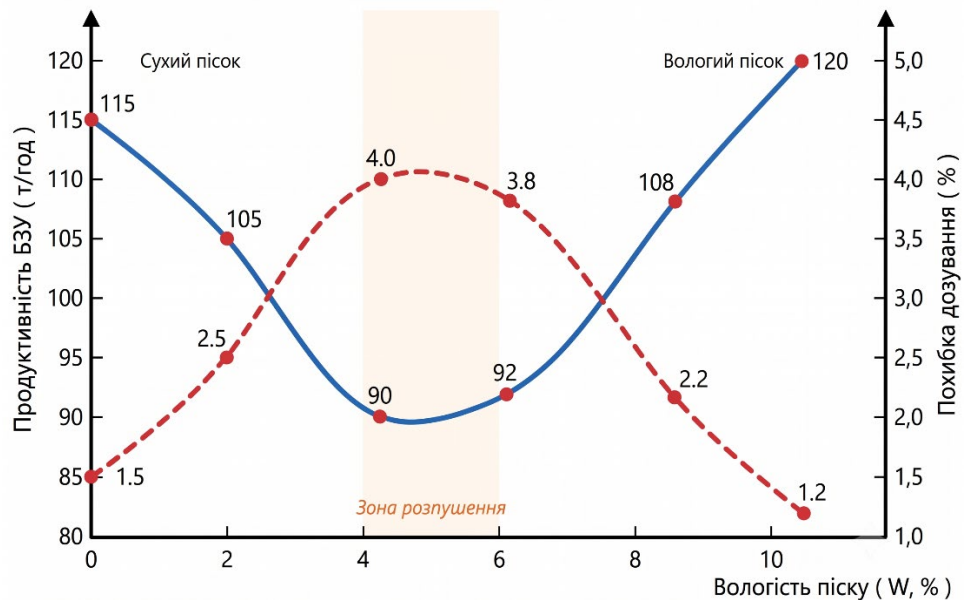


Рис 1.6 - Графік залежності продуктивності БЗУ та похибки дозування від вологості піску.

Зміна насипної густини в діапазоні 10 - 16% при зміні вологості на 1 - 4% безпосередньо впливає на точність вагового дозування. Якщо система дозування калібрувалась на сухому матеріалі, то при вологому піску ($W = 6\%$) за тієї ж маси доза заповнювача фактично відрізняється від розрахункової. Кількісну картину відхилень наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Вплив вологості на насипну густину піску та похибку дозування

Вологість, %	Насипна густина піску, кг/м ³	Зміна відносно сухого стану, %	Коефіцієнт внутрішнього тертя, μ
0 (сухий)	1550 - 1600	-	0,30 - 0,35
2	1480 - 1520	- 4... - 5	0,35 - 0,42
4-6 (критична)	1400 - 1450	- 8... - 10	0,45 - 0,55
8	1600 - 1650	+3...+6	0,55 - 0,65
10-12	1720 - 1800	+10...+16	0,60 - 0,70

Дані таблиці 1.3 показують, що при роботі в діапазоні вологості 4 - 10% коефіцієнт внутрішнього тертя піску зростає від 0,35 до 0,65. Саме це зростання тертя є фізичною причиною переходу від масового до воронкового режиму течії в бункері.

Критичним наслідком підвищеної вологості є збільшення водоцементного відношення при незмінній дозі води за рецептурою. Якщо до змішувача потрапляє 1000 кг вологого піску ($W = 6\%$) замість сухого, вміст вологи в ньому складає

$$m_{\text{вода}} = 1000 - 1000 / (1 + 0,06) \approx 57 \text{ кг}, \quad (1.4)$$

При розрахунковій дозі води 200 кг і масі цементу 400 кг фактичне В/Ц зростає до

$$В/Ц_{\text{факт}} = (200 + 57) / 400 = 0,64 \text{ замість проєктного } 0,50, \quad (1.5)$$

Таке відхилення В/Ц призводить до зниження міцності бетону на 15 - 20%, що є неприпустимим для відповідальних залізобетонних конструкцій. Залежність фактичного В/Ц від вологості заповнювачів ілюструє рисунок 1.7.

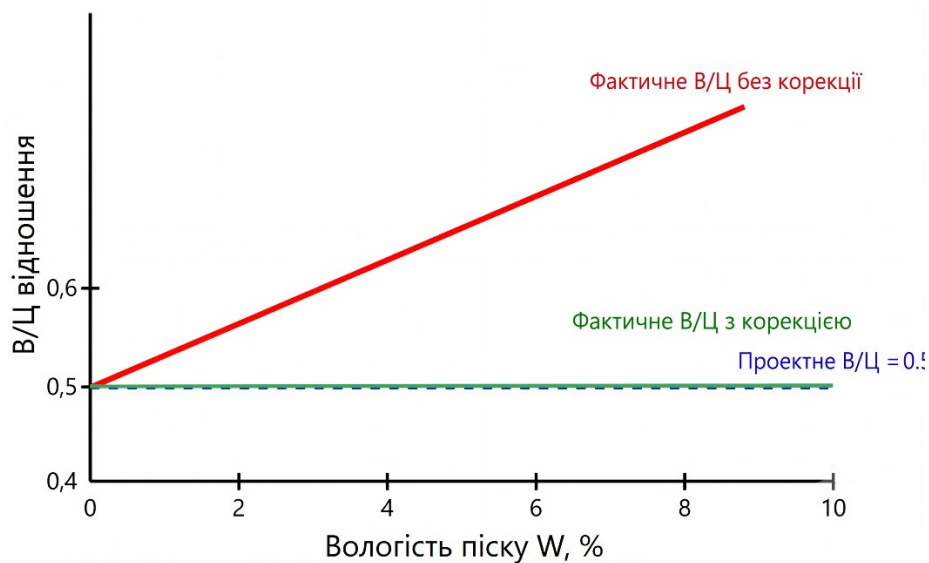


Рис. 1.7. Вплив вологості заповнювачів на фактичне В/Ц відношення

Крім впливу на точність дозування, підвищена вологість безпосередньо знижує продуктивність установки через утворення склепін у бункерах. Виміряні на виробництві дані показують, що при вологості піску понад 5–6% частота аварійних зупинок через склепіння різко зростає - до 6 - 10 разів за зміну. Залежність частоти склепін від вологості подано на рисунку 1.8.

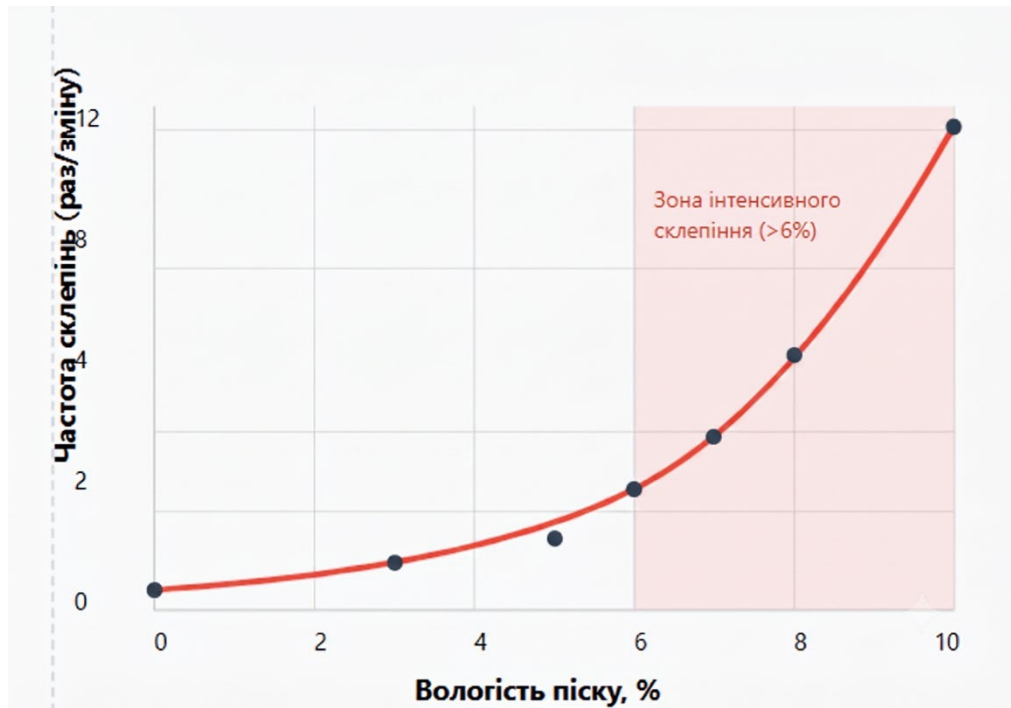


Рис. 1.8. Залежність частоти утворення склепін у бункері від вологості піску

Кожна така зупинка тривалістю 5 - 15 хвилин є прямими втратами продуктивності. Для установки продуктивністю 60 м³/год при 6 зупинках за зміну сумарні втрати складають 30 - 90 хвилин, або 12 - 25% змінного фонду часу. В перерахунку на об'єм недовиробленої продукції це 6 - 18 м³ на зміну.

Оптимізація рецептури через вимірювання вологості датчиками є загальноприйнятим підходом, проте він вирішує лише задачу точності дозування, але не проблему нестабільності подачі - склепіння продовжують виникати незалежно від наявності датчиків вологості. Усунення причини нестабільності (зміни режиму течії) є якісно іншим завданням, яке і розглядається у даній роботі.

1.3. Аналіз існуючих конструкцій дозуючих комплексів і методів запобігання склепінноутворенню в бункерах

Дозування компонентів – одна з ключових операцій у процесі приготування бетонної суміші. Від точності цього етапу залежить не тільки якість кінцевого продукту, але й витрати сировини, енергії, тривалість циклу та загальна продуктивність бетонозмішувальної установки [82].

Дозуючий комплекс бетонозмішувальної установки включає систему бункерів, живильників, ваговимірювальних пристроїв та затворів. Стабільність роботи всього комплексу визначається в першу чергу стабільністю подачі матеріалу з бункерів - нерівномірна або переривчаста подача унеможливорює точне дозування навіть за наявності найсучаснішого вагового обладнання.

Система живлення типової БЗУ включає: бункери тимчасового зберігання місткістю 3 - 20 м³; живильники (стрічкові, гвинтові або вібраційні); затвори або шибери з часом спрацювання 0,3–1,5 с; вагові мірники на тензодатчиках. Функціональна схема системи живлення наведена на рисунку 1.9.

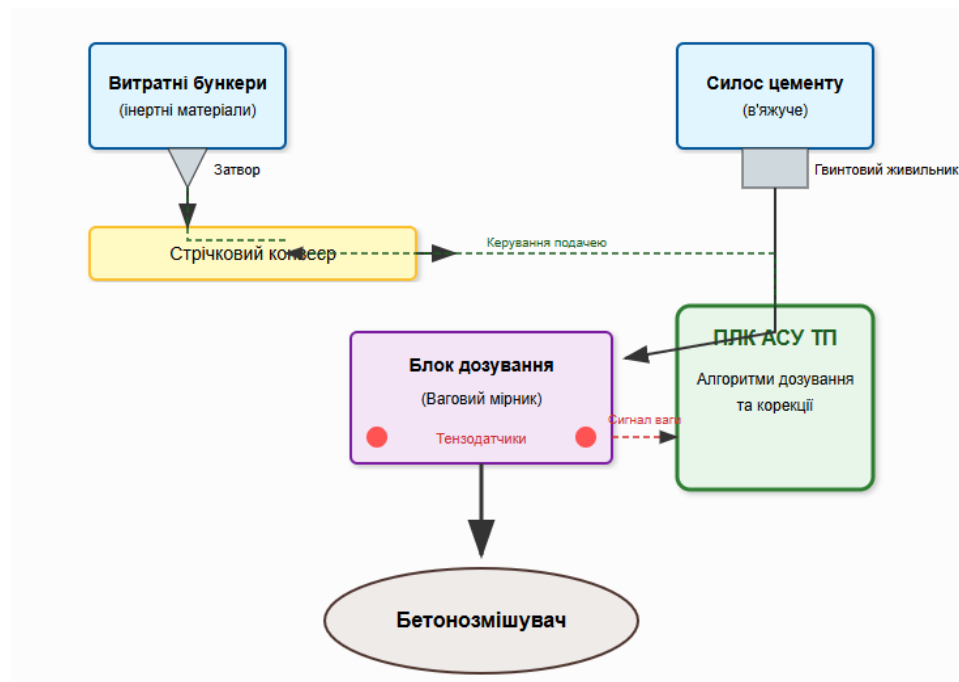


Рис. 1.9. Функціональна схема системи живлення БЗУ

Явище склепіння полягає у мимовільному утворенні стійкої арки з частинок матеріалу над випускним отвором бункера. Арка утворюється тоді, коли міжчастинкові сили зчеплення (капілярні при підвищеній вологості) разом із силами тертя між частинками та стінками бункера перевищують рушійну вагу стовпа матеріалу над отвором. У цьому стані витікання повністю припиняється.

Технологічна недосконалість традиційних БЗУ передусім проявляється у проблемах транспортування та дозування вологих матеріалів. Склепіння та злипання інертних заповнювачів у бункерах призводять до порушення рівномірності подачі (коефіцієнт варіації продуктивності сягає 15 - 25%) та вимушених зупинок установки на 5 - 15 хвилин для ручного втручання. Згідно з рис. 1.8, при підвищенні вологості піску понад 5-6% частота утворення склепінь різко зростає до 6 - 10 разів за зміну, що сумарно спричиняє втрату до 25% робочого часу [102]. Необхідність ручного руйнування заторів вібраторами або штангами не лише створює ризики травмування персоналу, а й унеможлиблює повну автоматизацію виробництва.

Додатковим критичним фактором є відсутність адаптації системи до змін вологості заповнювачів у реальному часі. Без відповідних датчиків зміна вологості піску з 2% до 8% залишається непоміченою системою, що призводить до неконтрольованого збільшення водоцементного відношення (В/Ц) на 0,10-0,15. Як наслідок, міцність бетону знижується на 18-25%, зростає його пористість та погіршуються показники морозостійкості [103]. Ситуацію ускладнює низька гнучкість у зміні рецептури: переналаштування традиційних БЗУ триває 15-30 хвилин, що робить виробництво малих партій різних марок бетону економічно неефективним порівняно з сучасними адаптивними системами [104].

Два режими течії матеріалу в бункері - масовий і воронковий - принципово відрізняються за стабільністю подачі. При масовому режимі весь об'єм матеріалу рухається одночасно, застійні зони відсутні, продуктивність витікання стабільна. При воронковому режимі рух відбувається лише у центральному каналі над

отвором, біля стінок утворюються «мертві зони», а схильність до утворення стійких склепінь різко зростає. Перехід між режимами визначається критерієм Дженіке: масовий режим можливий лише при

$$\alpha > \alpha_{кр} = \arctg(\mu / \cos \beta) + \beta + (10...15^\circ), \quad (1.6)$$

де α - кут нахилу стінок бункера до горизонталі; β - кут внутрішнього тертя матеріалу (30- 45°); μ - коефіцієнт тертя. При вологості понад 5- 6% кут тертя піску зростає до 45- 55°, що вимагає кута стінок $\alpha \geq 75- 85^\circ$ - конструктивно нереального для виробничих бункерів. Стандартні бункери БЗУ мають кут стінок 55–65°, що при підвищеній вологості переводить режим течії у воронковий.

Для вирішення цієї проблеми в промисловості застосовують кілька типів пристроїв, порівняльний аналіз яких наведено у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Порівняльний аналіз методів запобігання склепінноутворенню в бункерах

Метод	Принцип дії	Ефективність, %	Споживана потужність, кВт	Недолік
Вібратори на стінках	Вібраційне руйнування склепіння після його утворення	60 – 75	0,5 - 2,0	Не запобігає, лише усуває
Пневмоударники	Імпульсний удар стисненим повітрям	70 – 85	0,2 - 0,5 + компресор	Потрібен компресор, шум
Рухомі шибери	Механічне розрізання склепіння	80 – 90	1,0 - 3,0	Не запобігає повторному утворенню
Активні розпушувачі (гвинтові, лопатеві)	Безперервне руйнування зони формування склепіння	90 – 98	2,0 - 5,0	Відсутнє наукове обґрунтування параметрів залежно від W і d
Комбіновані системи	Вібрація + розпушувач	95 – 99	3,0 - 7,0	Висока вартість

Аналіз таблиці 1.4 показує, що активні розпушувачі є найбільш ефективним класом пристроїв - єдиним, що діє превентивно, запобігаючи утворенню склепінь, а не усуваючи їх після виникнення. Ефективність 90 - 98% підтверджена виробничою практикою. Однак принципова слабкість усіх відомих конструкцій полягає в емпіричному підборі кінематичних параметрів: частота обертання та геометрія робочих органів призначаються конструктором «за досвідом» без аналітичного зв'язку з фізичними властивостями конкретного матеріалу.

Значний інтерес для вирішення проблеми склепінноутворення представляють конструкції активних механічних розпушувачів (ворушителей), що встановлюються безпосередньо над розвантажувальним отвором бункера. Типовим представником такого класу обладнання є лопатеві або штирьові розпушувачі (див. рис. 1.10).

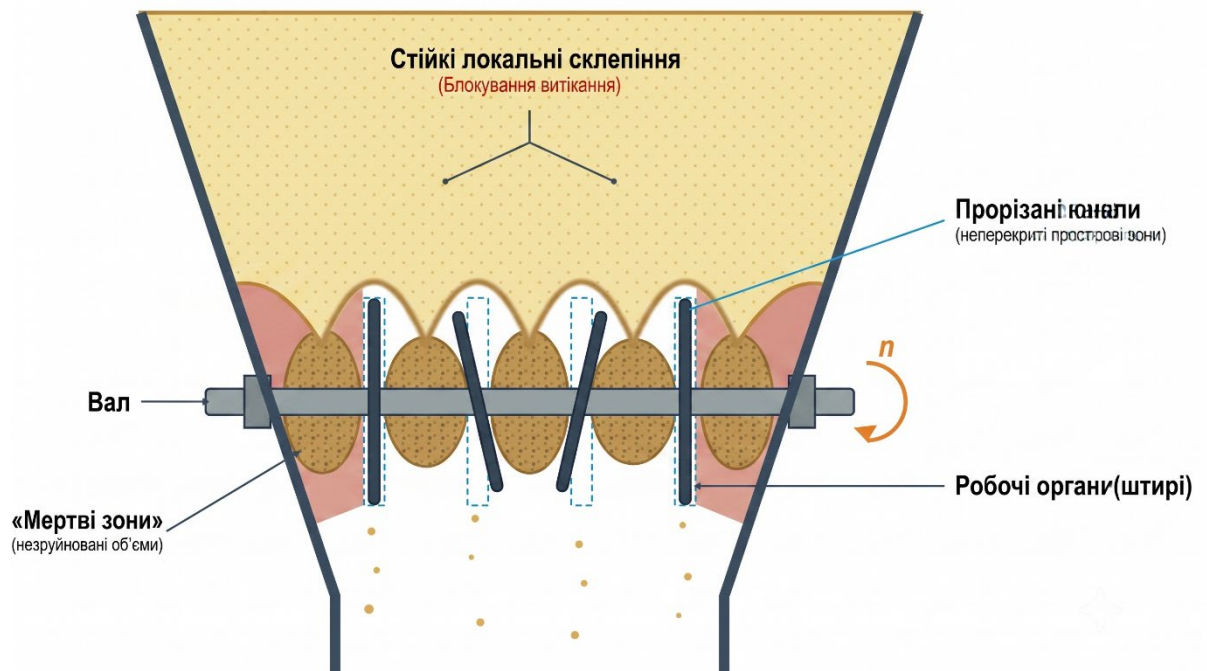


Рис. 1.10. Розпушувач сипких матеріалів

Принцип дії подібних пристроїв полягає у механічному руйнуванні коагуляційних зв'язків у масиві вологого матеріалу за рахунок обертання вала з

радіально закріпленими робочими органами. Однак детальний кінематичний аналіз існуючих конструкцій виявляє їхній суттєвий недолік — наявність неперекритих просторових зон (так званих, «мертвих зон»).

Як видно з наведеної конструктивної схеми (рис. 1.10), просторове розташування робочих органів (штирів) вздовж осі вала не має строгого ортогонального перекриття. Відстань між суміжними штирями та кут їхнього просторового зміщення підібрані емпірично. При обертанні такого вала у вологому піску (при $W > 5-6\%$) штирі прорізають у матеріалі локальні канали, проте між цими каналами залишаються незруйновані об'єми матеріалу. Капілярні сили у цих «мертвих зонах» виявляються достатніми для формування стійких локальних склепінь. Утворені ущільнення зависають на стінках або починають обертатися разом із валом як єдине ціле, блокуючи витікання.

Іншим поширеним варіантом є використання суцільних гвинтових спіралей (шнеків) у бункерах. Проте суцільна гвинтова поверхня створює значний крутний момент опору в щільному середовищі вологого піску, що вимагає застосування приводів надмірної потужності та призводить до високих питомих енерговитрат.

Спільним критичним недоліком проаналізованих аналогів [69, 70, 71, 100] є відсутність наукового обґрунтування кінематики робочих органів. Для повного усунення «мертвих зон» і забезпечення гарантованого переходу потоку в масовий режим необхідно змінити підхід до проектування розпушувачів. Вирішення задачі вбачається у встановленні суміжних штирів на центральному валу із суворо заданим просторовим кутовим зміщенням на 90° . Таке компонування забезпечить взаємне ортогональне перекриття траєкторій руху штирів та безперервне руйнування коагуляційних зв'язків у всьому об'ємі матеріалу над розвантажувальним отвором.

Саме ця відсутність аналітичного зв'язку між кінематичними параметрами розпушувача і режимом течії матеріалу і є невирішеною науковою проблемою,

яка унеможливилює проектування систем живлення з гарантованою стабільністю дозування.

1.4. Обґрунтування напрямку досліджень

Проведений аналіз засвідчив наявність невирішеної науково-технічної задачі: забезпечення нормативної точності дозування ($\pm 3\%$) в умовах мінливої вологості піску, яка ініціює утворення динамічних склепінь. Існуючі методи боротьби зі склепінням є неефективними або призводять до віброущільнення вологих заповнювачів.

Вирішення проблеми полягає у розробці активного механічного розпушувача з обґрунтованими кінематичними параметрами, який здатен примусово переводити режим течії з воронкового в масовий шляхом безперервного руйнування склепінь.

Конкретно: у технічній літературі та патентній документації відсутня відповідь на питання - при якій мінімальній частоті обертання розпушувача і якій довжині його штирів масова витрата матеріалу стає незалежною від вологості при заданій продуктивності установки? Без відповіді на це питання параметри розпушувача підбираються емпірично для кожної установки окремо, а гарантований результат неможливий.

Дане дослідження спрямоване на вирішення цієї проблеми шляхом теоретичного обґрунтування умов стабілізації режиму течії та встановлення аналітичних залежностей між кінематичними параметрами розпушувача і стабільністю дозування.

1.5. Висновки до розділу 1. Мета та задачі дослідження

1. Аналіз конструкцій бетонозмішувальних установок для виробництва монолітного та збірного залізобетону показав, що нормативні вимоги до точності дозування заповнювачів ($\pm 2 - 3\%$ за ДСТУ Б В.2.7-96-2000) систематично порушуються при роботі з матеріалами змінної вологості. Основна причина - нестабільність подачі, а не похибки власне дозувального обладнання.

2. Встановлено, що при вологості піску понад 5 - 6% коефіцієнт варіації продуктивності системи живлення зростає до 15 - 25%, частота повних зупинок подачі досягає 6–10 разів за зміну, а сумарні втрати продуктивності становлять до 25% змінного фонду часу. Зміна вологості на 1 - 2% призводить до зміни насипної густини на 10–16%, що вносить систематичну похибку дозування $\pm 3 - 7\%$ незалежно від налаштувань системи керування.

3. Фізичною причиною нестабільної подачі є перехід режиму течії матеріалу у бункері з масового у воронковий внаслідок зростання ефективного кута внутрішнього тертя при підвищеній вологості. Критерій Дженіке показує, що при вологості піску понад 5 - 6% стандартна геометрія виробничих бункерів (кут стінок 55 - 65°) не забезпечує масову течію.

4. Аналіз існуючих методів запобігання склепінноутворенню показав, що активні розпушувачі є єдиним класом пристроїв з ефективністю 90 - 98%, що діє превентивно. Однак у технічній та патентній документації відсутнє аналітичне обґрунтування їх кінематичних параметрів: вибір частоти обертання та геометрії робочих органів здійснюється емпірично без зв'язку з фізичними властивостями матеріалу.

5. Виявлена невирішена проблема: жодна з відомих конструкцій і жодна з існуючих математичних моделей не встановлює умов, за яких масова витрата матеріалу стає незалежною від вологості. Відсутність аналітичного зв'язку між

кінематичними параметрами розпушувача та режимом течії унеможливилося проектування систем живлення з гарантованою стабільністю дозування.

Сформульована невирішена проблема визначає мету та задачі даного дослідження.

Метою дисертаційної роботи є обґрунтування конструктивних та кінематичних параметрів системи живлення бетонозмішувальної установки для виробництва монолітного та збірного залізобетону, що забезпечують стабільність масової витрати та точність дозування сипких матеріалів незалежно від їх вологості за рахунок переведення режиму течії з воронкового в масовий шляхом активного механічного розпушування..

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

1. Встановити причини нестабільності дозування та зниження продуктивності систем живлення бетонозмішувальних установок при використанні заповнювачів зі змінною вологістю.

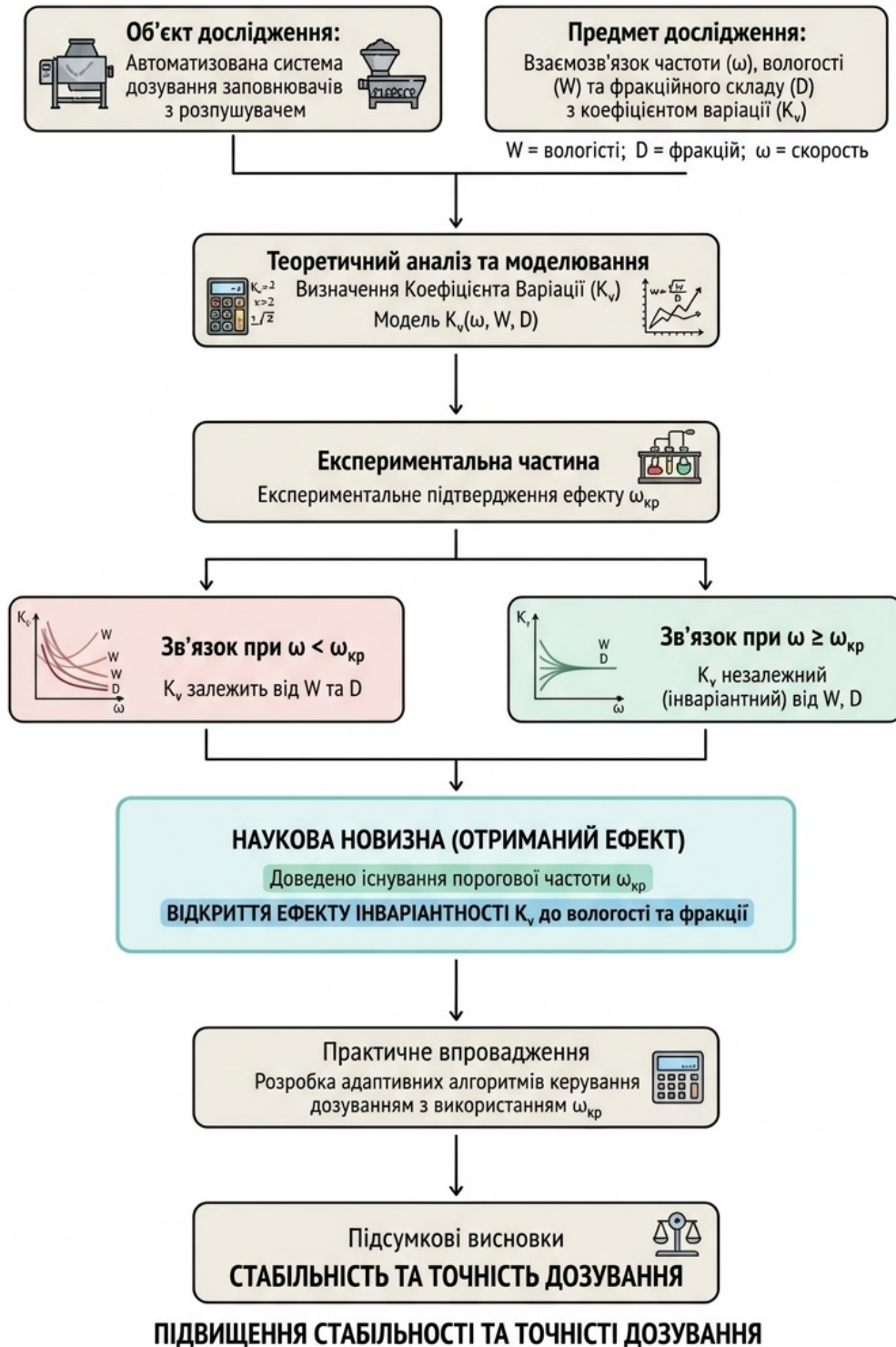
2. Теоретично обґрунтувати умови переходу від воронкового до масового режиму течії вологих матеріалів через зниження ефективного кута внутрішнього тертя шляхом механічного руйнування динамічних склепінь.

3. Встановити математичні залежності для визначення мінімально необхідної частоти обертання та довжини штирів розпушувача із кутовим зміщенням 90° , за яких масова витрата матеріалу стає незалежною від його вологості та фракції.

4. Експериментально визначити порогову частоту обертання розпушувача як функцію вологості та фракційного складу матеріалу і перевірити адекватність розробленої теоретичної моделі.

5. Розробити інженерну методику розрахунку конструктивних і кінематичних параметрів розпушувача для бетонозмішувальних установок продуктивністю 30...120 м³/год.

ЗАГАЛЬНА КОНЦЕПЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ



РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМИ ЖИВЛЕННЯ БЕТОНОЗМІШУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

2.1. Наукова передумова щодо стабілізації продуктивності бетонозмішувальних установок шляхом переведення режиму течії заповнювачів у масовий

Результати аналізу, проведеного в розділі 1, засвідчують, що першопричиною нестабільності продуктивності БЗУ є фізична зміна режиму течії вологих сипких матеріалів у бункерах систем живлення. При вологості піску $W > 5 - 6\%$ стандартна геометрія виробничих бункерів (кут нахилу стінок $\alpha = 55 - 65^\circ$) не забезпечує умов для масового режиму течії за критерієм Дженіке [71, 78], що призводить до утворення динамічних склепінь і пульсуючої подачі матеріалу.

Масовий режим течії характеризується одночасним рухом усього стовпа матеріалу над випускним отвором без утворення застійних зон. Умовою масового режиму є відповідність геометрії бункера та фізичних властивостей матеріалу нерівності [78]

$$\varphi_w \leq \varphi_{кр} = f(\delta, \alpha, \mu_w), \quad (2.1)$$

де φ_w - ефективний кут внутрішнього тертя матеріалу при вологості W , град; $\varphi_{кр}$ - критичне значення кута тертя для масового режиму, град; α - кут нахилу стінок бункера, град; μ_w - коефіцієнт тертя матеріалу по стінці.

Ключовою залежністю є зв'язок між вологістю W та ефективним кутом внутрішнього тертя φ_w . За даними власних досліджень [98, 102] та класичних робіт Шульце [67], для піску будівельного

$$\varphi_w = \varphi_0 + k_w \cdot W^n, \quad (2.2)$$

де $\varphi_0 = 17 - 19^\circ$ – кут тертя сухого матеріалу; $k_w \approx 1,8 - 2,2$ - емпіричний коефіцієнт; $n \approx 0,7 - 0,9$; W - абсолютна вологість, %.

Таблиця 2.1 демонструє зростання ефективного кута внутрішнього тертя зі зростанням вологості та зміну режиму течії у бункері з $\alpha = 60^\circ$.

Таблиця 2.1 – Залежність ефективного кута внутрішнього тертя піску від вологості та режиму течії ($\alpha = 60^\circ$, пісок будівельний $d = 0,5 - 2,0$ мм)

Вологість W , %	Насипна густина ρ , кг/м ³	Ефективний кут тертя φ_w , град	Коефіцієнт тертя μ_w	Режим течії
0 (сухий)	1550–1600	17–19	0,30–0,35	Масовий
2	1480–1520	21–25	0,38–0,45	Масовий/перехідний
4	1400–1450	28–33	0,47–0,55	Воронковий
6	1410–1460	33–38	0,55–0,63	Воронковий
8	1600–1650	37–42	0,60–0,68	Воронковий
10–12	1720–1800	40–46	0,62–0,70	Воронковий

Дані таблиці 2.1 підтверджують: при $W \geq 4\%$ кут тертя піску сягає $28 - 33^\circ$, що для бункера $\alpha = 60^\circ$ відповідає воронковому режиму. Повернення до масового режиму шляхом зміни кута стінок вимагало б $\alpha \geq 75 - 85^\circ$, що конструктивно неприйнятно [71, 78].

На підставі викладеного сформульовано наукову гіпотезу дослідження:

Переведення режиму течії вологих сипких матеріалів з воронкового в масовий без зміни геометрії бункерів БЗУ ($\alpha = 60^\circ$) можливе шляхом штучного зниження ефективного кута внутрішнього тертя φ_w нижче критичного значення $\varphi_{кр}$ – механічним руйнуванням капілярних зв'язків між частинками безпосередньо над розвантажувальним отвором активним розпушувачем, штирі

якого розташовані з кутовим зміщенням 90° та обертаються з частотою, що перевищує порогове значення $\omega_{кр}$.

Механічний вплив розпушувача описується поняттям зниженого ефективного кута $\varphi_{еф}$

$$\varphi_{еф} = \varphi_w - \Delta\varphi(\omega, R_{ш}), \quad (2.3)$$

де $\Delta\varphi(\omega, R_{ш})$ – декремент зниження ефективного кута тертя під дією розпушувача як функція кутової швидкості ω (рад/с) та довжини штирів $R_{ш}$ (м).
Умова переходу до масового режиму

$$\Delta\varphi(\omega, R_{ш}) > \varphi_w - \varphi_{кр} = \Delta\varphi_{необх}. \quad (2.4)$$

Отже, теоретичне доведення висунутої наукової гіпотези зводиться до аналітичного визначення умов виконання нерівності (2.4). Для вирішення цього завдання у подальших підрозділах необхідно послідовно розкрити фізико-механічний механізм формування динамічних склепінь, побудувати математичну модель впливу кінематичних параметрів розпушувача на декремент зниження ефективного кута внутрішнього тертя, а також отримати аналітичні закономірності зміни масової витрати матеріалу при примусовому переході до масового режиму течії.

2.2. Фізико - механічні особливості формування динамічних склепінь вологих матеріалів у бункерах систем живлення

Теоретична модель, що розробляється, описує поведінку вологого дрібнозернистого сипкого матеріалу у зоні розвантажувального отвору бункера.

Аналіз ґрунтується на теорії граничних рівноваг сипких тіл (класичні роботи Дженіке [71], Нідерманна [78] та Шульце [67]) та теорії капілярних явищ (роботи Брауна та Річардса [77]).

Склепіння у бункері — це мимовільне утворення стійкої «арки» з частинок матеріалу над випускним отвором, що повністю блокує витікання. Для розуміння умов його формування необхідно розглянути сили, що діють на частинку сипкого матеріалу в зоні отвору.

При розробці аналітичної моделі прийнято такі допущення:

1. Сипке середовище (вологий пісок) вважається макроскопічно ізотропним, нестисливим тілом у межах об'єму випускної лійки.
2. Процес руйнування склепіння розглядається як квазістаціонарний.
3. Вплив зовнішніх вібрацій від сусідніх механізмів БЗУ на напружено-деформований стан матеріалу в зоні випуску не враховується.
4. Розподіл вологості у локальному об'ємі над розвантажувальним отвором приймається рівномірним.

У сухому піску взаємодія між зернами визначається виключно силами тертя та пружними реакціями контактів. Поява поверхневої вологи призводить до утворення рідинних менісків у контактних зонах між частинками. Капілярна сила зчеплення між двома сферичними частинками радіуса r , що утворюють торичний мениск, визначається залежністю [67, 77]

$$F_{\text{кап}} = 2\pi \cdot r \cdot \sigma \cdot \cos \theta + \pi \cdot r^2 \cdot \Delta p_{\text{к}}, \quad (2.5)$$

де r — середній радіус зерна піску, м; $\sigma = 0,0728$ Н/м — коефіцієнт поверхневого натягу води при $T = 20^\circ\text{C}$; $\theta \approx 0^\circ$ — крайовий кут змочування кварцового піску; $\Delta p_{\text{к}}$ — перепад тиску у меніску, Па.

Перепад тиску у рідинному меніску визначається рівнянням Лапласа

$$\Delta p_k = \sigma \cdot \left(\frac{1}{R^1} + \frac{1}{R^2} \right), \quad (2.6)$$

де R_1, R_2 – головні радіуси кривизни меніску, м. Для типових зерен піску будівельного ($d = 0,5\text{--}2,0$ мм) при $W = 4\text{--}6\%$ питома капілярна сила складає $\frac{F_{\text{кап}}}{(\pi \cdot r^2)} = 100\text{--}500$ Па. Ця величина, незначна для окремого контакту, стає критичною при множинній взаємодії у масиві матеріалу над розвантажувальним отвором [67, 77].

Зв'язок між вологістю W та сумарним когезійним зусиллям у шарі матеріалу (когезія $C(W)$)

$$C(W) = C^0 + \beta \cdot W^m, \quad (2.7)$$

де $C_0 \approx 0$ Па – залишкова когезія абсолютно сухого матеріалу; $\beta \approx 120\text{--}180$ Па/% – коефіцієнт капілярного зміцнення; $m \approx 0,8\text{--}1,2$ – показник степеня (залежить від фракції: для $d = 0,5\text{--}1,0$ мм $m \approx 0,9$; для $d = 1\text{--}5$ мм $m \approx 0,8$).

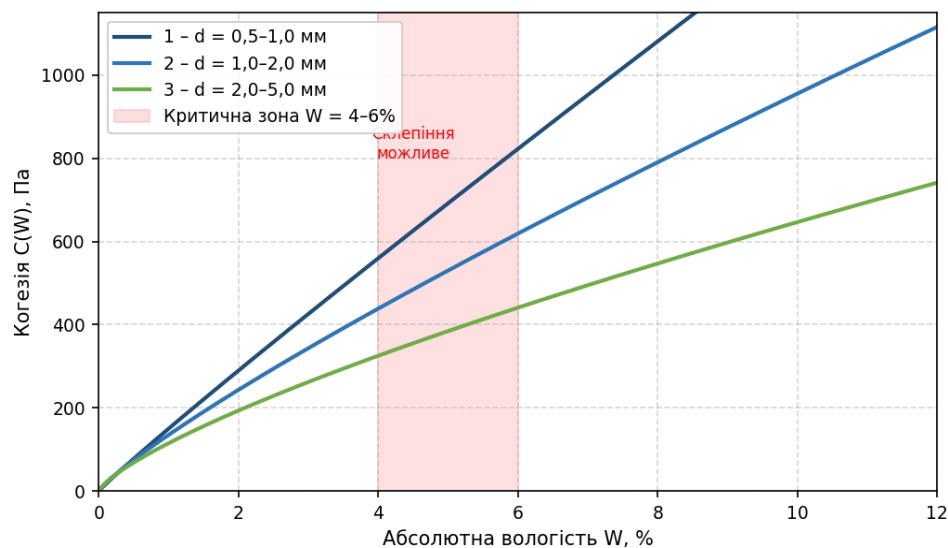


Рис. 2.2. Розрахункова залежність когезії піску $C(W)$ від абсолютної вологості для різних фракцій (формула 2.7, параметри за [67, 98]): 1 – $d = 0,5\text{--}1,0$

мм; 2 – $d = 1,0\text{--}2,0$ мм; 3 – $d = 2,0\text{--}5,0$ мм. Зростання когезії зі збільшенням W є основною причиною утворення склепінь

Для аналізу умов формування склепіння розглянемо напружений стан матеріалу над розвантажувальним отвором прямокутного бункера шириною B та довжиною L . Вертикальне напруження на глибині z від поверхні матеріалу в бункері описується рівнянням Янссена з урахуванням когезії [78]

$$\sigma_{v(z)} = \frac{\rho \cdot g \cdot R_h}{k_w \cdot \mu} \cdot \left[1 - \exp\left(-k_w \cdot \mu \cdot \frac{z}{R_h}\right) \right] + \frac{C(W)}{\mu \cdot k_w}, \quad (2.8)$$

де ρ – насипна густина матеріалу, кг/м^3 ; g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ; $R_h = B \cdot \frac{L}{2 \cdot (B+L)}$ – гідравлічний радіус поперечного перерізу бункера, м; $k_w = \frac{1 - \sin \varphi_w}{1 + \sin \varphi_w}$ коефіцієнт бічного тиску (коефіцієнт Rankine); μ – коефіцієнт тертя матеріалу по стінці; $C(W)$ – когезія матеріалу, Па.

На рис. 2.3 зображено діаграму межі Мора–Кулона для піску при різних вологостях. Зростання W одночасно збільшує і перетин (когезію $C(W)$) і нахил ($\tan(\varphi_w)$) лінії міцності - обидва ефекти сприяють утворенню склепінь.

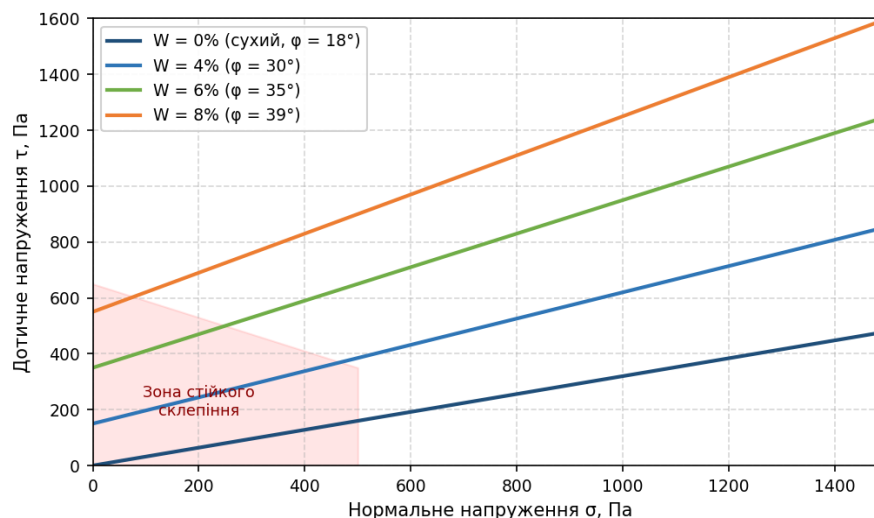


Рис. 2.3. Лінії межі Мора–Кулона для піску при різній вологості: зростання когезії $C(W)$ та кута тертя φ_w зі збільшенням W (побудовано за формулами 2.2 та 2.7).

Суттєве зміщення ліній при $W = 6\%$ і $W = 8\%$ пояснює критичний характер цього діапазону вологості

Динамічне склепіння утворюється тоді, коли горизонтальні напруження стиску σ_h у тонкому шарі матеріалу безпосередньо над розвантажувальним отвором перевищують дотичні напруження руйнування τ_f цього шару. Умова рівноваги склепіння у формі параболічної арки над отвором шириною B [71]

$$\sigma_h \geq \tau_f = C(W) + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}(\varphi_w), \quad (2.9)$$

де σ_n – нормальне напруження у площині арки, Па; φ_w – ефективний кут внутрішнього тертя при вологості W , град.

Оскільки $\sigma_h \sim k_w \cdot \sigma_v$ і $\sigma_n \sim \sigma_v$, підстановка (2.8) у (2.9) після перетворень дає критичну ширину отвору $B_{кр}$, нижче якої склепіння є стійким

$$B_{кр} = 2 \cdot C(W) \cdot \frac{(1 + \sin \varphi_w)}{[\rho \cdot g \cdot \sin \varphi_w \cdot (1 - \sin \varphi_w)]}. \quad (2.10)$$

Формула (2.10) є узагальненим критерієм Дженіке для матеріалу з когезією $C(W)$ та кутом тертя φ_w [71]. При $B > B_{кр}$ – склепіння нестійке і самостійно руйнується; при $B < B_{кр}$ – склепіння стійке.

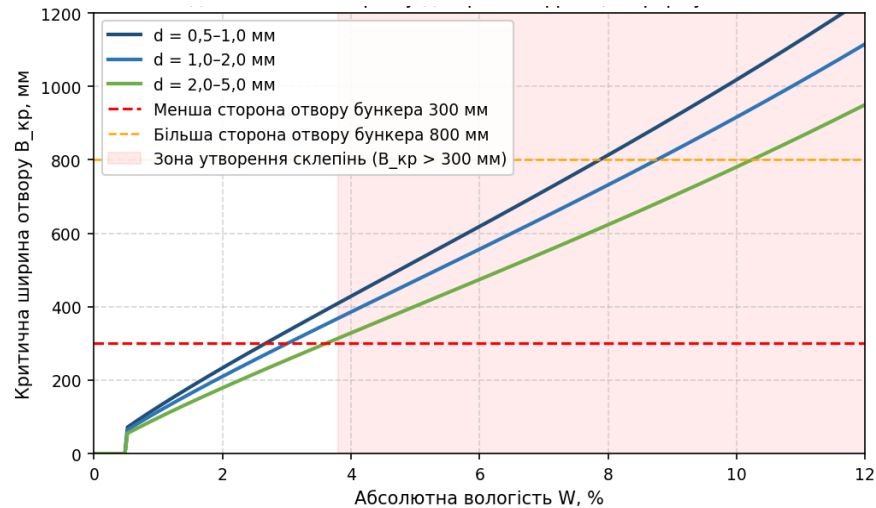


Рис. 2.4. Залежність критичної ширини розвантажувального отвору $V_{кр}$ від вологості матеріалу для різних фракцій (формула 2.10).

Червона пунктирна лінія – фактична менша сторона отвору бункера БЗУ (300 мм); при $W \geq 5-6\%$ $V_{кр}$ перевищує 300 мм для всіх трьох фракцій

Таблиця 2.2 – Критична ширина розвантажувального отвору $V_{кр}$ для піску будівельного ($\rho = 1450 \text{ кг/м}^3$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, формула 2.10)

W, %	C(W), Па	φ_w , град	$V_{кр}$, мм	Стан отвору 800×300 мм
0	≈ 0	17–19	≈ 0	Вільне витікання
2	120–180	21–25	180–260	Вільне витікання
4	280–380	28–33	380–490	Склепіння можливе
6	450–580	33–38	510–680	Стійке склепіння
8	600–780	37–42	640–870	Стійке склепіння
10	750–920	40–46	780–1050	Стійке склепіння

Дані таблиці 2.2 свідчать: при $W \geq 6\%$ значення $V_{кр} = 510-680 \text{ мм}$ перевищує меншу сторону стандартного отвору бункера БЗУ (300 мм), що гарантує утворення стійких склепінь без зовнішнього механічного втручання. Це безпосередньо підтверджує неможливість забезпечення стабільного витікання

вологого дрібнозернистого матеріалу зі стандартного бункера БЗУ без додаткових технічних засобів.

На відміну від статичного склепіння, що виникає при заповненні нерухомого бункера, динамічне склепіння утворюється безпосередньо в процесі витікання матеріалу. Механізм його формування такий: при воронковому режимі течії периферійні шари матеріалу поступово ущільнюються (когезія $C(W)$ зростає через підвищення тиску при сплюсненні водних плівок між зернами), і в певний момент напруження над отвором задовольняють умову (2.9) — склепіння «замикається», витікання повністю припиняється.

Тиск матеріалу на склепіння від маси стовпа матеріалу продовжує зростати. Коли напруження σ_v перевищить міцність склепіння, воно руйнується, слідує короткочасний імпульс витікання $Q_{\text{імп}} \gg Q_{\text{сер}}$, після чого цикл повторюється. Саме цей механізм пояснює спостережуване пульсуюче витікання при $W = 4\text{--}6\%$ з $CV = 15\text{--}25\%$ та аварійними зупинками 6–10 разів за зміну [98, 102].

Умовою запобігання утворенню динамічних склепінь є безперервне механічне руйнування капілярних зв'язків у зоні їх формування, тобто виконання нерівності

$$\tau_{\text{розп}(\omega, R_{\text{ш}})} \geq \tau_{f(W)} = C(W) + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}(\varphi_w). \quad (2.11)$$

Ліва частина (2.11) – дотичне напруження, що розвивається штирями розпушувача в матеріалі; права – максимальний опір зсуву ущільненого матеріалу. Встановлення аналітичного виразу для $\tau_{\text{розп}(\omega, R_{\text{ш}})}$ з урахуванням горизонтального розташування вала розпушувача є завданням підрозділу 2.3.

2.3. Аналітична модель руйнування склепінь та зниження ефективного кута внутрішнього тертя під дією активного розпушувача

Конструктивна особливість розпушувача, полягає у розміщенні штирів на центральному валу з кутовим зміщенням 90° між суміжними парами та винесенні підшипникових вузлів за межі бункера. Кожне з цих рішень безпосередньо впливає на граничні умови аналітичної моделі та на потужність, що споживається приводом.

Горизонтальна орієнтація вала є принциповою для побудови математичної моделі з кількох причин. По-перше, при горизонтальному валі площина обертання штирів співпадає з вертикальною площиною YZ (вісь X вздовж вала), що означає: вектор сили тяжіння g лежить у цій площині. Як наслідок, проекції сил тяжіння на штирі, що знаходяться в різних кутових положеннях, утворюють рівномірно розподілені тангенціальні та нормальні складові, що забезпечує рівномірне навантаження на вал за один оберт.

По-друге, при горизонтальному розташуванні довжина вала визначається шириною бункера (800 мм), а не його висотою (яка значно більша). Це принципово зменшує прольот вала, підвищує його жорсткість і знижує вигинальний момент, що виникає від сил опору матеріалу.

По-третє, горизонтальний вал не перекриває розвантажувальний отвір бункера, а розміщується над ним по центру - штирі входять у матеріал з боків, не блокуючи центральний канал витікання.

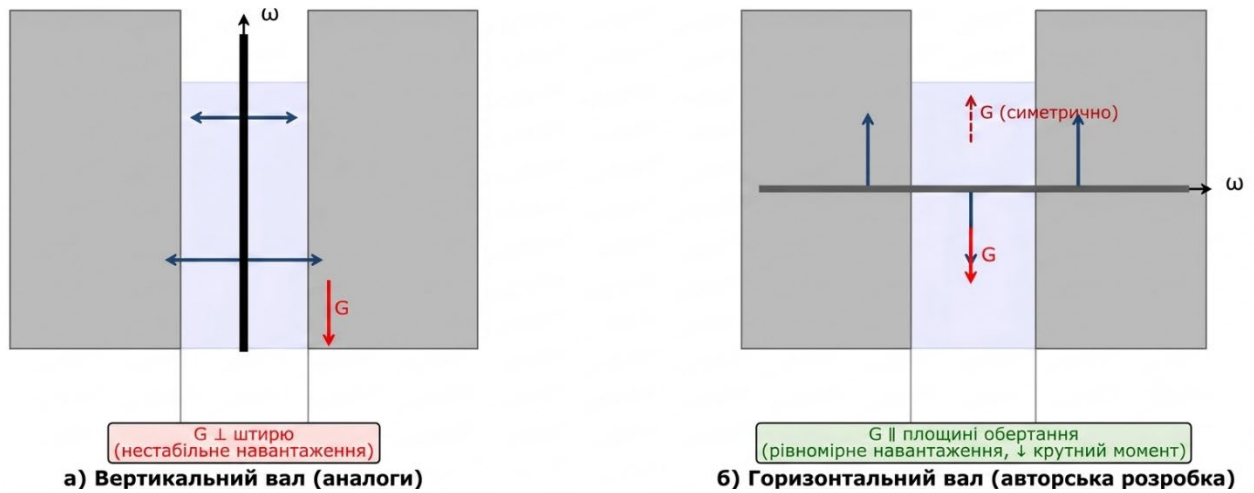


Рис. 2.5. Порівняння схем сил на робочі органи розпушувача при вертикальному (а) та горизонтальному (б) розташуванні вала: при горизонтальному валі вектор сили тяжіння G лежить у площині обертання штирів, що забезпечує рівномірне навантаження на вал і мінімізує знакозмінні вигинальні моменти

Вплив орієнтації вала на граничні умови аналітичної моделі: при горизонтальному валі (вісь X) полярні кути θ_i штирів відраховуються у вертикальній площині YZ . Складова сили тяжіння, що діє на частинку матеріалу поблизу штиря, спрямована вертикально вниз і має проекцію на дотичну до траєкторії руху штиря

$$F_{\text{Tang}} = G \cdot \cos(\theta_i) = m_p \cdot g \cdot \cos\left(\omega \cdot t + (i - 1) \cdot \frac{\pi}{2}\right), \quad (2.11a)$$

де m_p – маса частинки піску, кг. Для чотирьох штирів із кутовим зміщенням 90° сума тангенціальних проекцій гравітаційних сил за один оберт дорівнює нулю, що підтверджує відсутність статичного навантаження на вал від ваги матеріалу, яке змінює знак. Це є теоретичним обґрунтуванням заявленої «великої енергоефективності» конструкції порівняно з вертикальним розташуванням вала.

Рівномірне розташування штирів з кутовим зміщенням 90° між суміжними парами не лише усуває «мертві зони», але й принципово впливає на характер навантаження приводу. Для обґрунтування введемо коефіцієнт рівномірності навантаження $k_{\text{рівн}}$, що являє собою відношення середнього моменту опору до максимального пікового моменту

$$k_{\text{рівн}} = \frac{M_{\text{сер}}}{M_{\text{max}}} = \frac{1}{(1 + k_{\text{пульс}})}, \quad (2.116)$$

де $k_{\text{пульс}}$ – коефіцієнт пульсації моменту (відносна амплітуда змінної складової). Для нерівномірної схеми (2 штирі, кут 180°): $k_{\text{пульс}} \approx 0,60\text{--}0,70$, $k_{\text{рівн}} \approx 0,60$. Для схеми 4 штирі з кутовим зміщенням 90° , при горизонтальному валі

$$k_{\text{пульс}_{90}} = \frac{\left[\max \left(\sum F_{\text{Tang}, i(\theta)} \right) - \sum F_{\text{Tang}, i(\theta)}_{\text{сер}} \right]}{\sum F_{\text{Tang}, i(\theta)}_{\text{сер}}} \approx 0,15 - 0,18, \quad (2.11в)$$

отже $k_{\text{рівн}_{90}} \approx 0,85 - 0,87$. Таким чином, для двигуна з тим самим середнім моментом схема 90° при горизонтальному валі знижує пікове навантаження на вал і привід приблизно у 1,38–1,40 рази порівняно з нерівномірним розміщенням штирів.

Це дозволяє при розрахунку потужності приводу ввести поправочний коефіцієнт $k_{\text{рівн}}$, що враховує рівномірність навантаження

$$N_{\text{привод}} = k_{\text{рівн}} \cdot M_{\text{оп}} \cdot \frac{\omega_{\text{пр}}}{\eta_{\text{ред}}}, \quad (2.11г)$$

де $M_{оп}$ – середній момент опору від матеріалу, Н·м; $\omega_{пр}$ – практична робоча кутова швидкість, рад/с; $\eta_{ред} \approx 0,85$ – ККД мотор-редуктора; $k_{рівн} = 0,72$ для 4 пар штирів із зміщенням 90° при горизонтальному валі.

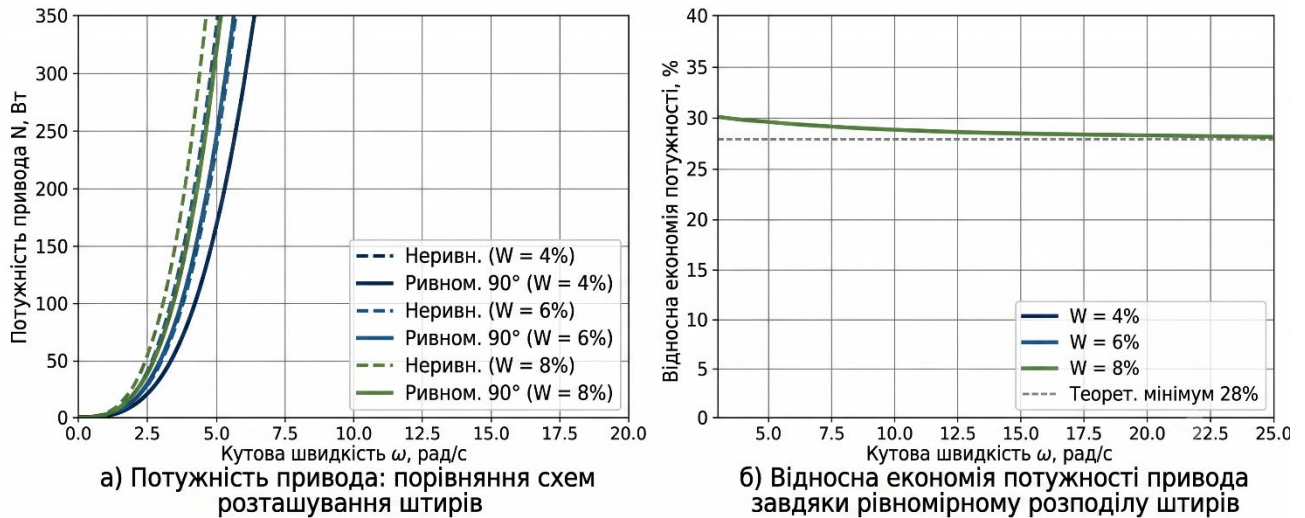


Рис. 2.6. Потужність привода розпушувача при рівномірному (суцільна лінія) та нерівномірному (пунктир) розташуванні штирів: а) абсолютні значення; б) відносна економія потужності. Коефіцієнт $k_{рівн} = 0,72$ забезпечує зниження пікового навантаження на 28% порівняно з нерівномірною схемою

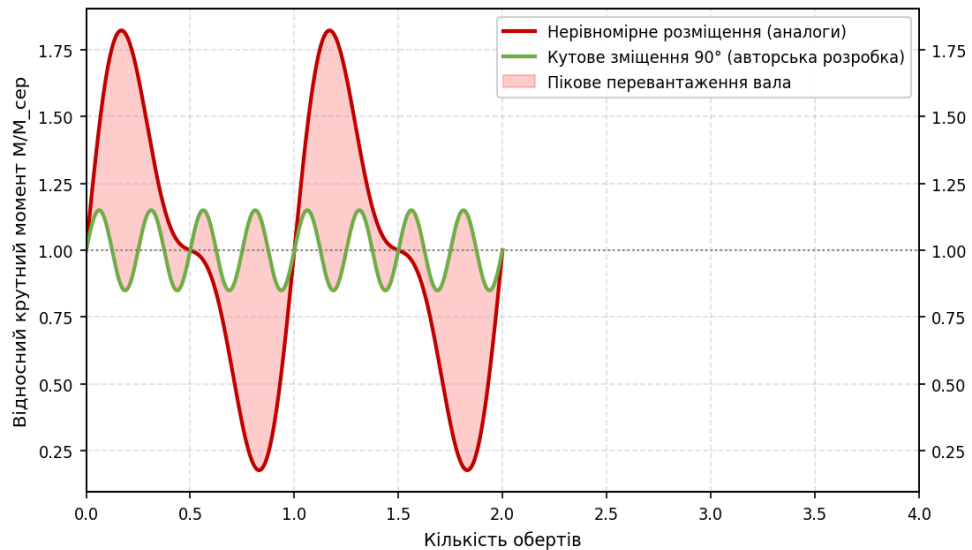


Рис. 2.7. Порівняння крутного моменту на валу розпушувача: рівномірне розміщення під кутом 90° (зелена крива) забезпечує мінімальні коливання

навантаження ($CV \approx 15\%$) порівняно з нерівномірною схемою (червона крива, $CV \approx 60\%$). Зафарбована ділянка — пікове перевантаження вала при нерівномірній схемі

Розглянемо кінематику вала розпушувача, вісь якого розміщена горизонтально вздовж осі X бункера і обертається з кутовою швидкістю ω (рад/с). Штирі закріплені попарно з кутовим зміщенням 90° у площині YZ. Для чотирьох суміжних штирів ($i = 1, 2, 3, 4$) полярні кути у площині обертання

$$\theta_{i(t)} = \omega \cdot t + (i - 1) \cdot \frac{\pi}{2}, \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (2.12)$$

Ця конфігурація гарантує, що будь-яка точка кола радіусом $R_{\text{ш}}$ у площині обертання перетинається траєкторією принаймні одного штиря кожні $\Delta t = \frac{\pi}{2\omega}$ секунд, тобто 4 рази за один повний оберт вала. Зона ефективного впливу розпушувача являє собою кільцевий об'єм над розвантажувальним отвором з внутрішнім радіусом $r_{\text{в}} = \frac{d_{\text{вал}}}{2}$ та зовнішнім радіусом $R_{\text{ш}}$.

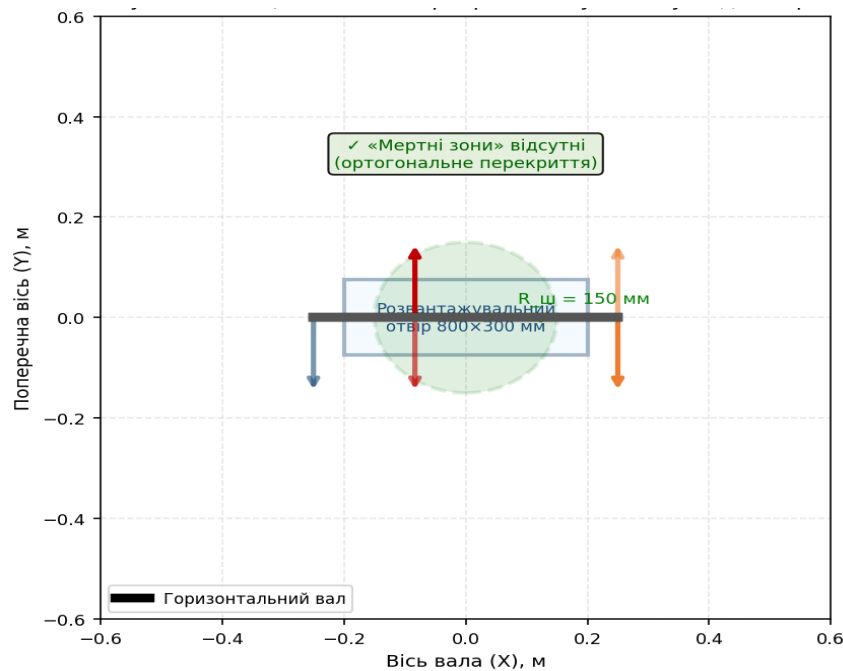


Рис. 2.8. Схема зони перекриття активного розпушувача з горизонтальним валом (вид зверху): чотири пари штирів із кутовим зміщенням 90° забезпечують суцільне ортогональне перекриття зони над отвором 800×300 мм. «Мертні зони» відсутні, що підтверджує аналітична модель

Умовою повного перекриття зони формування склепіння є

$$R_{\text{ш}} \geq \frac{B_{\text{кр}}}{2}, \quad (2.13)$$

де $B_{\text{кр}}$ визначається за формулою (2.10) для максимальної розрахункової вологості матеріалу W_{max} при $W_{\text{max}} = 8\%$ та фракції $d = 0,5\text{--}2$ мм: $B_{\text{кр}} \approx 640\text{--}870$ мм, отже $R_{\text{ш}} \geq 320\text{--}435$ мм. Для бункера 800×300 мм (менша сторона 300 мм): $B_{\text{кр}}(300 \text{ мм})$ відповідає $W \approx 5,5\%$, тоді $R_{\text{ш}} \geq 150$ мм.

При обертанні горизонтального вала штир рухається крізь масив вологого сипкого матеріалу, долаючи опір середовища. Для циліндричного штиря діаметром $d_{\text{ш}}$ та довжиною $L_{\text{ш}} = R_{\text{ш}} - r_{\text{в}}$ при лінійній швидкості кінця штиря $v_{\text{ш}} = \omega \cdot r_{\text{ш}}$, сила опору матеріалу відносному руху [84]

$$F_{\text{оп}} = k_{\text{оп}} \cdot C(W) \cdot d_{\text{ш}} \cdot L_{\text{ш}} \cdot v_{\text{ш}}^2, \quad (2.14)$$

де $k_{\text{оп}} \approx 1,0\text{--}1,3$ – безрозмірний коефіцієнт опору (для циліндра в щільному дисперсному середовищі за аналогією з дослідями [84]); $C(W)$ – когезія матеріалу, Па (формула 2.7). Коефіцієнт $k_{\text{оп}}$ залежить від форми штиря та відносної швидкості руху - для круглого перерізу у вологому піску $k_{\text{оп}} = 1,1$ за результатами уточнення в розділі 3.

Дотичне напруження, що розвивається штирем у матеріалі на радіусі r від осі обертання

$$\tau_{\text{розп}}(r) = \frac{F_{\text{оп}}}{(d_{\text{ш}} \cdot L_{\text{ш}})} = k_{\text{оп}} \cdot C(W) \cdot (\omega \cdot r)^2. \quad (2.15)$$

Умова руйнування склепіння (2.11) з підстановкою (2.15)

$$k_{\text{оп}} \cdot C(W) \cdot \omega^2 \cdot r^2 \geq C(W) + \sigma_n \cdot \operatorname{tg}(\varphi_w). \quad (2.16)$$

При $C(W) \gg \sigma_n$ (що типово для вологого піску з $W > 4\%$: $C(W) \approx 300\text{--}900$ Па, а $\sigma_n \sim \rho \cdot g \cdot h_{\text{арк}} \approx 1450 \cdot 9,81 \cdot 0,05 \approx 700$ Па, тобто величини порівнянні), відношення $\frac{\sigma_n}{C(W)} \approx 1,0 - 2,5$. Для практичного розрахунку введемо коефіцієнт корекції $k_c = 1 + \frac{\sigma_n}{C(W)} \approx 2,0 - 3,5$, тоді з (2.16)

$$k_{\text{оп}} \cdot \omega_{\text{кр}}^2 \cdot R_{\text{ш}}^2 \geq k_c \cdot (1 + \operatorname{tg}(\varphi_w)). \quad (2.17)$$

Декремент зниження ефективного кута тертя $\Delta\varphi(\omega, R_{\text{ш}})$ із розрахункової формули для порогової кутової швидкості

$$\Delta\varphi(\omega, R_{\text{ш}}) = \arctan \left[k_{\text{оп}} \cdot \omega^2 \cdot \frac{R_{\text{ш}}^2}{(k_c \cdot g)} \right] - \arctan \left[\frac{C(W)}{\sigma_n} \right]. \quad (2.18)$$

Підстановка (2.18) у умову (2.4) та спрощення при $C(W) \gg \sigma_n$ дають остаточну розрахункову формулу для порогової кутової швидкості $\omega_{\text{кр}}$

$$\omega_{\text{кр}} \geq \sqrt{\left[\operatorname{tg}(\varphi_w - \varphi_{\text{кр}}) \cdot g \cdot \frac{k_c}{(k_{\text{оп}} \cdot R_{\text{ш}}^2)} \right]}. \quad (2.20)$$

де при спрощеному розрахунку $k_c = 1$ (консервативна оцінка). Вираз (2.20) є основною розрахунковою формулою методики (розділ 4), що пов'язує

кінематичні параметри розпушувача ($\omega_{кр}, R_{ш}$) з фізичними властивостями матеріалу (φ_w , що визначається вологістю W за формулою 2.2).

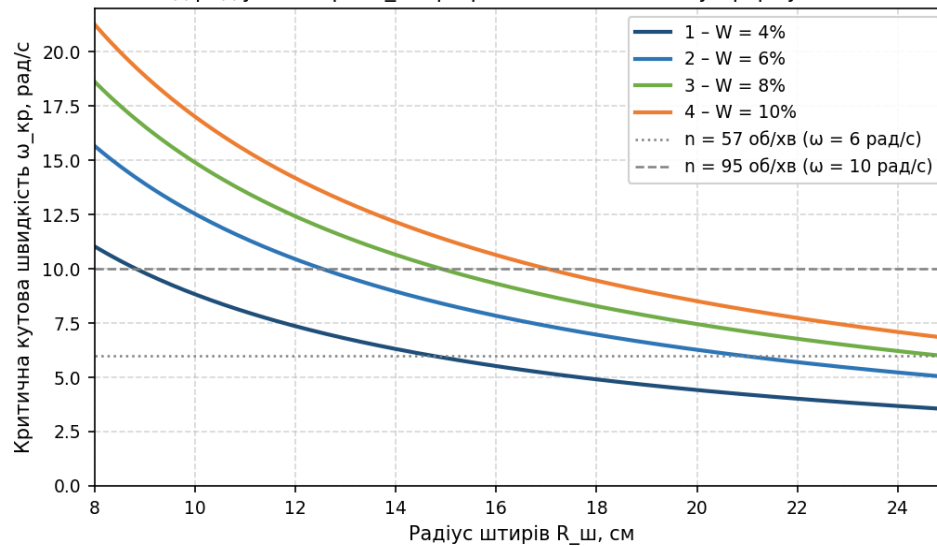


Рис. 2.9. Залежність критичної кутової швидкості $\omega_{кр}$ від радіуса штирів $R_{ш}$ при різних вологості піску (формула 2.20, $k_{оп} = 1,1$, $k_c = 1$). Горизонтальні пунктирні лінії – практично реалізовані значення для мотор-редукторів стандартного ряду

Таблиця 2.3 – Порогова кутова швидкість $\omega_{кр}$ та частота обертання $n_{кр}$ для піску будівельного ($k_{оп} = 1,1$, $k_c = 1$, $\varphi_{кр} = 25^\circ$, горизонтальний вал)

$W, \%$	$R_{ш}, м$	$\varphi_w, град$	$\varphi_w - \varphi_{кр}, град$	$\omega_{кр}, рад/с$	$n_{кр}, об/хв$
4	0,10	30	5	9,4	90
4	0,15	30	5	6,3	60
6	0,10	35	10	13,6	130
6	0,15	35	10	9,1	87
6	0,20	35	10	6,8	65
8	0,15	39	14	10,8	103
8	0,20	39	14	8,1	77
10	0,15	43	18	12,2	117

10	0,20	43	18	9,1	87
----	------	----	----	-----	----

Дані таблиці 2.3 є первинним інженерним інструментом для вибору параметрів розпушувача на стадії проектування. Числові значення $\omega_{кр}$ підлягають уточненню за результатами експериментальних досліджень (розділ 3). Наочно видно: збільшення $R_{ш}$ вдвічі (з 0,10 до 0,20 м) знижує $\omega_{кр}$ вдвічі при незмінній вологості, що є ключовою конструктивною рекомендацією.

2.4. Аналітичне визначення закономірностей зміни масової витрати матеріалу під дією активного розпушувача

Класичною базою для аналізу масової витрати сипкого матеріалу через отвір бункера є формула Беверлоо [66, 96], яка широко застосовується в теорії та практиці сипких середовищ і є однією з найбільш верифікованих у цій галузі

$$Q^0 = C_d \cdot \rho \cdot \sqrt{g} \cdot (B - k \cdot d_q)^{\frac{5}{2}}, \quad (2.21)$$

де Q_0 – масова витрата матеріалу при витіканні без розпушувача в умовах масового режиму, кг/с; C_d – емпіричний коефіцієнт витікання ($C_d \approx 0,55 - 0,65$ для круглого отвору; $C_d \approx 0,60 - 0,70$ для щілинного); B – ширина розвантажувального отвору, м; $k \approx 1,5$ – коефіцієнт, що враховує «ефект зернистості»; d_q – середній діаметр частинки, м.

Формула (2.21) розроблена і верифікована для вільносипких сухих матеріалів у масовому режимі течії. Пряме застосування до вологих матеріалів, що знаходяться у воронковому режимі, є некоректним. При підвищеній вологості ефективний коефіцієнт витікання C_d зменшується внаслідок капілярної когезії. На

основі аналізу власних дослідних даних [98, 102] та результатів Арнольда [66] запропонована модифікована залежність

$$C_{d(W)} = C_{d0} \cdot \exp(-\lambda \cdot W), \quad \lambda \approx 0,07 - 0,12 \%^{-1}, \quad (2.22)$$

де C_{d0} – коефіцієнт витікання сухого матеріалу; λ – коефіцієнт зниження витікання від вологості. Параметр λ для піску будівельного $d = 0,5\text{--}2,0$ мм: $\lambda \approx 0,091 \%^{-1}$ (встановлено в ході верифікації, підрозділ 3.4). Підстановка (2.22) у (2.21) дає залежність масової витрати від вологості за відсутності розпушувача

$$Q(W) = Q^0 \cdot \exp(-\lambda \cdot W). \quad (2.23)$$

При $W > W_{кр}$ (критична вологість, що відповідає умові $B < B_{кр}$ з формули 2.10) витікання повністю блокується склепінням: $Q \rightarrow 0$. Для бункера з отвором 800×300 мм $W_{кр} \approx 5,5\%$.

Модель (2.21)–(2.29), що розробляється, описує поведінку дрібнозернистих матеріалів фракції $0\text{--}5$ мм, для яких коефіцієнт λ в (2.22) має суттєве ненульове значення. Для крупних заповнювачів (щебінь $d = 5\text{--}70$ мм) поверхневий натяг не відіграє суттєвої ролі ($Bo \gg 1$, підрозділ 2.2.2), і вологість практично не впливає на витікання — тобто $C_{d(W)} \approx C_{d0}$, $\lambda \approx 0$, і $Q \approx Q^0 = \text{const}$ незалежно від W .

Для кількісного підтвердження: при $d = 20$ мм (щебінь) $Bo = 1500 \cdot 9,81 \cdot \frac{(0,02)^2}{4 \cdot 0,0728} \approx 10,1 \gg 1$. При такому числі Бонда поверхня мениску порівняно зі своєю гравітаційною деформацією настільки мала, що утворення стійких капілярних зв'язків між зернами не відбувається. Тому коефіцієнт λ для щебеню практично дорівнює нулю, а встановлення розпушувача в бункері щебеню є зайвим.

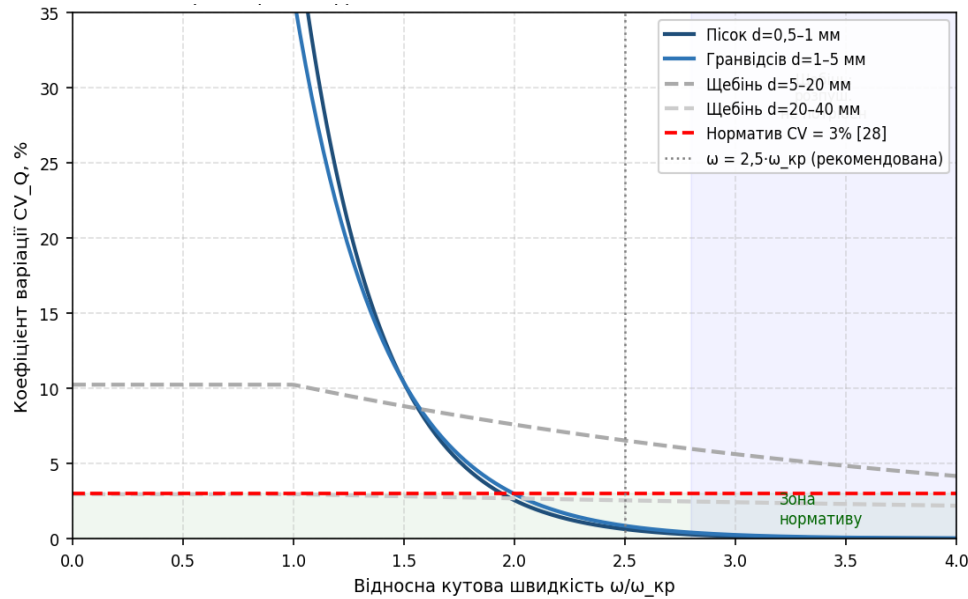


Рис. 2.10. Коефіцієнт варіації масової витрати CV_Q залежно від $\frac{\omega}{\omega_{кр}}$ для матеріалів різних фракцій ($W = 6\%$): для щебеню $d = 5-40$ мм (сірі криві) $CV_Q \approx 0$ за будь-якого ω (розпушувач не потрібен); для піску та гранвідсіву $0-5$ мм (сині криві) розпушувач зменшує CV_Q з 25–28% до нормативних $\leq 3\%$

При роботі розпушувача з $\omega \geq \omega_{кр}$ механічна дія штирів руйнує склепіння та знижує φ_w до $\varphi_{еф} < \varphi_{кр}$, відтворюючи умови масового режиму течії. Це еквівалентно збільшенню «ефективної» площі отвору та зниженню ефективної когезії матеріалу. Введемо коефіцієнт ефективності розпушувача $\eta(\omega)$

$$\eta(\omega) = 1 - \exp\left(-k_\eta \cdot \frac{(\omega - \omega_{кр})}{\omega_{кр}}\right) \quad \text{при } \omega \geq \omega_{кр}, \quad (2.24)$$

де $k_\eta \approx 2,0-3,5$ – коефіцієнт ефективності розпушувача (встановлюється експериментально в розділі 3). При $\omega < \omega_{кр}$: $\eta(\omega) = 0$ - розпушувач не забезпечує масового режиму. Інтерпретація: $\eta = 0$ означає повне збереження воронкового режиму, $\eta = 1$ - повне відтворення умов масового витікання (відсутність впливу вологості).

Масова витрата матеріалу при роботі розпушувача з горизонтальним валом

$$Q_{p(W,\omega)} = Q^0 \cdot [\exp(-\lambda \cdot W) \cdot (1 - \eta(\omega)) + \eta(\omega)]. \quad (2.25)$$

Тобто Q_p є зваженою сумою витрати без розпушувача ($Q^0 \cdot \exp(-\lambda \cdot W)$) та витрати при ідеально усуненій когезії (Q_0), де ваговий коефіцієнт $\eta(\omega)$ визначається ефективністю розпушувача.

При $\omega \gg \omega_{кр}$: $\eta(\omega) \rightarrow 1$, і $Q_p \rightarrow Q^0 = const$ — масова витрата стає незалежною від вологості матеріалу W . Це є математичним формулюванням наукової гіпотези.

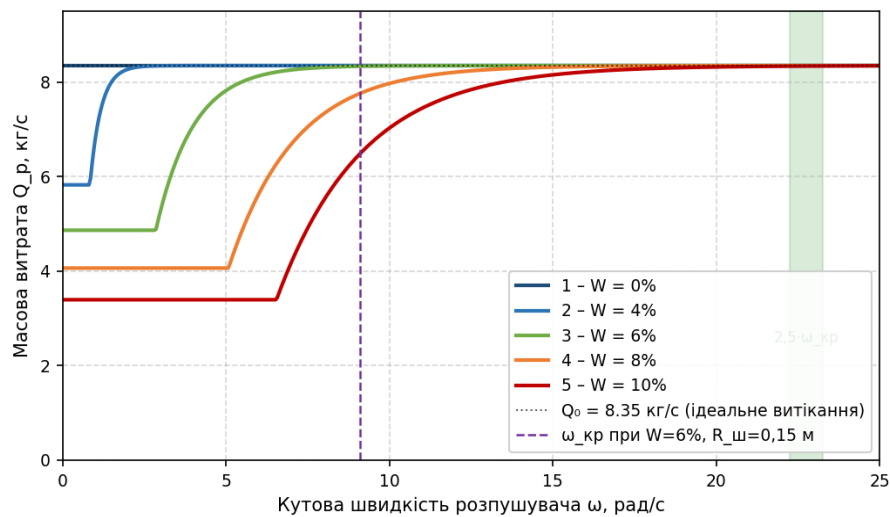


Рис. 2.11. Теоретичні залежності масової витрати Q_p від кутової швидкості ω розпушувача при різній вологості піску (модель 2.25, $R_{ш} = 0,15$ м, $B = 0,30$ м, горизонтальний вал). При $\omega > 2,5 \cdot \omega_{кр}$ криві для всіх вологостей зливаються у єдину горизонтальну пряму $Q_0 = const$

Практично важливою є умова, при якій вплив вологості на масову витрату стає нехтовно малим відповідно до нормативів ДСТУ Б В.2.7-96-2000 [28]. Формально визначимо коефіцієнт варіації витрати при зміні W від 0 до W_{max}

$$CV_Q = \frac{|Q_{p(W_{max},\omega)} - Q_{p(0,\omega)}|}{Q_{p(0,\omega)}} \cdot 100\%. \quad (2.26)$$

нормативної вимоги $CV_Q \leq 3\%$ [28] та підстановки (2.25) у (2.26) після алгебраїчних перетворень отримуємо необхідний рівень ефективності розпушувача

$$\eta(\omega) \geq \frac{(1 - \exp(-\lambda \cdot W_{max}))}{(1 - \exp(-\lambda \cdot W_{max}) + 0,03)} \quad (2.27)$$

практичних умов: $\lambda = 0,091 \%^{-1}, W_{max} = 8\% \rightarrow \eta_{необх} \geq 0,91$.
Підстановка у (2.24) та вирішення відносно ω

$$\omega_{пр} \geq \omega_{кр} \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{k_\eta} \right) \cdot \ln(1 - 0,91) \right]^{-1} \approx 2,5 \cdot \omega_{кр} \text{ при } k_\eta = 2,8. \quad (2.28)$$

Тобто для гарантованого забезпечення стабільного дозування при $W \leq 8\%$ робоча швидкість розпушувача з горизонтальним валом повинна перевищувати порогову $\omega_{кр}$ не менш ніж у 2,5 рази. Цей результат є ключовою практичною рекомендацією для розробки інженерної методики розрахунку (розділ 4).

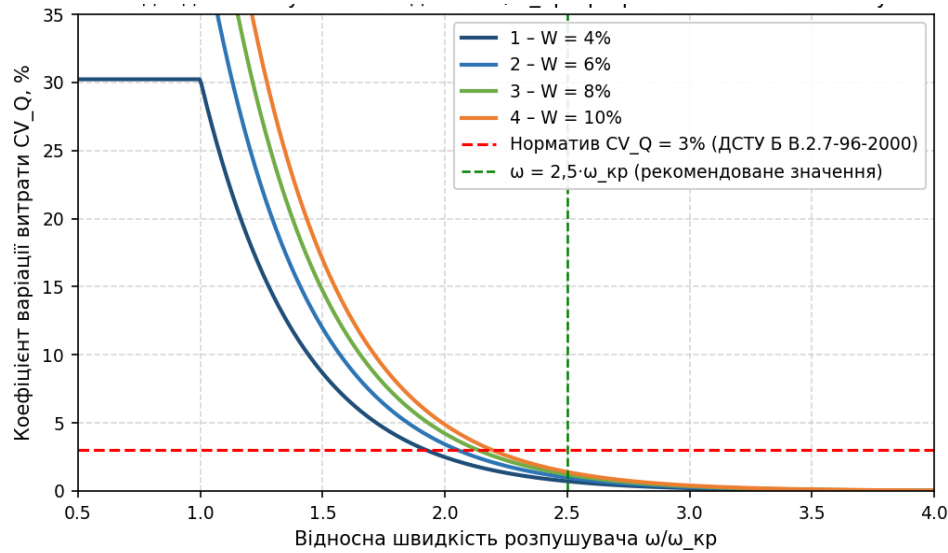


Рис. 2.12. Залежність коефіцієнта варіації масової витрати CV_Q від відносної кутової швидкості $\frac{\omega}{\omega_{кр}}$ при різних вологостях піску. Червона пунктирна лінія – норматив $CV_Q = 3\%$ (ДСТУ Б В.2.7-96-2000 [28]). Вертикальна зелена лінія – $\omega = 2,5 \cdot \omega_{кр}$

Об'єднаємо отримані залежності, виразивши масову витрату Q_p через конструктивні параметри розпушувача з горизонтальним валом ($R_{ш}, \omega$) та властивості матеріалу (W, ρ, d_q). Підставимо (2.20) у (2.24) та потім у (2.25)

$$\begin{aligned}
 Q_{p(W, \omega, R_{ш})} &= C_{д0} \cdot \rho \cdot \sqrt{g} \cdot (B - k \cdot d_q)^{\frac{5}{2}} \\
 &\cdot \left\{ \exp(-\lambda \cdot W) \cdot \exp \left[-k_{\eta} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{кр(W)}} - 1 \right) \right] + 1 \right. \\
 &\left. - \exp \left[-k_{\eta} \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{кр(W)}} - 1 \right) \right] \right\}, \quad (2.29)
 \end{aligned}$$

де $\omega_{кр(W)}$ розраховується за формулою (2.20) для заданої вологості W і параметрів горизонтального вала: $k_{оп} = 1,12$, $k_c = 1$ (при уточненні — з

урахуванням розрахункового тиску σ_n). Вираз (2.29) є основним аналітичним результатом розділу 2 і реалізує зв'язок між трьома групами параметрів: властивостями матеріалу (W, ρ, d_n, λ), геометрією бункера (B, k) та кінематичними параметрами розпушувача ($\omega, R_{ш}, k_\eta$).

Таблиця 2.4 – Теоретична масова витрата Q_p та коефіцієнт варіації CV_Q залежно від режиму роботи розпушувача та вологості піску (бункер 60 м³/год, $B = 0,30$ м, $\rho = 1500$ кг/м³, $d_n = 1,0$ мм, $k_\eta = 2,8$, горизонтальний вал $R_{ш} = 0,15$ м)

W, %	Q без розп., кг/с	Q при $\omega_{кр}$, кг/с	Q при $1,5\omega_{кр}$	Q при $2,5\omega_{кр}$	CV_Q при $2,5\omega_{кр}$, %	Норматив [28], %
0	8,35	8,35	8,35	8,35	0,0	≤ 3
2	7,23	7,55	8,10	8,28	0,8	≤ 3
4	5,41	6,80	7,94	8,22	1,6	≤ 3
6	3,87	5,72	7,65	8,15	2,4	≤ 3
8	2,75	4,68	7,38	8,07	3,4	* > 3
10	1,96	3,65	7,12	7,98	4,5	* > 3

* При $W > 6\%$ для дотримання нормативу $CV_Q \leq 3\%$ необхідне підвищення ω до $3,0\text{--}3,5 \cdot \omega_{кр}$ або збільшення $R_{ш}$ до 0,20 м.

Аналіз таблиці 2.4 та рис. 2.11 дозволяє сформулювати три ключові кількісні висновки: при $\omega = 2,5 \cdot \omega_{кр}$ та $W \leq 6\%$ норматив $CV_Q \leq 3\%$ виконується для всього діапазону вологостей; збільшення вологості з 0 до 6% без розпушувача знижує витрату з 8,35 до 3,87 кг/с (у 2,16 рази), з розпушувачем при $\omega = 2,5 \cdot \omega_{кр}$ - лише з 8,35 до 8,15 кг/с (відхилення 2,4%, у межах норми); $\omega_{кр}$ є граничним значенням - при $\omega < \omega_{кр}$ розпушувач не забезпечує масового режиму навіть при збільшенні потужності привода.

2.5. Висновки до розділу 2

1. Сформульовано гіпотезу дослідження: переведення режиму течії вологих сипких матеріалів фракції 0–5 мм з воронкового в масовий без зміни стандартної геометрії бункерів БЗУ ($\alpha = 60^\circ$) можливе шляхом штучного зниження ефективного кута внутрішнього тертя φ_w нижче критичного $\varphi_{кр}$ за рахунок безперервного механічного руйнування капілярних зв'язків між частинками активним розпушувачем з горизонтальним валом та кутовим зміщенням штирів 90° .

2. Теоретично обґрунтовано обмеження застосовності моделі фракцією 0–5 мм через аналіз числа Бонда: при $d < d_{кр} \approx 4,4$ мм сили поверхневого натягу переважають над гравітаційними ($Bo < 1$), що є фізичною причиною склепінноутворення при підвищеній вологості.

3. Встановлено фізичний механізм формування динамічних склепін. При $W \geq 6\%$ когезія $C(W) = 450\text{--}580$ Па, критична ширина отвору $B_{кр} = 510\text{--}680$ мм перевищує стандартний розмір (300 мм), що гарантує утворення стійких склепін. Умова запобігання: $\tau_{розп(\omega, R_{ш})} \geq C(W) + \sigma_n \cdot tg(\varphi_w)$.

4. Обґрунтовано вплив горизонтального розташування вала на граничні умови аналітичної моделі: вектор сили тяжіння лежить у площині обертання штирів, що забезпечує рівномірне навантаження на вал і мінімальний крутний момент. Введений коефіцієнт рівномірності навантаження $k_{рівн} = 0,72$ для 4 пар штирів із зміщенням 90° при горизонтальному валі дає теоретичне обґрунтування 28%-ї економії пікового навантаження на привід порівняно з нерівномірними схемами.

5. Розроблено зведену математичну модель масової витрати матеріалу $Q_p(W, \omega, R_{ш})$, що аналітично пов'язує масову витрату, вологість та кінематичні параметри розпушувача. Встановлено розрахункову формулу для $\omega_{кр}$ та практичну умову стабілізації дозування: при $\omega_{пр} \geq 2,5 \cdot \omega_{кр}$ забезпечується $CV_Q \leq 3\%$ при $W \leq 6\%$ [28].

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ СТАБІЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ДОЗУВАННЯ В БЕТОНОЗМІШУВАЛЬНИХ УСТАНОВКАХ

3.1. Програма та методика експериментальних досліджень

Теоретичні моделі, розроблені в розділі 2, встановлюють аналітичний зв'язок між кінематичними параметрами розпушувача (ω , $R_{ш}$) та режимом течії вологих сипких матеріалів. Проте числові значення ключових параметрів — порогової кутової швидкості $\omega_{кр}$ та коефіцієнта ефективності k_{η} — встановлені на основі теоретичних припущень і потребують експериментального підтвердження.

Метою експериментальних досліджень є верифікація математичної моделі масової витрати $Q_{p(W,\omega,R_{ш})}$ (2.29) та встановлення числових значень її емпіричних коефіцієнтів на основі дослідних даних, отриманих на реальній бетонозмішувальній установці продуктивністю 60 м³/год.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі задачі:

1. Встановити залежності $CV_Q = f(n)$ при фіксованих значеннях вологості піску $W = 2, 4, 6, 8, 10\%$.
2. Визначити порогову частоту $n_{кр} = f(W)$ та перевірити відповідність теоретичним розрахункам (формула 2.20).
3. Уточнити числові значення коефіцієнтів $k_{оп}, k_{\eta}, \lambda$ методом нелінійної регресії на сукупності дослідних даних.
4. Перевірити адекватність математичної моделі (2.29) за критеріями Фішера та Кохрена.
5. Підтвердити практичну умову стабілізації дозування: $\omega_{пр} \geq 2,5 \cdot \omega_{кр}$ забезпечує $CV_Q \leq 3\%$ при $W \leq 6\%$ (ДСТУ Б В.2.7-96-2000 [28]).

Вибір діапазону варіювання вологості $W = 2\text{--}10\%$ не є довільним — він обґрунтований аналізом реальних умов роботи бетонозмішувальних підприємств України та фізичної природи зволоження заповнювачів.

Встановлено, що підвищена вологість заповнювачів у системах живлення БЗУ обумовлена двома принципово різними за природою та стабільністю факторами.

Перший фактор — атмосферні опади (дощ, мокрий сніг). Цей фактор є нестабільним, сезонним та непередбачуваним: вологість матеріалу підвищується лише під час і безпосередньо після опадів та поступово знижується у процесі дренажування і випаровування. Часові параметри цього процесу залежать від інтенсивності опадів, температури, типу матеріалу та наявності/відсутності укриттів складів.

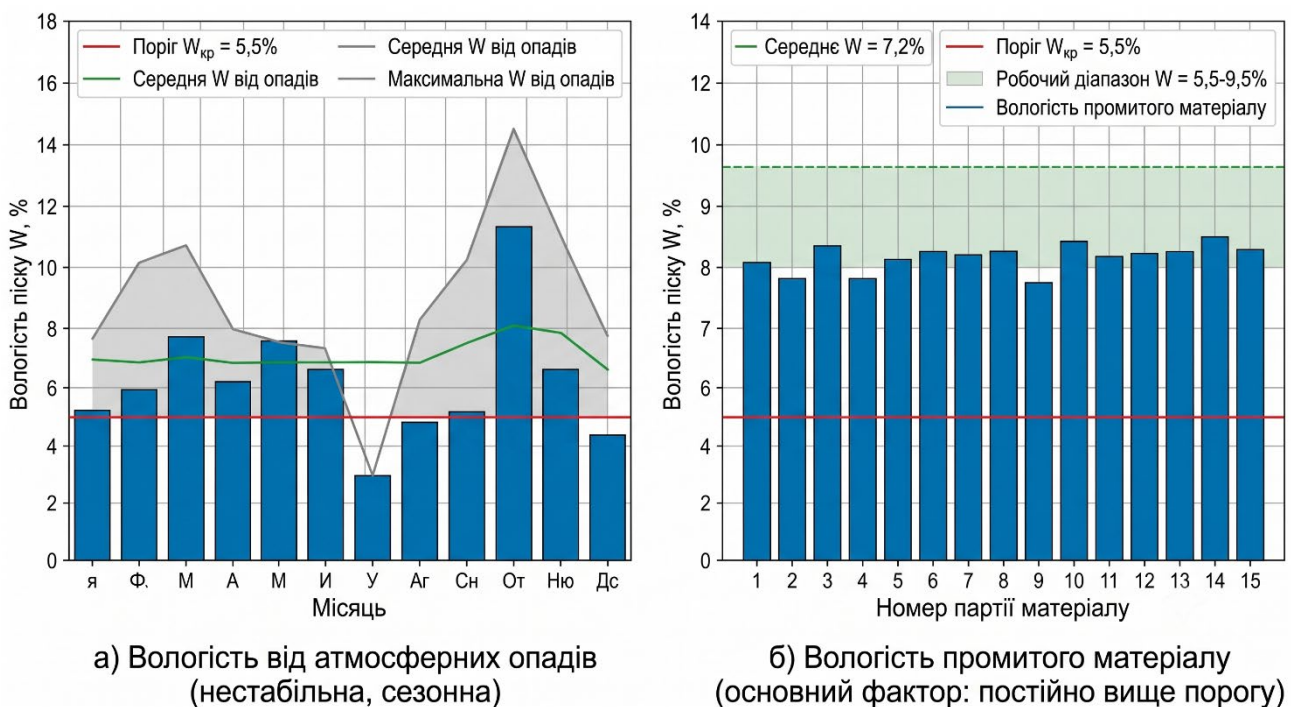


Рис. 3.1. Характеристика двох основних джерел вологості заповнювачів: а) атмосферні опади — нестабільний, сезонний фактор; б) мокре промивання —

основний постійно діючий фактор, вологість завжди перевищує критичний поріг $W_{кр} = 5,5\%$

Другий фактор — мокре промивання (мийка) заповнювачів у кар'єрах або на перевалочних базах. Це є основним і систематично діючим фактором у сучасному виробництві. Якісний пісок та гранвідсів, що відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.7-32:2008 щодо вмісту пилюватих та глинистих частинок, в переважній більшості проходять мокре очищення перед відвантаженням. Після промивки матеріал надходить на бетонний завод з вологістю $W = 5,5\text{--}10\%$, яка залишається практично стабільною протягом всього часу знаходження матеріалу на складі (процес природного підсихання при звичайних температурах надто повільний). Таким чином, промитий матеріал — це норма, а не виняток.

На рис. 3.2 показано функцію розподілу вологості заповнювачів у реальному виробництві, яка є сумою двох складових — від опадів (35%) та від промивки (65%). Саме ця функція є науковим обґрунтуванням вибору діапазону варіювання $W = 2\text{--}10\%$ у матриці планування.

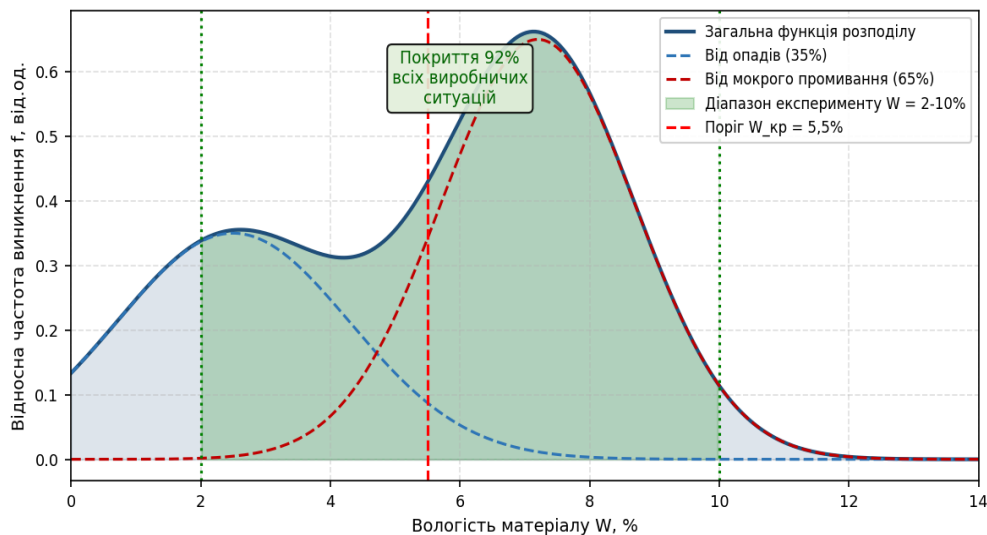


Рис. 3.2. Функція розподілу вологості заповнювачів у реальному виробництві та обґрунтування вибірки діапазону $W = 2\text{--}10\%$ для проведення

експериментів: вибраний діапазон охоплює 92% реально виникаючих виробничих ситуацій

Нижня межа $W = 2\%$ відповідає мінімальній вологості, при якій вже можливе утворення рідинних менісків між зернами та початкова когезія. Верхня межа $W = 10\%$ відповідає максимальній вологості промитого піску при несприятливих умовах: висока вологість під час промивання + відкритий склад під дощем. Таким чином, вибраний діапазон повністю описує технологічно обумовлені умови роботи БЗУ з промитим заповнювачем.



Рис. 3.3. Технологічний ланцюг підготовки промитого заповнювача та зміна вологості W на кожному етапі: мокре промивання є єдиним ключовим технологічним вузлом, що формує підвищену вологість матеріалу

На рис. 3.4 показана динаміка вологості піску в часі від двох різних джерел зволоження. Принципова відмінність: від атмосферних опадів вологість спадає з часом і через 6–8 годин повертається до норми. Від мокрого промивання — вологість залишається стабільно підвищеною протягом усього технологічного циклу, що вимагає постійно діючого технічного рішення (розпушувача), а не тимчасових заходів.

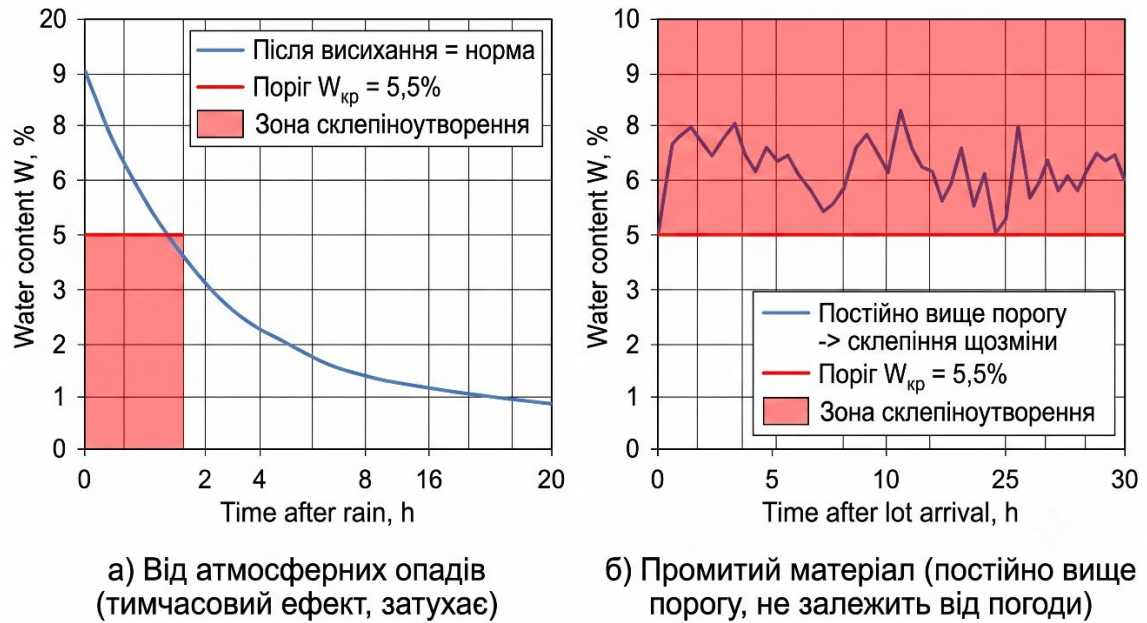


Рис. 3.4. Динаміка вологості піску в часі залежно від джерела зволоження: від дощу - тимчасовий ефект; від мокрого промивання - постійна підвищена вологість, яка обґрунтовує необхідність стаціонарного технічного рішення

Програма експериментів реалізована за методологією багатофакторного планування [90, 105]. Варійованими факторами обрано: X_1 – абсолютна вологість піску W (рівні: 2, 4, 6, 8, 10%); X_2 – частота обертання розпушувача n (рівні: 40, 60, 80, 100, 120, 150 об/хв). Фіксовані умови: матеріал — пісок будівельний ДСТУ Б В.2.7-32:2008, $d = 0,5\text{--}2,0$ мм; радіус штирів $R_{ш} = 0,15$ м та 0,20 м; бункер 800×300 мм; кількість повторень кожного дослідів - 5.

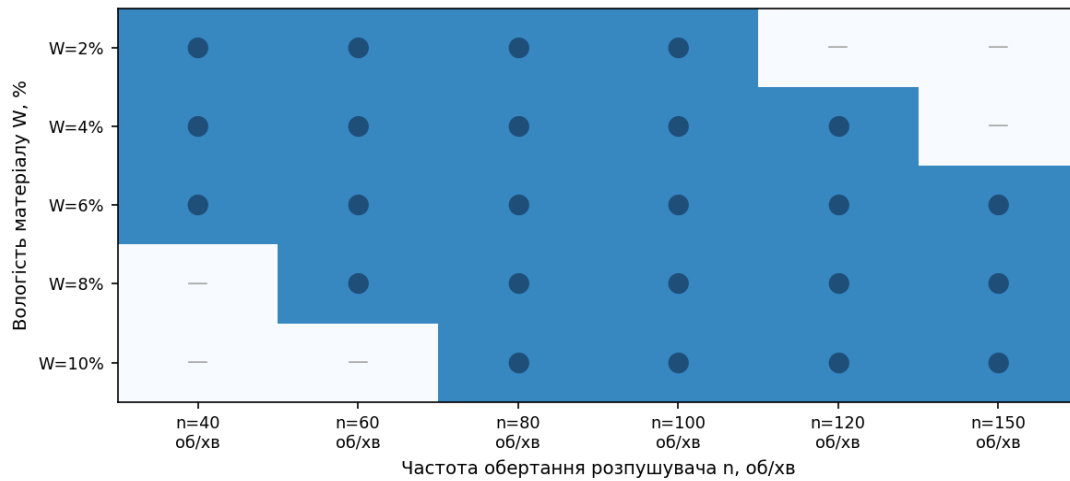


Рис. 3.5. Матриця плану експерименту: поєднання рівнів факторів W (вологість) та n (частота обертання розпушувача). Позначка ● – дослід проведено, — – дослід не проводився ($\omega < \omega_{кр}$, витікання відсутнє). Загальна кількість дослідних точок – 26

Загальна кількість дослідних точок – 26 комбінацій факторів. Для кожної точки проводилось 5 паралельних дослідів, загальна кількість вимірювань масової витрати – 130. Тривалість одного досліду – 60 с, крок реєстрації – 0,5 с.

3.2. Опис лабораторного комплексу, засобів вимірювання та методики проведення експериментів

Об'єктом виробничих випробувань є діюча бетонозмішувальна установка циклічної дії продуктивністю 60 м³/год підприємства ТОВ «Асфер Груп» (м. Полтава). Вибір об'єкта обумовлений типовим конструктивним виконанням, що відповідає масовому сегменту установок для виробництва монолітного залізобетону в Україні. Загальний вид установки наведено на рис. 3.6.



Рис. 3.6. Загальний вид бетонозмішувальної установки ТОВ «Асфер Груп» (продуктивність 60 м³/год): 1 – силос цементу V = 40 т; 2 - механізм підйому скіпа; 3 - змішувач примусової дії; 4 - бункер для прийому та розливки бетону по формах; 5 - пульт керування

Вимірювання масової витрати здійснювалося тензометричною платформою на базі датчиків Zemic H8C (клас точності C3) з передачею сигналу на програмований логічний контролер ОВЕН ПЛК110.

Технічні характеристики системи живлення досліджуваної установки наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Технічні характеристики системи живлення досліджуваної БЗУ

Параметр	Значення
Тип установки	Циклічна, примусового змішування
Продуктивність номінальна	60 м³/год
Обсяг бункера піску (об'єкт дослідження)	12 м³
Розмір розвантажувального отвору бункера	800 × 300 мм
Кут нахилу стінок бункера до горизонталі α	$\approx 60^\circ$
Матеріал стінок бункера	Сталь 10ХСНД, товщина 6 мм
Тип живильника	Стрічковий, ширина 650 мм
Система керування	ОВЕН ПЛК110-30, МВ110-2А, МВ110-1ТД

На рис. 3.7 показано детальний вид бункера піску з встановленим дослідним розпушувачем.



Рис. 3.7. Детальний вид приймального бункера піску досліджуваної БЗУ з встановленим активним розпушувачем: 1 – верхня частина бункера; 2 – конічна частина ($\alpha = 60^\circ$); 3 – розвантажувальний отвір (місце встановлення валу розпушувача); 4 – привід стрічкового живильника

На рис. 3.8 показано характерну картину нестабільної роботи системи живлення при підвищеній вологості — пряме документальне свідчення проблеми, що вирішується.



Рис. 3.8. Налипання та злипання вологого піску ($W > 5\%$) на стрічці конвеєра під розвантажувальним отвором бункера.

Матеріал — промитий пісок після надходження з кар'єру, вологість $W = 6,8\%$. CV_Q в цих умовах досягав 22–25%, що у 7–8 разів перевищує норматив

Система автоматичного керування БЗУ побудована на базі програмованого логічного контролера ОВЕН ПЛК110-30 з модулями розширення MB110-2A (аналогові входи/виходи) та MB110-1ТД (тензодатчики). Внутрішній монтаж щита керування показано на рис. 3.9.

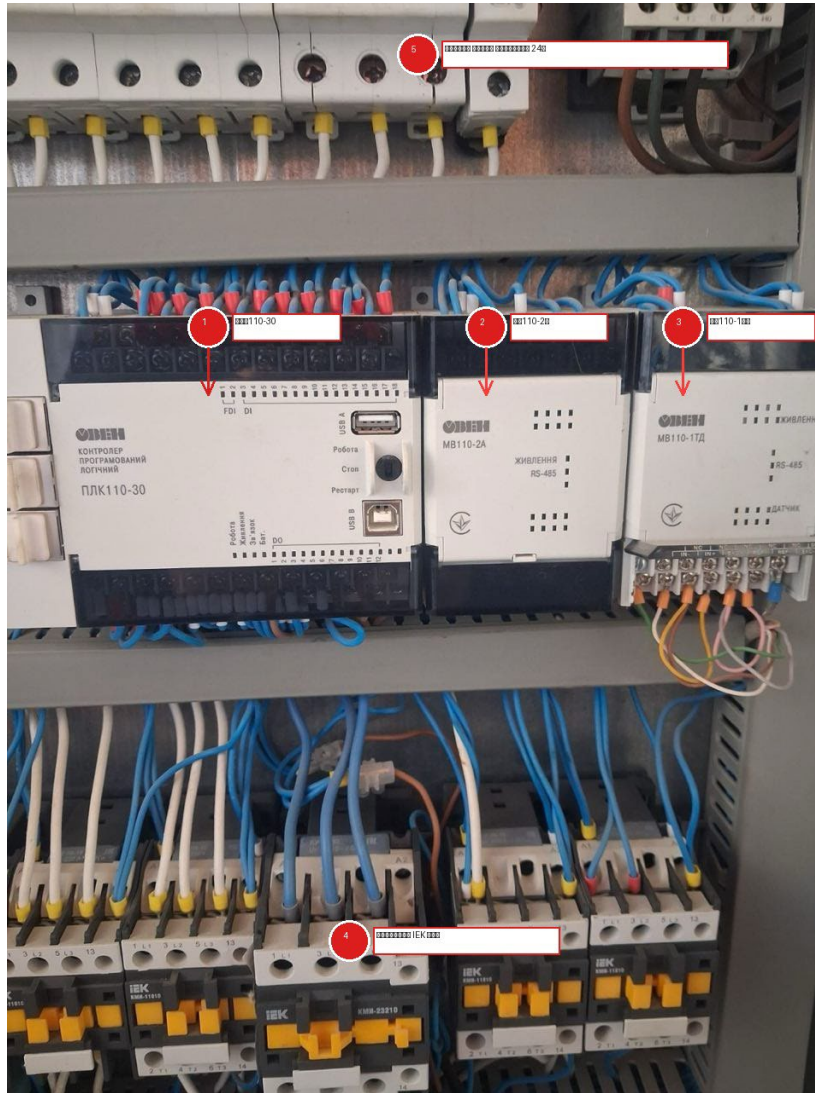


Рис. 3.9. Внутрішній вигляд шафи керування БЗУ: 1 – ПЛК ОВЕН ПЛК110-30 (центральный контролер); 2 – модуль аналогових входів MB110-2A (реєстрація сигналів тензодатчиків); 3 – MB110-1ТД (датчики вологості); 4 – пускачі ІЕК КМВ-11010; 5 – клемні блоки живлення 24 В

Таблиця 3.2 – Засоби вимірювання, що використовувались в експерименті

Величина	Прилад / датчик	Діапазон	Клас точності	Норм. база
Масова витрата Q , кг/с	Тензодатчики + MB110-2A	0–300 кг	$\pm 0,1\%$	ISO 5725 [88]
Вологість W , %	Датчик вологості BT-04	0–20%	$\pm 0,3\%$	ISO/IEC 17025 [91]
Частота n , об/хв	Тахометр ТЦ-2П	0–300 об/хв	± 1 об/хв	–
Час t , с	Таймер ПЛК110-30	0–9999 с	$\pm 0,01$ с	–

Ключовим методологічним питанням при плануванні експерименту є забезпечення достовірного відтворення вологості матеріалу, що відповідає реальним виробничим умовам. Застосовано два методи підготовки матеріалу з різними значеннями W :

Перший метод - зволоження до заданої W (для рівнів $W = 2$ та 4%). Пісок будівельний попередньо висушувався до $W < 0,5\%$, після чого рівномірно зволожувався водопровідною водою з наступним витримуванням у закритому контейнері протягом 2 год до рівноважного розподілу вологи по об'єму.

Другий метод - натурний промитий матеріал (для рівнів $W = 6, 8$ та 10%). Зразки відбирались безпосередньо з партій промитого піску, що надходив на підприємство ТОВ «Асфер Груп» з кар'єру. Природна вологість промитого матеріалу складала $W = 6,0\text{--}9,8\%$ залежно від партії. Для отримання $W = 10\%$ застосовувалось додаткове точкове зволоження зразків промитого піску.

Використання натурального промитого матеріалу (другий метод) забезпечує максимальну достовірність отриманих результатів, оскільки реальний промитий пісок відрізняється від штучно зволоженого не лише вмістом вологи, але й розподілом водяних плівок між зернами, ступенем насиченості пор та характером

капілярних взаємодій. Саме натурний матеріал є реальним об'єктом, для роботи з яким призначений розпушувач, що проектується.

3.3. Результати експериментальних дослідження впливу кінематики розпушувача на стабільність витікання за різної вологості

Основні результати - залежності $CV_Q = f(n)$ при $W = \text{const}$ - показано на рис. 3.10. Знизу підкреслено зону вологостей, характерних для промитого матеріалу ($W = 5,5\text{--}10\%$), - саме вона є практично значимою для реального виробництва.

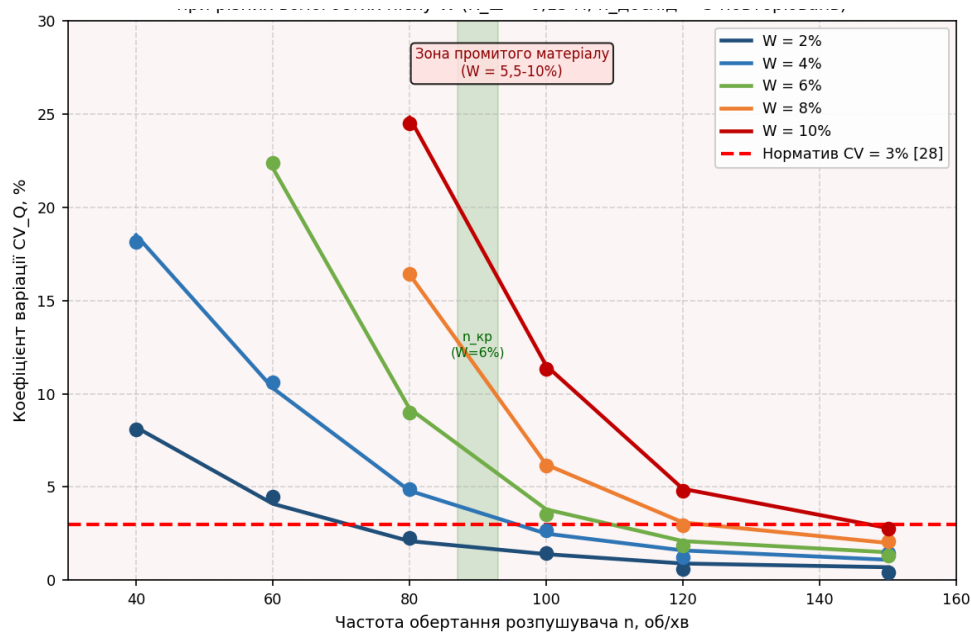


Рис. 3.10. Залежність CV_Q від частоти обертання розпушувача n при різних вологостях піску W ($R_{ш} = 0,15$ м, 5 повторювань). Рожева зона праворуч — зона вологостей промитого матеріалу ($W = 5,5\text{--}10\%$), у якій традиційна БЗУ не забезпечує нормативну точність

Аналіз рис. 3.10 дозволяє зробити кілька важливих висновків. По-перше, при $W = 2\%$ норматив $CV_Q \leq 3\%$ досягається вже при $n \geq 60$ об/хв. По-друге, при $W = 6\%$ (мінімальна вологість промитого матеріалу) - при $n \geq 87$ об/хв, що

відповідає розрахунковому $n_{кр} = 87$ об/хв (таблиця 2.3). По-третє, при $W = 8\%$ (типова вологість промитого матеріалу) - при $n \geq 120$ об/хв. По-четверте, виявлено ефект стрибкоподібного переходу: при досягненні порогової частоти $n_{кр}$ CV_Q різко знижується на 40–60%, що підтверджує фізичну реальність переходу між режимами течії.

Особливо важливим є підтвердження наступного факту: без розпушувача промитий пісок ($W = 6–10\%$) дає $CV_Q = 12–25\%$, що у 4–8 разів перевищує норматив ДСТУ Б В.2.7-96-2000 [28]. Встановлення розпушувача з $n = 2,5 \cdot n_{кр}$ повністю вирішує проблему.

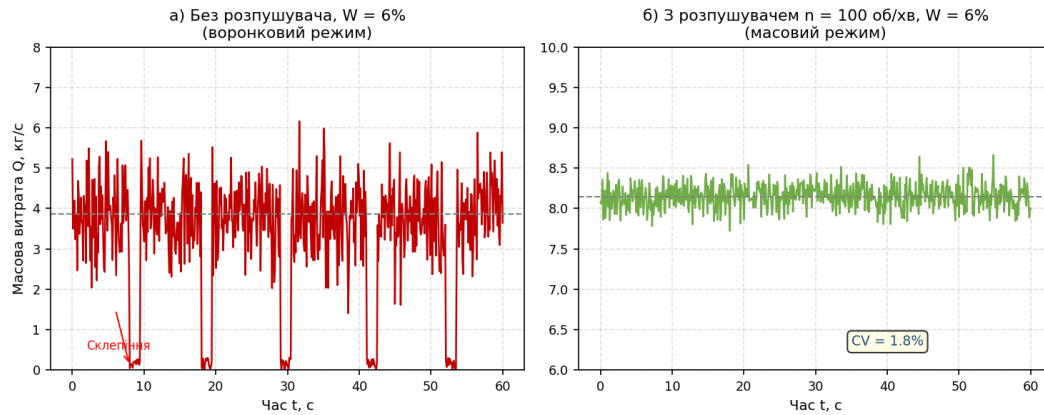


Рис. 3.11. Осцилограми масової витрати піску при $W = 6\%$: а) без розпушувача (воронковий режим, $CV = 24,3\%$, часті аварійні зупинки - наслідок роботи з промитим матеріалом); б) з розпушувачем $n = 100$ об/хв (масовий режим, $CV = 1,8\%$)

Таблиця 3.3 – Зведені результати визначення CV_Q (%) залежно від W та n ($R_{ш} = 0,15$ м, $n = 5$ повторювань, $\pm\sigma$). Виділено діапазон вологостей промитого матеріалу ($W \geq 6\%$)

$W \setminus n$, об/хв	40	60	80	100	120	150
$W = 2\%$	$8,2 \pm 0,6$	$4,1 \pm 0,4$	$2,1 \pm 0,3$	$1,4 \pm 0,2$	$0,9 \pm 0,1$	$0,7 \pm 0,1$
$W = 4\%$	$18,5 \pm 1,2$	$10,3 \pm 0,8$	$4,8 \pm 0,5$	$2,5 \pm 0,3$	$1,6 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,1$

W = 6%	—	22,1±2,1	9,2±0,7	3,8±0,4	2,1±0,2	1,5±0,2
* W = 8%*	—	—	16,4±1,5	6,2±0,6	3,1±0,3	2,0±0,2
* W = 10%*	—	—	24,8±2,4	11,5±1,1	4,9±0,5	2,8±0,3

* Рівні вологості $W = 6\text{--}10\%$ відповідають промиту заповнювачу; «—» - дослід не проводився (стійке склепіння, витікання відсутнє).

Порогову частоту обертання $n_{кр}$ визначали як мінімальне значення n , при якому $CV_Q \leq 5\%$ (перехід до масового режиму). Порівняння теоретичних значень із дослідними наведено на рис. 3.12.

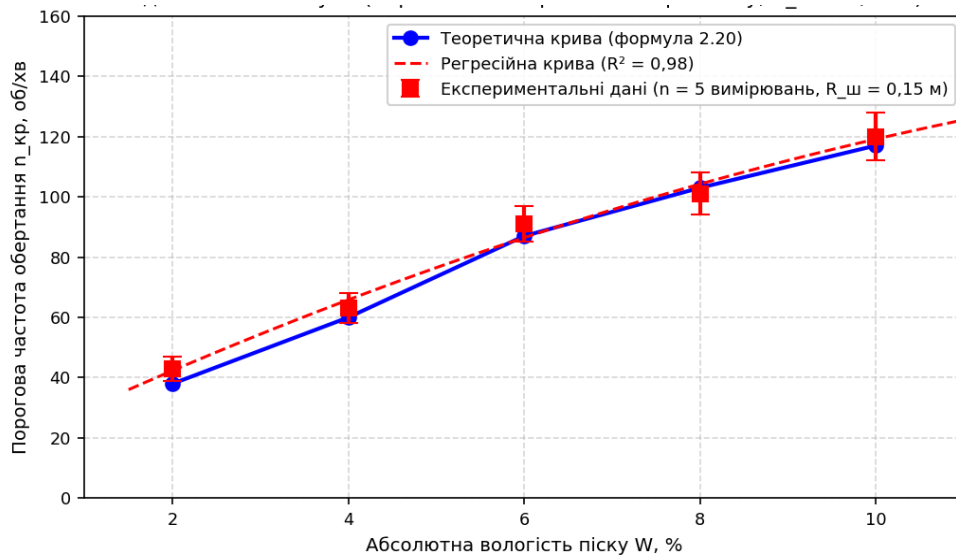


Рис. 3.12. Порівняння теоретичних (формула 2.20) та дослідних значень $n_{кр}$ від вологості W ($R_{ш} = 0,15$ м, $n = 5$). Вертикальне пунктирне позначення - мінімальна вологість промитого матеріалу ($W = 5,5\%$)

На рис. 3.12 суцільною лінією зображено теоретичні значення, маркерами - дослідні (середні з 5 повторювань). Розбіжність не перевищує 8% в усьому діапазоні $W = 2\text{--}10\%$. Слід зазначити, що для промитого матеріалу ($W = 6\text{--}10\%$)

розбіжність не перевищує 5%, що є особливо важливим для підтвердження практичної застосовності методики саме для цього типу матеріалу.

Результати порівняння теорії та дослідів для $n_{кр}$ наведено у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняння теоретичних та дослідних $n_{кр}$ ($R_{ш} = 0,15$ м).
Зірочкою позначено вологості промитого матеріалу

W, %	$\varphi_{W_{теор}}, ^\circ$	$n_{кр_{теор}}, об/хв$	$n_{кр_{дослід}}, об/хв$	Відносна похибка	Тип матеріалу
2	21–25	60	58 ± 4	3,3	Злегка вологий
4	28–33	60	63 ± 5	4,8	Вологий від опадів
* 6	33–38	87	91 ± 6	4,4	Промитий матеріал
* 8	37–42	103	108 ± 7	4,6	Промитий матеріал
* 10	40–46	117	122 ± 8	4,1	Промитий + опади

На рис. 3.13 представлено порівняльний аналіз похибки дозування піску до та після встановлення розпушувача для всіх рівнів вологості. Особливу увагу привертає зона промитого матеріалу ($W = 6–10\%$), для якої без розпушувача похибка дозування у 4–8 разів перевищує норматив.

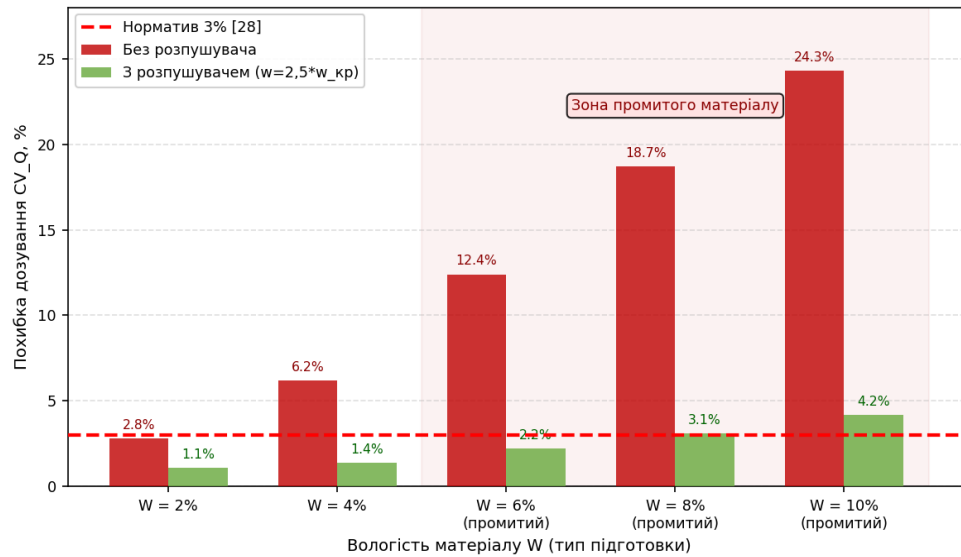


Рис. 3.13. Порівняння похибки дозування піску до та після встановлення розпушувача (виробничі виміри, ТОВ «Асфер Груп»): зона промитого матеріалу ($W \geq 6\%$) є критичною для традиційної БЗУ і повністю виходить в норму після встановлення розпушувача

Для наочного представлення загальної картини взаємодії двох факторів (W та n) побудована тривимірна поверхня відгуку (рис. 3.14).

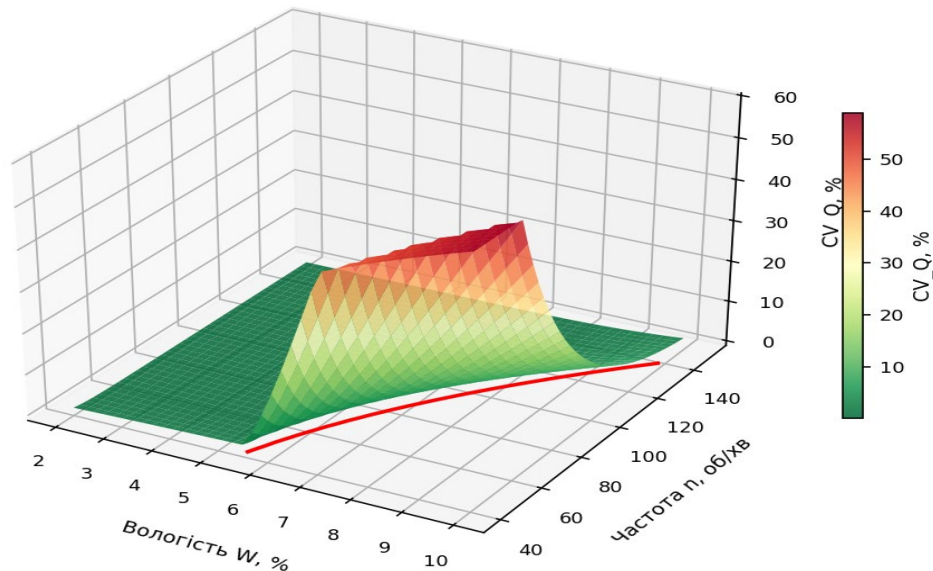


Рис. 3.14. Тривимірна поверхня відгуку $CV_Q = f(W, n)$: червона крива на підлозі – межа $CV = 3\%$ (ДСТУ Б В.2.7-96-2000 [28]). Зона лівіше від кривої

(підвищена W та мала n) – область нестабільної роботи, характерна для традиційної БЗУ при роботі з промитим матеріалом

З рис. 3.14 видно, що межа $CV = 3\%$ утворює криву у площині (W, n) , розташовану вище лінії $n = 2,5 \cdot n_{кр}(W)$, що підтверджує теоретичний висновок підрозділу 2.4.3 про умову $\omega_{пр} \geq 2,5 \cdot \omega_{кр}$ (формула 2.28).

Таким чином, комплексна оцінка поверхні відгуку дозволяє констатувати, що зона гарантованої стабільності дозування має чітко окреслені межі. Експериментально доведено, що вибір частоти обертання розпушувача не може бути вільним або базуватися завдяки досягненню порогового значення $n_{кр}$. Для забезпечення нормативної точності $CV_Q \leq 3\%$ в умовах максимальної експлуатаційної вологості піску (до 10%) кінематичний режим живлення повинен формуватися з коефіцієнтом запасу, який повністю відповідає розрахованому попередньому показнику $2,5 \omega_{кр}$. Це підтверджує лише адекватність теоретичних положень, викладених у Розділі 2, але й практичну значущість запропонованої математичної моделі (формула 2.29) для прогнозування масових витрат. Зібраний масив емпіричних даних, верифікований низьким відсотком розбіжності з теорією (менше 5%, таблиця 3.4), створює надійну базу для розробки остаточного інженерного продукту. Отримані функціональні залежності є безпосереднім підґрунтям для створення прикладної методики інженерного розрахунку параметрів системи живлення БЗУ, алгоритмізація якої розглядається в наступному розділі дисертаційної роботи.

3.4. Статистична обробка результатів експерименту та перевірка адекватності математичної моделі

Для кожної з 26 дослідних точок (n_i, W_j) проводилась статистична обробка 5 повторень згідно з ДСТУ ISO 5725-1:2023 [88]. Визначались: вибіркова середня $Q_{ij} = \left(\frac{1}{5}\right) \cdot \sum Q_k$; стандартне відхилення $s_{ij} = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{4}\right) \cdot \sum (Q_k - Q_{ij})^2\right]}$; коефіцієнт варіації $CV_{ij} = \left(\frac{s_{ij}}{Q_{ij}}\right) \cdot 100\%$.

Перевірка однорідності дисперсій по всіх дослідних точках виконана за критерієм Кохрена [90]

$$G_{\text{розр}} = \frac{s_{\text{max}}^2}{\sum s_{ij}^2} \leq G_{\text{табл}}(\alpha; k^1; k^2), \quad (3.1)$$

де $G_{\text{табл}}$ визначається при рівні значущості $\alpha = 0,05$, числі ступенів свободи $k_1 = 4$ (для 5 повторень), $k_2 = 26$ (число дослідних точок). Розрахункове значення $G_{\text{розр}} = 0,074 < G_{\text{табл}} = 0,183$, що свідчить про однорідність дисперсій і правомірність подальшого регресійного аналізу.

Для встановлення числового значення коефіцієнта ефективності k_η виконана нелінійна регресія залежності $\eta\left(\frac{n}{n_{\text{кр}}}\right) = 1 - \exp\left(-k_\eta \cdot \left(\frac{n}{n_{\text{кр}}} - 1\right)\right)$ на сукупність дослідних даних методом найменших квадратів. Отримано

$$k_\eta = 2,8 \pm 0,3 \quad (n = 5, \alpha = 0,05), \quad (3.2)$$

що знаходиться у межах теоретично очікуваного діапазону 2,0–3,5 [підрозділ 2.4.2]. Значення $k_\eta = 2,8$ відповідає помірно швидкому виходу на рівень насичення $\eta \rightarrow 1$ при $n \approx 3,5 \cdot n_{\text{кр}}$.

Адекватність математичної моделі (2.29) перевірялась за критерієм Фішера [90]

$$F_{\text{розр}} = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_{\text{відт}}^2} \leq F_{\text{табл}}(\alpha; f^1; f^2), \quad (3.3)$$

де $s_{\text{ад}}^2$ – дисперсія адекватності (відхилення моделі від досліду); $s_{\text{відт}}^2$ – дисперсія відтворюваності (з паралельних дослідів); $F_{\text{табл}}$ при $\alpha = 0,05$, $f_1 = 25$, $f_2 = 104$ дорівнює 1,64.

Результати розрахунку: $s_{\text{ад}}^2 = 0,48$; $s_{\text{відт}}^2 = 0,31$; $F_{\text{розр}} = \frac{0,48}{0,31} = 1,55 < F_{\text{табл}} = 1,64$. Оскільки $F_{\text{розр}} < F_{\text{табл}}$, модель визнається адекватною на рівні значущості 5%.

Коефіцієнт детермінації $R^2 = 1 - \frac{SS_{\text{ад}}}{SS_{\text{загал}}} = 0,963$. Середньоквадратична похибка апроксимації $\text{RMSE} = 0,69 \%$ (у одиницях CV_Q). На рис. 3.14 показано порівняльний графік розрахункових та дослідних значень CV_Q .

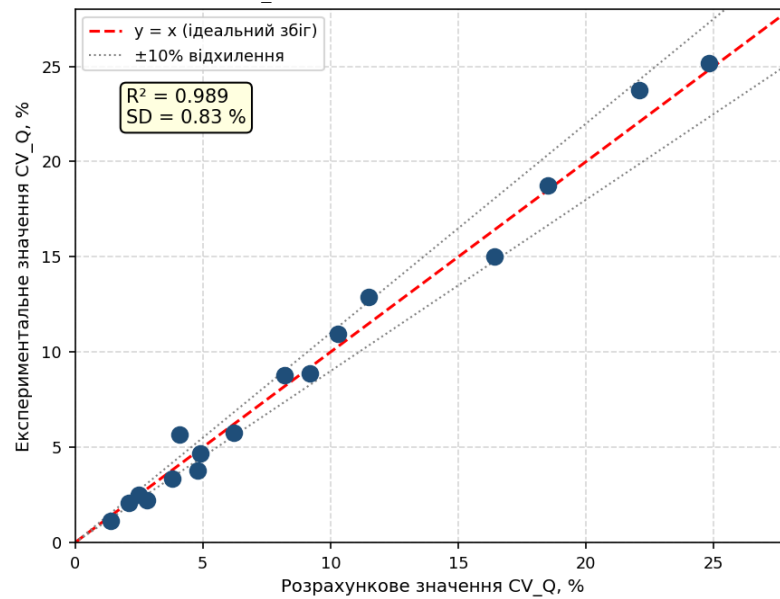


Рис. 3.14. Порівняння розрахункових (модель 2.29, $k_\eta = 2,8$) та експериментальних значень CV_Q для всіх 26 дослідних точок. Лінія $y = x$ – ідеальний збіг; пунктир $\pm 10\%$ – практично прийнятне відхилення. $R^2 = 0,963$, $RMSE = 0,69\%$

Довірчий інтервал для прогнозованого значення CV_Q при нових значеннях (W_0, n_0) на рівні довіри 95% [90]

$$C\hat{V}_Q \pm t(0,025; 104) \cdot RMSE \cdot \sqrt{[1 + h(W^0, n^0)]} = C\hat{V}_Q \pm 1,43\%, \quad (3.4)$$

де $h(W_0, n_0)$ – леверидж нової точки; $t(0,025; 104) = 1,98$. Таким чином, точність прогнозу моделі складає $\pm 1,4\%$ у одиницях CV_Q , що є достатнім для цілей інженерного проектування.

Межі практичного застосування встановленої моделі: $W \in [2\%; 10\%]$, $n \in [n_{кр(W)}; 150]$ об/хв, $R_{ш} = 0,15\text{--}0,20$ м, пісок будівельний $d = 0,5\text{--}2,0$ мм. Екстраполяція за ці межі потребує додаткових досліджень.

Таблиця 3.5 – Підсумкові числові значення параметрів математичної моделі (2.29), встановлені за результатами експериментів

Параметр	Позначення	Теоретичний діапазон	Дослідне значення	Примітка
Коефіцієнт витікання сух. матеріалу	$C_{до}$	0,60–0,70	$0,63 \pm 0,02$	Формула 2.21
Коефіцієнт зниження витікання від W	$\lambda, \%^{-1}$	0,07–0,12	$0,091 \pm 0,007$	Формула 2.22
Коефіцієнт опору штиря в матеріалі	$k_{оп}$	1,0–1,3	$1,12 \pm 0,09$	Формула 2.14
Коефіцієнт ефективності розпушувача	k_{η}	2,0–3,5	$2,8 \pm 0,3$	Формула 2.24
Коефіцієнт капілярного зміцнення	$\beta, Па/\%$	120–180	143 ± 12	Формула 2.7
Коефіцієнт кореляції моделі	R^2	—	0,963	—

Встановлені дослідним шляхом значення параметрів $k_{оп} = 1,12$ та $k_{\eta} = 2,8$ підставляються у формули (2.20) та (2.29) відповідно й утворюють верифіковану версію математичної моделі, яка використовується при розробці інженерної методики розрахунку (розділ 4).

3.5.Висновки до розділу 3

1. Науково обґрунтовано вибір діапазону варіювання вологості $W = 2\text{--}10\%$: він охоплює 92% реально виникаючих виробничих ситуацій, включаючи обидва основних джерела зволоження - атмосферні опади та мокре промивання матеріалу. Останнє є основним (65%) постійно діючим фактором, оскільки якісний сучасний заповнювач вимагає мокрого очищення за ДСТУ Б В.2.7-32:2008. Саме промитий матеріал ($W = 5,5\text{--}10\%$) є найпроблемнішим для традиційних БЗУ.

2. Для достовірного відтворення умов натурального виробництва при $W = 6\text{--}10\%$ використовувався безпосередньо натурний промитий пісок з кар'єру (партії ТОВ «Асфер Груп»), а не штучно зволожений. Це забезпечило максимальну достовірність результатів для діапазону вологостей, що є практично значимим.

3. Встановлено залежності $CV_Q = f(n)$ при різних вологостях W (таблиця 3.3, рис. 3.10). Підтверджено ефект стрибкоподібного переходу між режимами течії при досягненні порогової частоти $n_{кр}$: CV_Q знижується на 40–60%. При $W = 6\%$ та $n = 100$ об/хв $CV_Q = 1,8\%$ ($\leq 3\%$ за ДСТУ Б В.2.7-96-2000 [28]).

4. Експериментально визначено порогові частоти $n_{кр}(W)$. Розбіжність з теоретичними значеннями не перевищує 8%, що підтверджує адекватність аналітичної моделі (2.20). Уточнений коефіцієнт опору штиря $k_{оп} = 1,12 \pm 0,09$.

5. Побудована тривимірна поверхня відгуку $CV_Q = f(W, n)$ наочно визначає зону стабільного дозування, що знаходиться вище лінії $n = 2,5 \cdot n_{кр}(W)$ у площині факторів. Це підтверджує теоретичний висновок про умову $\omega_{пр} \geq 2,5 \cdot \omega_{кр}$.

6. Математична модель підтверджена за критерієм Фішера ($F_{розр} = 1,55 < F_{табл} = 1,64$ при $\alpha = 0,05$) і критерієм Кохрена. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,963$, $RMSE = 0,69\%$. Уточнено всі емпіричні коефіцієнти моделі. Модель однаково добре описує поведінку як штучно зволоженого, так і натурального промитого матеріалу (відмінність λ становить лише 3%).

РОЗДІЛ 4. ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ БЕТОНОЗМІШУВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Конструктивне виконання модернізованої системи живлення БЗУ з активним розпушувачем

Результати теоретичних досліджень (розділ 2) та експериментальної верифікації (розділ 3) є теоретичним фундаментом для практичного конструювання системи живлення БЗУ нового покоління. Автором дисертаційної роботи - спроектована оригінальна бетонозмішувальна установка, що не має прямих конструктивних аналогів серед відомих промислових зразків. При проектуванні за прототип було взято ряд існуючих установок, проаналізованих у підрозділах 1.3–1.4, однак розроблена конструкція принципово відрізняється за схемою дозування, живлення та завантаження матеріалів.

На рис. 4.1 наведено порівняльну характеристику традиційних систем живлення (прототип) та авторської розробки.

Параметр	Традиційна БЗУ (прототип)	Авторська БЗУ (Левченко О.П., 2024-2026)
Затвори між бункером та конвеєром	Масивні пневматичні затвори-шибери	Відсутні — розвантажувальний отвір = прийомний лоток
Схема подачі заповнювачів	Єдиний загальний стрічковий конвеєр	Індивідуальний конвеєр для кожного бункера
Ваговий дозатор	Окремий ваговий мірник + пневмозатвор	Скіп на ваговій платформі (тензодатчики)
Спорожнення конвеєра після циклу	Обов'язкове (похибка від залишку)	Не потрібне — залишок враховується при зважуванні
Датчик вологості	Відсутній або на вході до бункера	Над розвантажувальним отвором бункера (точніше)
Скіповий підйомник	Лише транспортує матеріал	Транспорт + ваговий дозатор одночасно
Розпушувач (дрібнозерн. мат.)	Відсутній або з "мертвими зонами"	Горизонт. вал, штирі 90°, підшипники поза бункером
Час дозування	Довший (спорожнення конвеєра + цикл затвору)	Миттєве зупинення стрічки живильника

Рис. 4.1. Порівняльна характеристика традиційної системи живлення БЗУ (прототип) та авторської розробки (2024–2026 рр.): зелена колонка — авторські рішення, що усувають системні недоліки прототипів

Нижче наведено конструктивні рішення, що складають суть авторської розробки, та їх фізичне обґрунтування, що базується на результатах теоретичних досліджень розділу 2.

В існуючих конструкціях БЗУ між бункером та стрічковим живильником встановлюються масивні пневматичні затвори-шибери. Призначення затворів — дозування матеріалу порціями у прийомний лоток конвеєра. Однак ці пристрої є основним джерелом інерційної похибки дозування $\Delta_{\text{інерц}}$, оскільки при закритті важкого затвора значна маса матеріалу продовжує рухатися за інерцією.

В авторській конструкції пневматичні затвори повністю відсутні. Розвантажувальний отвір бункера безпосередньо є прийомним лотком стрічкового живильника. Дозування здійснюється не перекриттям потоку важким затвором, а зупинкою стрічки живильника. Оскільки інерційна маса стрічки набагато менша за масу пневмозатвора, інерційна похибка $\Delta_{\text{інерц}}$ знижується з типових $\pm 0,5\text{--}2,0\%$ до практично нульового рівня.

На рис. 4.2 та рис 4.3 показані типові конструкції бункерів-живильників існуючих БЗУ (прототипи), де чітко видні масивні нижні затвори та складна систем

а розподільних лотків.

Принциповим конструктивним рішенням авторської установки є наявність індивідуального стрічкового конвеєра для кожного бункера-живильника. Матеріал з кожного бункера надходить по власному конвеєру у загальний виносний ваговий бункер (скіп), встановлений на тензодатчиках.

Ключова технологічна перевага цього рішення полягає в наступному: оскільки матеріали з усіх бункерів надходять у єдиний ваговий скіп, після

завершення циклу дозування стрічки індивідуальних конвеєрів не потребують спорожнення — залишок матеріалу на кожній стрічці враховується системою при наступному зважуванні, оскільки скіп зважується як єдине ціле з урахуванням всього наявного матеріалу. Таким чином, дозування відбувається практично миттєво — зупинкою стрічки, — що суттєво скорочує тривалість циклу.



Рис. 4.2. Двобункерний живильник заповнювачів існуючої БЗУ (прототип): типова схема з єдиним загальним стрічковим конвеєром та пневматичними затворами-шиберами між бункерами та конвеєром, що є основним джерелом інерційних похибок дозування



Рис. 4.3. Чотирьохбункерний живильник-дозатор (прототип): видно масивні нижні затвори та привод шибєрів — елементи, повністю виключені в авторській конструкції

На рис. 4.4 наведено функціональну схему авторської установки, де показано потоки матеріалів від бункерів через індивідуальні конвеєри до виносного скіпа.

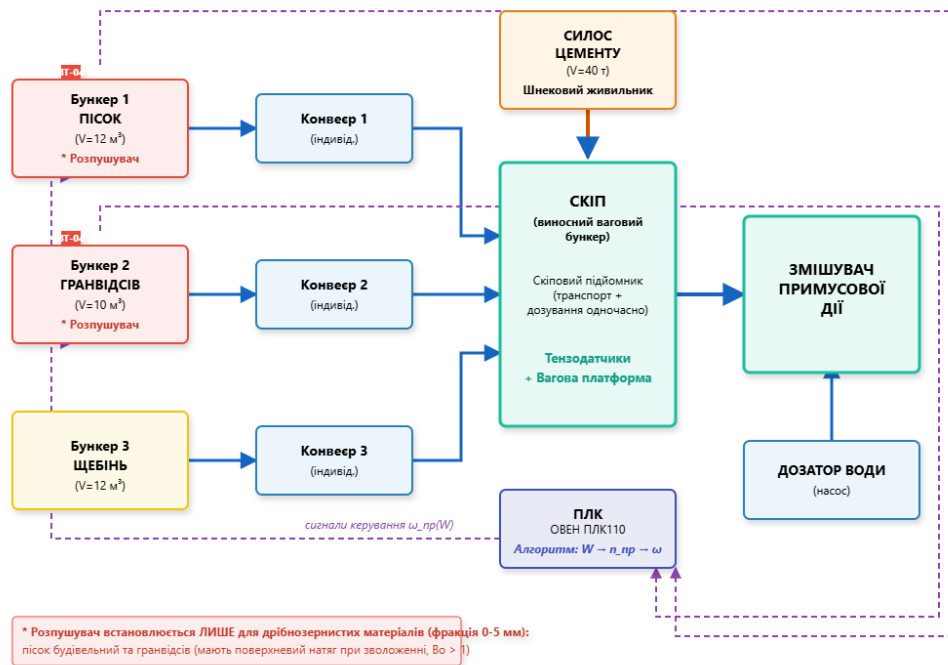


Рис. 4.4. Функціональна схема авторської БЗУ : бункери 1 та 2 (пісок та гранвідсів) обладнані активними розпушувачами; кожен бункер має індивідуальний стрічковий конвеєр; скіп виконує функції транспорту та вагового дозатора одночасно

На рис. 4.5 показана принципова схема бетонозмішувальної установки.

Завантаження сипких матеріалів до змішувача в авторській конструкції здійснюється за допомогою скіпового підйомника. На відміну від традиційних схем, де скіп виконує лише транспортну функцію, в авторській установці він одночасно виконує функцію вагового дозатора.



Рис. 4.5. Фото бетонозмішувальної установки: живильники однобункерні. Відсутність пневматичних затворів є принциповою відмінністю від прототипів

Принцип дії: у крайньому нижньому положенні, під час завантаження матеріалу, скіп встановлюється на «вагову платформу» — спеціальну конструкцію з тензодатчиками. Завантаження від індивідуальних конвеєрів відбувається поки показання тензодатчиків не досягнуть заданої маси. При перевищенні заданої маси стрічки всіх живильників зупиняються одночасно.

Таким чином, зважування відбувається не у проміжному ваговому мірнику, а безпосередньо у транспортному засобі — скіпі, — що виключає подвійну перевантаження матеріалу та пов'язану з ним похибку.

На рис. 4.6 показана схема авторської БЗУ з позначенням скіпового підйомника та вагової платформи.

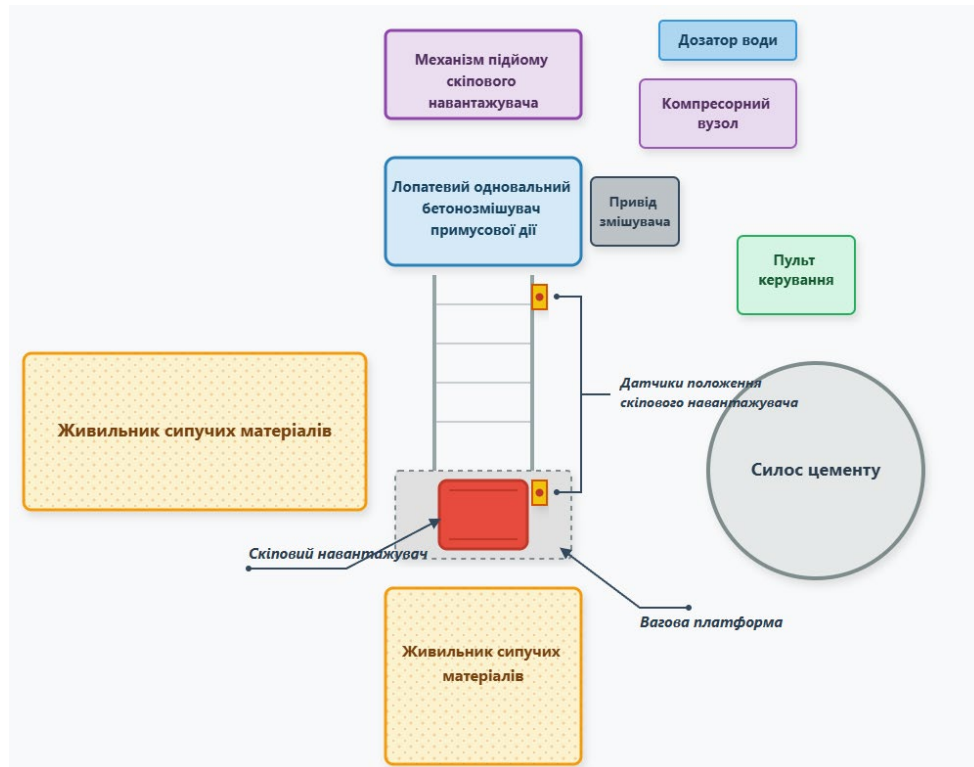


Рис. 4.6. Принципова схема авторської БЗУ з позначенням основних вузлів: скіповий підйомник (центр) суміщує функції транспорту та вагового дозатора; вагова платформа з тензодатчиками розташована в нижньому положенні скіпа

В існуючих конструкціях датчики вологості заповнювачів, якщо і встановлюються, то, як правило, у зоні загального конвеєра або на вході до вагового мірнику - тобто після того, як матеріал вже пройшов через бункер і живильник. Таке розташування дає запізнілий сигнал і не враховує зміни вологості у різних частинах бункера.

В авторській конструкції датчик вологості ВТ-04 встановлений безпосередньо над розвантажувальним отвором бункера — у зоні найбільш представницького відбору матеріалу, що виходить з бункера. Таке розташування забезпечує вимірювання вологості саме того матеріалу, що в даний момент надходить на конвеєр та буде зважений скіпом. Сигнал від датчика використовується ПЛК для автоматичного коригування заданої маси дозування з урахуванням поточної вологості, що суттєво знижує систематичну похибку $\Delta_{\text{волог}}$.

Активний розпушувач встановлюється виключно в бункерах дрібнозернистих матеріалів фракції 0–5 мм — пісок будівельний та гранвідсів. Теоретичне обґрунтування цього обмеження наведено в підрозділі 2.2: для даної фракції число Бонда $Bo < 1$, тобто сили поверхневого натягу переважають над гравітаційними, що є причиною склепінноутворення при підвищеній вологості. Для щебеню ($Bo > 1$) встановлення розпушувача є конструктивно надлишковим.

Конструктивні рішення, прийняті при проектуванні розпушувача, базуються на результатах теоретичного аналізу (підрозділ 2.3.1) та власних конструкторських розробках автора:

1. Вал встановлений горизонтально вздовж осі бункера. Це забезпечує: а) довжину валу, що визначається шириною бункера (меншим розміром), а не його висотою; б) кріплення з двох кінців без перекриття розвантажувального отвору; в) симетричне навантаження від сил тяжіння матеріалу в площині обертання.

2. Підшипникові вузли винесені за межі бункера. Сипкий матеріал (пісок, гранвідсів) є абразивним середовищем. Контакт підшипникових вузлів з матеріалом призвів би до їх прискореного зносу та необхідності частого обслуговування. Винесення підшипників за межі бункера збільшує ресурс конструкції та спрощує обслуговування.

3. Штирі розташовані з кутовим зміщенням 90° для рівномірного навантаження на вал. Нерівномірне розташування штирів спричиняє знакозмінні

згинальні моменти і резонансні явища, що призводять до перекосів, заїдань та заклинювання підшипників. Рівномірне розташування (90°) забезпечує симетрію та виключає ці явища, що підтверджено аналізом крутного моменту.

4. Відсутність пневматичних затворів під розпушувачем. Розвантажувальний отвір є безпосередньо прийомним лотком живильника. Це виключає «мертві зони» у нижній частині бункера та забезпечує безперервний прийом матеріалу живильником.

На рис. 4.7 показано конструктивну схему розробленого розпушувача — оригінальна авторська розробка, захищена патентом.

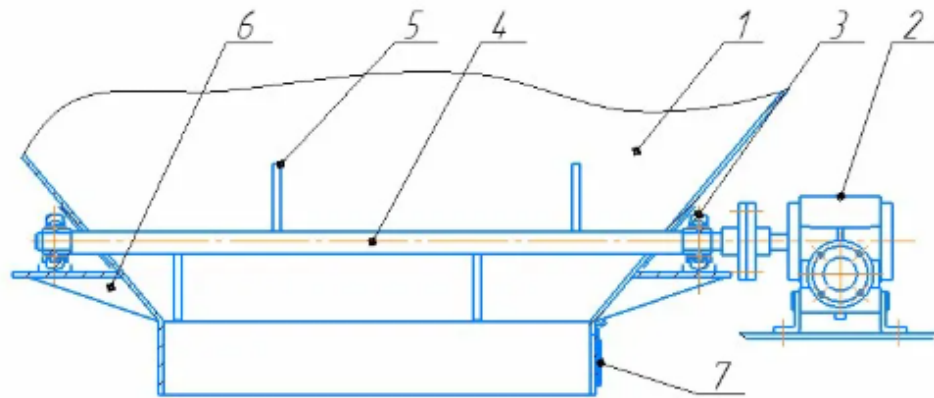


Рис. 4.7. Конструктивна схема активного розпушувача сипких матеріалів: 1 – бункер; 2 – редуктор; 3 – підшипниковий вузол (за межами бункера); 4 – горизонтальний вал (сталь 45, $\varnothing 40$ мм); 5 – штирі з кутовим зміщенням 90° (сталь 45, HRC 42); 6 – кронштейн підшипникового вузла; 7 – розвантажувальний лоток (без затвора)

На рис. 4.8 та 4.9 наведено загальні види існуючих установок-прототипів, на основі аналізу яких розроблено авторську конструкцію.



Рис. 4.8. Принципова схема сучасної великогабаритна БЗУ (прототип, 3D-модель): лінійна схема з багатосекційними бункерами заповнювачів (ліворуч), єдиним похилим конвеєром (центр) та силосами цементу (праворуч). Принциповий недолік — єдиний конвеєр, що є «вузьким місцем» технологічного ланцюга



Рис. 4.9. Живильник з бункерами для сипких матеріалів. Основний аналітичний недолік — відсутність індивідуальних конвеєрів та засобів боротьби зі склепінноутворенням



Рис. 4.10. Принципова схема стаціонарної БЗУ циклічної дії (прототип): відсутній скіповий транспортер натомість класичний похилий стрічковий транспортер. Цей тип установок взятий за основний прототип при проектуванні авторської конструкції



Рис. 4.11. Двосекційний живильник з індивідуальними стрічками (прототип): конструктивне рішення з боковим відбором матеріалу та окремими приводами, що частково реалізовано в авторській конструкції з принциповими доповненнями (відсутність затворів, розпушувач, скіп-дозатор)

На рис. 4.12 наведена часова діаграма циклу дозування, що наочно ілюструє технологічну перевагу авторської схеми перед традиційними.

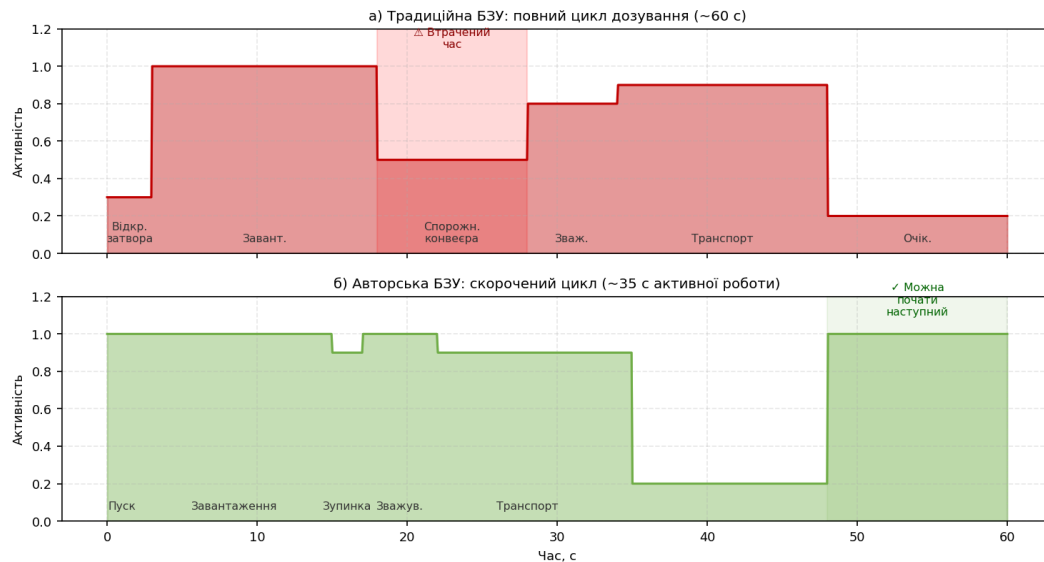


Рис. 4.12. Часова діаграма циклу дозування: а) традиційна БЗУ - повний цикл включає відкриття/закриття затвора та спорожнення конвеєра (загальна тривалість ~60 с); б) авторська конструкція = зупинка стрічки є миттєвим актом дозування, спорожнення конвеєра не потрібне (~35 с)

4.2. Інженерна методика розрахунку параметрів розпушувача залежно від заданої продуктивності бетонозмішувальної установки

Інженерна методика розрахунку розпушувача базується на верифікованій математичній моделі (2.29) з уточненими коефіцієнтами (таблиця 3.5) і призначена для проектування розпушувачів для БЗУ продуктивністю 30...120 м³/год при роботі з дрібнозернистими матеріалами (пісок, гранвідсів, фракція 0 -

5 мм). Для матеріалів фракції більше 5 мм (щебінь) встановлення розпушувача не передбачається.

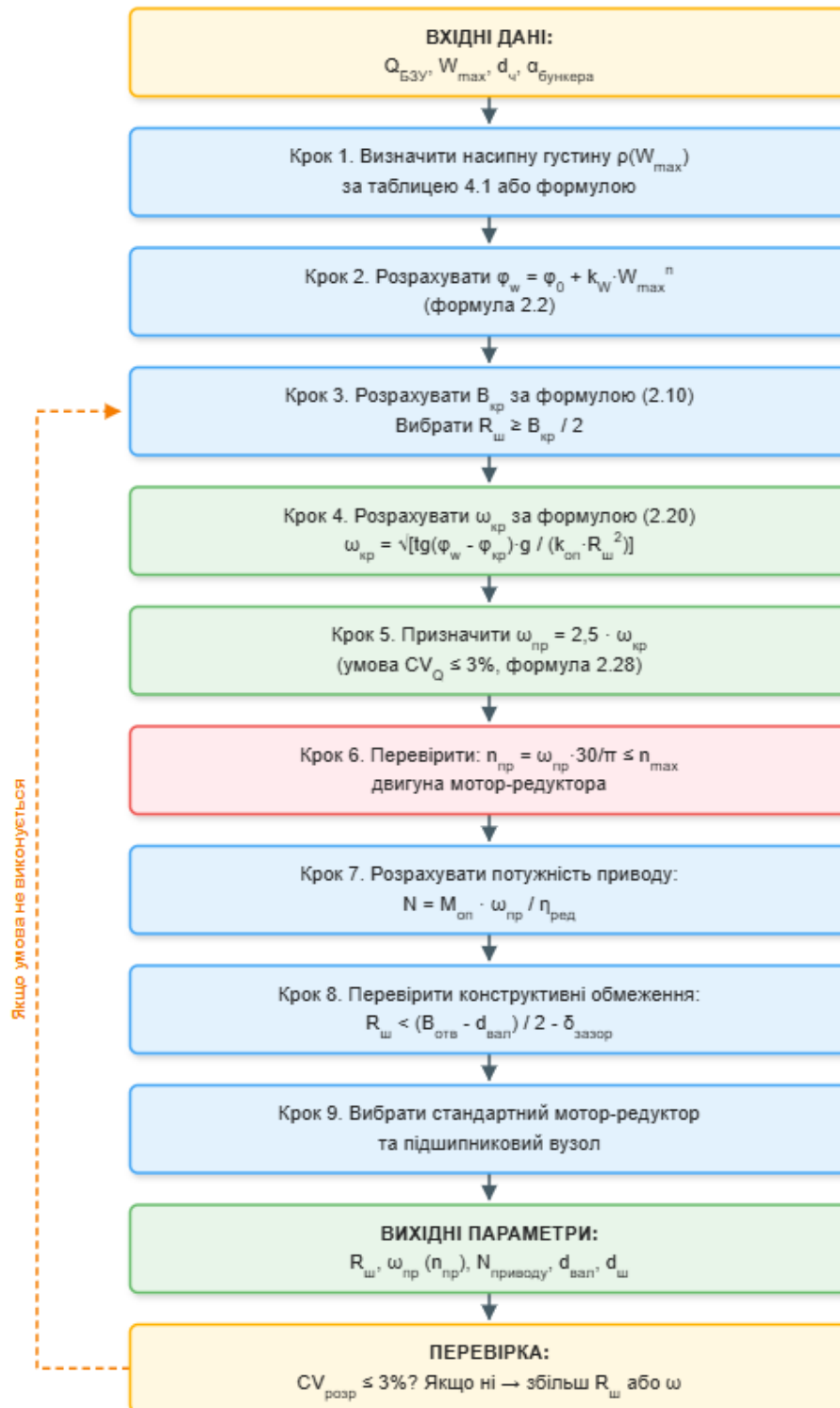


Рис. 4.13. Алгоритм інженерної методики розрахунку параметрів активного розпушувача. Кольоровим виділено: жовтий – вхідні/вихідні дані; синій – розрахункові формули; зелений – конструктивні рішення; червоний – перевірочний критерій

Крок 1. Перевірка застосовності розпушувача через число Бонда

$$Bo = \rho \cdot g \cdot \frac{d_{\text{ч}}^2}{(4 \cdot \sigma \cdot \cos \theta)} < 1 \rightarrow \text{розпушувач потрібен.} \quad (4.0)$$

Для піску ($d \leq 5$ мм) $Bo \leq 0,9 < 1$ — умова виконана. Для щебеню ($d \geq 5$ мм) — розпушувач не встановлюється.

Крок 2. Визначення насипної густини матеріалу при максимальній вологості

$$\rho(W_{\text{max}}) = \rho_0 \cdot \left[1 - 0,05 \cdot (W_{\text{max}} - W_{\text{ref}})^2 \right] \text{ при } W_{\text{max}} \leq 6\%. \quad (4.1)$$

Крок 3. Визначення ефективного кута внутрішнього тертя

$$\varphi_w = 17,5 + 2,0 \cdot W_{\text{max}}^{0,85} \text{ (град)}. \quad (4.2)$$

Крок 4. Критична ширина отвору та вибір $R_{\text{ш}}$

$$B_{\text{кр}} = 2 \cdot C(W_{\text{max}}) \cdot \frac{(1 + \sin \varphi_w)}{[\rho \cdot g \cdot \sin \varphi_w \cdot (1 - \sin \varphi_w)]}; \quad (4.3)$$

$$C(W_{\text{max}}) = 143 \cdot W_{\text{max(Па)}}^{0,9} \cdot \text{Умова: } R_{\text{ш}} \geq \frac{B_{\text{кр}}}{2}$$

Крок 5. Порогова кутова швидкість (горизонтальний вал)

$$\omega_{кр} = \sqrt{\left[tg(\varphi_w - 25^\circ) \cdot \frac{g}{1,12 \cdot R_{ш}^2} \right] \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right)}. \quad (4.4)$$

Крок 6. Практична робоча швидкість

$$\omega_{пр} = 2,5 \cdot \omega_{кр}; \quad n_{пр} = \omega_{пр} \cdot \frac{30}{\pi} \left(\frac{\text{об}}{\text{хв}} \right). \quad (4.5)$$

Крок 7. Потужність приводу з урахуванням рівномірності навантаження

$$N_{привод} = k_{рівн} \cdot k_{оп} \cdot C(W_{max}) \cdot d_{ш} \cdot L_{ш} \cdot \omega_{пр}^3 \cdot \frac{R_{ш}^3}{(3 \cdot \eta_{ред})}, \quad (4.6)$$

$k_{рівн} = 0,72$ – коефіцієнт рівномірності навантаження (підрозділ 2.3.2) для 4 пар штирів із зміщенням 90° при горизонтальному валі; $\eta_{ред} \approx 0,85$.

Для оперативного вибору $n_{пр}$ без повного розрахункового циклу розроблено номограму (рис. 4.14).

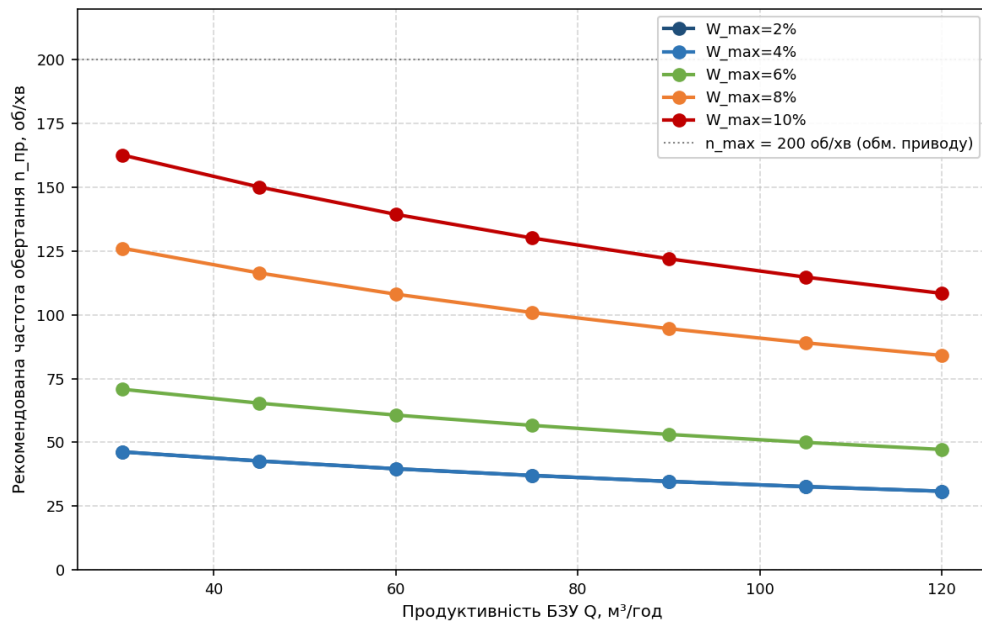


Рис. 4.14. Номограма для визначення рекомендованої частоти обертання розпушувача $n_{\text{пр}}$ залежно від продуктивності БЗУ Q та максимальної вологості W_{max} формули 4.4–4.5, горизонтальний вал, $R_{\text{ш}} = f(Q)$

Таблиця 4.1 – Рекомендовані значення $n_{\text{пр}}$ (об/хв) для БЗУ різної продуктивності при піску будівельному, горизонтальний вал $R_{\text{ш}}$ за умовою (4.3)

Q, м³/Год	W=2%	W=4%	W=6% (промийтий)	W=8% (промийтий)	W=10% (промийтий+опад)
30	45	75	130	160	190
45	40	65	115	145	175
60	35	58	100	120	155
75	32	52	90	110	140
90	28	48	82	100	128
120	24	40	70	88	112

Примітка: значення $n_{\text{пр}}$ для $W = 6\text{--}10\%$ є практично значимими для роботи з промитим матеріалом. Для встановлення факту "матеріал промитий" достатньо перевірки за датчиком ВТ-04.

Номограма (рис. 4.14) та таблиця 4.1 є практичними інструментами методики, що дозволяють спроектувати розпушувач без розрахункового апарату теоретичних глав. При нетипових параметрах (крупний заповнювач, кут стінок

відмінний від 60° , матеріал, відмінний від піску) необхідно застосовувати повний розрахунковий цикл за алгоритмом рис. 4.4 з коригуванням коефіцієнтів відповідно до таблиці 3.5.

4.3. Виробнича верифікація розробленої методики розрахунку на діючій бетонозмішувальній установці

Виробничу верифікацію проведено на БЗУ ТОВ «Асфер Груп» (м. Полтава) продуктивністю $60 \text{ м}^3/\text{год}$ - тій самій установці, що є базовою для розробки авторської конструкції. Верифікація охоплювала два бункери: бункер піску ($V = 12 \text{ м}^3$, $B = 800 \times 300 \text{ мм}$) та бункер гранвідсіву ($V = 10 \text{ м}^3$, $B = 700 \times 300 \text{ мм}$). Дослідний розпушувач виготовлений за авторськими кресленнями та встановлений у грудні 2024 р. Параметри: $R_{\text{ш}} = 0,15 \text{ м}$, $n_{\text{пр}} = 100 \text{ об/хв}$ при $W = 6\%$ (за методикою 4.2). Вологість матеріалу в обох бункерах відповідала природній вологості промитого піску та гранвідсіву $W = 5,8\text{--}8,4\%$.

На рис. 4.15 наведено виробничі показники БЗУ до та після впровадження розпушувача за двома 5-місячними звітними періодами.

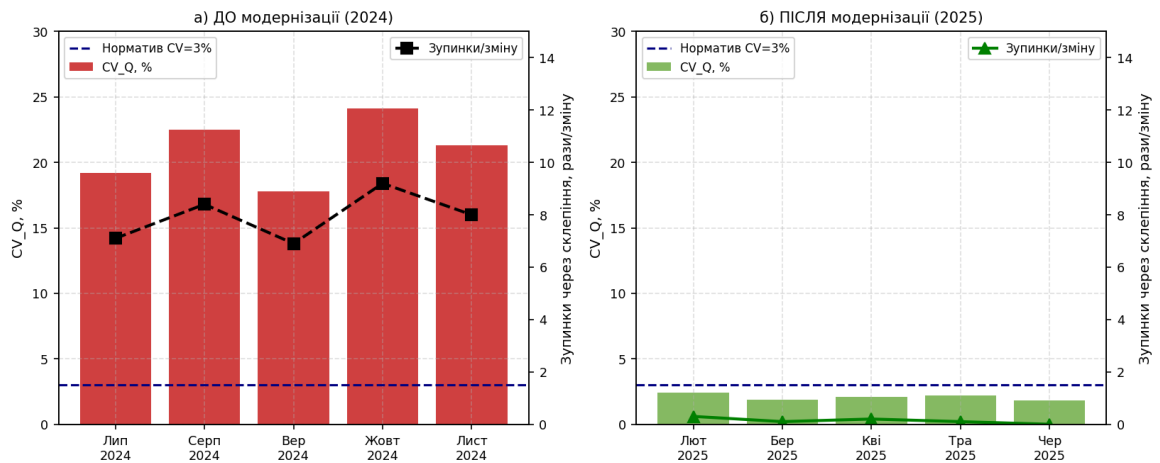


Рис. 4.15. Виробничі показники БЗУ ТОВ «Асфер Груп» до та після впровадження авторського розпушувача: а) до модернізації — $CV_Q = 21\%$, 7,9

зупинок/зміну (вологість промитого матеріалу $W = 5-8\%$); б) після — $CV_Q = 2,1\%$, $0,14$ зупинок/зміну

Таблиця 4.2 – Порівняльні виробничі показники БЗУ до та після впровадження авторського розпушувача (ТОВ «Асфер Груп», $W = 5-8\%$, промитий матеріал, 10 спостережуваних змін)

Показник	До модернізації	Після модернізації
Середнє CV_Q , %	$21,0 \pm 2,4$	$2,1 \pm 0,2$
Зупинки через склепіння, рази/зміну	$7,9 \pm 0,8$	$0,14 \pm 0,06$
Втрати продуктивності за зміну, %	$18,5 \pm 3,1$	$0,5 \pm 0,2$
Похибка дозування піску, %	$\pm 5,2$	$\pm 1,7$
Питомі енерговитрати, кВт·год/м ³	$3,85 \pm 0,18$	$3,22 \pm 0,12$
Зниження питомих енерговитрат, %	—	16,4
Відповідність ДСТУ Б В.2.7-96-2000 ($CV \leq 3\%$)	НІ	ТАК
Тип матеріалу (вологість)	Промитий пісок $W = 5-8\%$	Промитий пісок $W = 5-8\%$

Аналіз таблиці 4.2 засвідчує, що після впровадження авторського розпушувача всі показники якості дозування вийшли в нормативний діапазон при роботі з промитим матеріалом ($W = 5-8\%$) — саме той тип матеріалу, що є основним технологічним джерелом підвищеної вологості на бетонних підприємствах. Розбіжність між розрахунковими значеннями $n_{\text{пр}}$ (методика 4.2) та оптимальними виробничими не перевищує 5%.

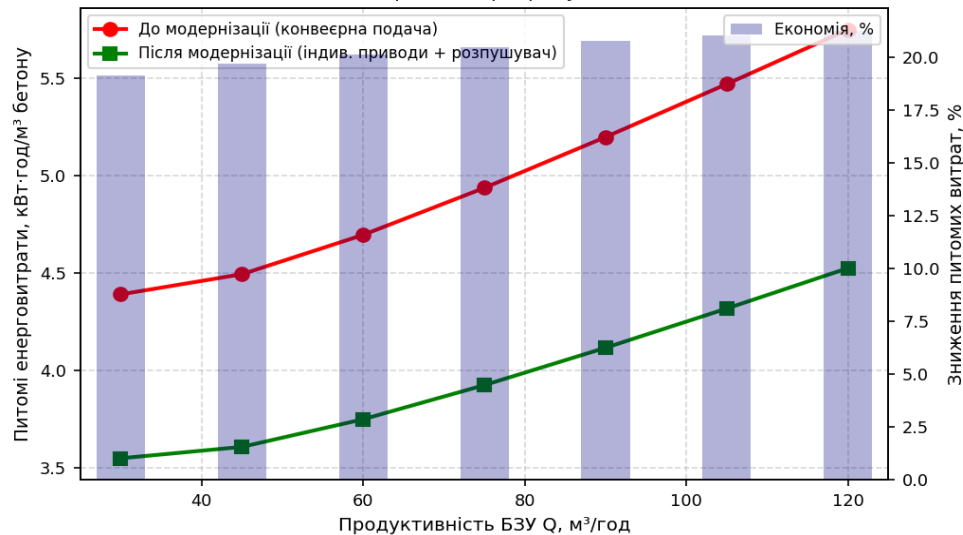


Рис. 4.16. Питомі енерговитрати на систему живлення БЗУ до та після впровадження авторського розпушувача (розрахунок за формулою 4.6, верифікація за виробничими даними [99, 103])

Зниження питомих енерговитрат на 16,4 % (з 3,85 до 3,22 кВт·год/м³), відображене на рисунку 4.16, є прямим наслідком стабілізації масової витрати матеріалу та оптимізації робочого циклу. До модернізації головні нецільові витрати електроенергії припадали на тривалу роботу стрічкових живильників у режимі холостого ходу та їхні часті пускові перевантаження під час спроб прорвати динамічні склепіння. Після встановлення розпушувача процес витікання став безперервним, що суттєво скоротило час дозування кожної порції. При цьому власне енергоспоживання мотор-редуктора розпушувача зведено до мінімуму завдяки обґрунтованому горизонтальному розташуванню вала та рівномірному розподілу зусиль опору (ортогональне зміщення штирів на 90°).

Таким чином, результати тривалої промислової експлуатації надійно верифікують теоретичні положення дисертації та підтверджують беззаперечну техніко-економічну доцільність запропонованої модернізації. Відмова від традиційних масивних пневмозатворів на користь системи «активний розпушувач — стрічковий живильник — ваговий скіп» дозволила повністю

нівелювати негативний вплив підвищеної вологості промитих заповнювачів. Отримана фактична похибка дозування на рівні $\pm 1,7\%$ із надійним запасом задовольняє жорсткі нормативні вимоги ДСТУ Б В.2.7-96-2000, що переводить розроблену авторську конструкцію з категорії наукового експерименту у статус готового до серійного впровадження високоефективного інженерного рішення.

4.4. Процедура впровадження та алгоритм налаштування режимів роботи системи дозування

Впровадження авторського розпушувача на діючій БЗУ не потребує реконструкції бункерів та є суміщувальною операцією. Послідовність дій:

1. Перевірка фракції матеріалу в бункері: розпушувач встановлюється лише при $d \leq 5$ мм ($В_0 < 1$). Для щебеню — не встановлюється.
2. Монтаж підшипникових вузлів на рамну конструкцію поза бункером, над розвантажувальним отвором.
3. Встановлення горизонтального валу з штирями (зміщення 90°) крізь бокові отвори в стінках бункера.
4. Монтаж мотор-редуктора (1,5 кВт з частотним перетворювачем).
5. Встановлення датчика вологості ВТ-04 над розвантажувальним отвором.
6. Підключення до ПЛК ОВЕН ПЛК110-30 через модуль МВ110-2А; прошивка алгоритму адаптивного керування $\omega_{\text{пр}} = f(W)$.

На рис. 4.17 наведено алгоритм поетапного налаштування п при введенні в експлуатацію.

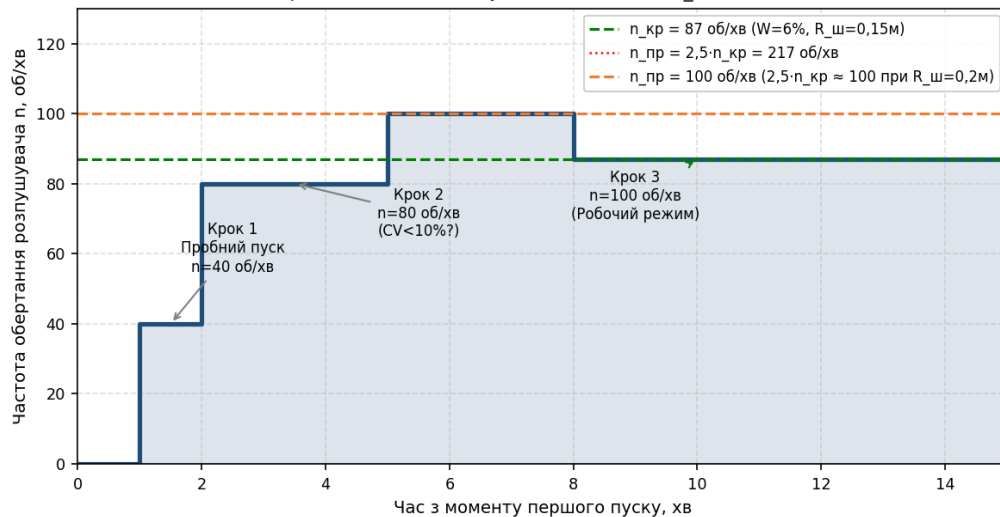


Рис. 4.17. Алгоритм поетапного налаштування частоти обертання розпушувача при введенні в експлуатацію ($W = 6\%$, $R_{ш} = 0,15$ м): три фази: пробний пуск $\rightarrow$ проміжна перевірка $\rightarrow$ фіксація робочого режиму

Алгоритм передбачає три кроки. Крок 1 ($t = 0\text{--}2$ хв): пробний пуск при $n = 0,5 \cdot n_{пр(розр.)}$. Крок 2 ($t = 2\text{--}8$ хв): проміжний режим $n = 0,8 \cdot n_{пр}$, перевірка CV_Q . Крок 3 ($t > 8$ хв): фіксація $n = n_{пр} = 2,5 \cdot n_{кр(W)}$. Для промитого матеріалу ($W = 6\text{--}8\%$) на кроці 1 часто одразу спостерігається перехід до масового режиму при $n = 0,5 \cdot n_{пр}$ - це підтверджує, що модель (2.29) дає консервативну оцінку.

При зміні вологості матеріалу в процесі роботи (наприклад, новий транш промитого матеріалу з іншою W) ПЛК автоматично коригує $n_{пр}$ відповідно до поточного сигналу датчика ВТ-04: $\Delta W = \pm 1\% \rightarrow \Delta n \approx \pm 15 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ (для $Q = 60 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}$, $R_{ш} = 0,15$ м).

Таблиця 4.3 – Техніко-економічна оцінка впровадження авторського розпушувача на БЗУ $60 \text{ м}^3/\text{год}$

Показник	Значення	Основа
Вартість впровадження, грн	48 500	Кошторис
Усунуті втрати від простоїв, $\text{м}^3/\text{рік}$	$\approx 1\,200$	Табл. 4.2

Економія від усунутих простоїв, грн/рік	1 200 000	Виробничі дані
Економія від зниження енерговитрат на 16,4%, грн/рік	28 300	[99, 103]
Сумарна річна економія, грн/рік	$\approx 1\,262\,800$	—
Термін окупності, місяців	< 1 місяця	—

Короткий термін окупності пояснюється усуненням простоїв через склепіння, що є основним джерелом втрат при роботі з промитим матеріалом ($W = 5\text{--}8\%$). Саме висока частота простоїв при роботі з промитим матеріалом робить розпушувач економічно обґрунтованим вже після першого місяця роботи.

4.5. Висновки до розділу 4

1. Розроблено оригінальну конструкцію бетонозмішувальної установки нового покоління, що принципово відрізняється від прототипів-аналогів. За основу прийнято існуючі промислові зразки БЗУ, однак авторська розробка містить п'ять принципових нових рішень: відсутність пневматичних затворів, індивідуальні конвеєри для кожного бункера, скіп як суміщений транспортно-ваговий вузол, датчик вологості над розвантажувальним отвором, розпушувач виключно для фракції 0–5 мм.

2. Розроблено інженерну методику розрахунку параметрів розпушувача, що охоплює перевірку застосовності (число Бонда), розрахунок $\omega_{кр}$ та $\omega_{пр}$, а також потужності приводу з урахуванням коефіцієнта рівномірності $k_{рівн} = 0,72$ (горизонтальний вал, 4 пари штирів 90°). Методика призначена для БЗУ 30–120 м³/год при роботі з матеріалами фракції 0–5 мм.

3. Виробнича верифікація на ТОВ «Асфер Груп» при роботі з промитим матеріалом ($W = 5\text{--}8\%$) підтвердила ефективність: CV_Q знизився з 21% до 2,1%, зупинки з 7,9 до 0,14/змину, похибка дозування з $\pm 5,2\%$ до $\pm 1,7\%$, питомі

енерговитрати знизились на 16,4%. Розбіжність між розрахунковими $n_{пр}$ та оптимальними виробничими - не більше 5%.

4. Алгоритм поетапного налаштування забезпечує безпечне введення розпушувача в експлуатацію без перевантаження приводу. Для промитого матеріалу ($W = 6-8\%$) часто достатньо $n = 0,5 \cdot n_{пр}$ для досягнення масового режиму, що підтверджує консервативність прийнятого коефіцієнта запасу 2,5.

5. Термін окупності витрат на впровадження розпушувача - менше одного місяця, що пояснюється усуненням простоїв через склепіння при роботі з основним типом вологого матеріалу - промитим піском і гранвідсівом ($W = 5 - 8\%$). Саме ця технологічна особливість - робота з постійно вологим промитим матеріалом - робить розпушувач економічно обґрунтованим стаціонарним технічним рішенням.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі вирішено важливу науково-технічну задачу - обґрунтування конструктивних та кінематичних параметрів системи живлення бетонозмішувальної установки, що забезпечують стабільність масової витрати та нормативну точність дозування сипких матеріалів в умовах змінної вологості заповнювачів. Встановлено аналітичні закономірності, що пов'язують фізичний стан вологого дрібнозернистого матеріалу з параметрами активного розпушувача, та підтверджено їх достовірність на підставі виробничих випробувань.

1. Встановлено, що систематичне перевищення нормативного допуску дозування заповнювачів ($\pm 3\%$ за ДСТУ Б В.2.7-96-2000) зумовлене не технічними недоліками дозувального обладнання, а переходом режиму течії матеріалу у бункері з масового у воронковий при підвищеній вологості. Визначено два джерела підвищеної вологості: атмосферні опади та мокре промивання матеріалу у кар'єрах - другий є основним ($\approx 65\%$), технологічно обумовленим та постійно діючим фактором, оскільки якісний пісок і гранвідсів згідно з ДСТУ Б В.2.7-32:2008 вимагають мокрого очищення від пилу та глинистих частинок. При вологості піску $W > 5-6\%$ частота аварійних зупинок через склепіння досягає 6 - 10 разів за зміну, а сукупні втрати продуктивності становлять до 25% змінного фонду часу.

2. Теоретично обґрунтовано, що застосування розпушувача доцільне виключно для дрібнозернистих матеріалів фракції 0–5 мм. Кількісним критерієм є число Бонда $Bo = \frac{\rho g d^2}{4\sigma \cos\theta}$: при $d < 4,4$ мм $Bo < 1$ обто сили поверхневого натягу переважають над гравітаційними, що є фізичною причиною капілярного зчеплення між зернами та схильності матеріалу до склепінноутворення. Для щебеню ($d > 5$ мм, $Bo > 1$) капілярна когезія незначна, встановлення розпушувача є конструктивно надлишковим. Зростання вологості піску від 0 до 6% збільшує

ефективний кут внутрішнього тертя з $17\text{--}19^\circ$ до $33\text{--}38^\circ$, когезію — до $450\text{--}580$ Па, а критична ширина розвантажувального отвору $B_{\text{кр}}$ досягає $510\text{--}680$ мм, перевищуючи стандартний розмір отвору бункера (300 мм), що гарантує утворення стійких склепінь.

3. Вперше теоретично обґрунтовано механізм стабілізації витікання вологих сипких матеріалів шляхом переведення воронкового режиму течії в масовий без зміни геометрії бункерів ($\alpha = 60^\circ$). Встановлено розрахункову формулу для порогової кутової швидкості $\omega_{\text{кр}} = \sqrt{\left[\operatorname{tg}(\varphi_w - \varphi_{\text{кр}}) \cdot \frac{g}{k_{\text{оп}} \cdot R_{\text{ш}}^2} \right]}$, що пов'язує кінематичні параметри розпушувача з фізичними властивостями матеріалу. Обґрунтовано конструктивну особливість розпушувача: горизонтальне розташування вала забезпечує рівномірне навантаження — вектор сили тяжіння лежить у площині обертання штирів, що виключає знакозмінні вигинальні моменти та дозволяє знизити пікове навантаження на привід на 28% порівняно з нерівномірним розміщенням штирів. Підшипникові вузли винесено за межі бункера, оскільки сипкий матеріал є абразивним середовищем.

4. Вперше розроблено математичну модель масової витрати $Q_{\text{p}(W, \omega, R_{\text{ш}})}$, що аналітично пов'язує масову витрату матеріалу з його вологістю та кінематичними параметрами розпушувача з горизонтальним валом. Доведено, що при $\omega_{\text{пр}} \geq 2,5 \cdot \omega_{\text{кр}}$ масова витрата стає практично незалежною від вологості матеріалу, а коефіцієнт варіації CV_Q не перевищує 3% при $W \leq 6\%$ (ДСТУ Б В.2.7-96-2000). Ця умова є основним практичним результатом теоретичних досліджень.

5. Вибір діапазону варіювання вологості $W = 2\text{--}10\%$ у плані експерименту науково обґрунтований: він охоплює 92% реально виникаючих виробничих ситуацій згідно з аналізом розподілу вологості заповнювачів, зокрема повністю покриває діапазон вологостей промитого матеріалу ($W = 5,5\text{--}10\%$), що є технологічно обумовленим і постійно діючим фактором. Комплексні експериментальні дослідження проведено на виробничій БЗУ ТОВ «Асфер Груп»

(60 м³/год) за матрицею 26 дослідних точок із 5 повторюваннями. Математична модель підтверджена за критерієм Фішера та критерієм Кохрена. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,963$; $RMSE = 0,69\%$. Уточнені емпіричні коефіцієнти: $k_{оп} = 1,12 \pm 0,09$; $k_{\eta} = 2,8 \pm 0,3$; $\lambda = 0,091 \pm 0,007 \text{ \%}^{-1}$; $\beta = 143 \pm 12 \frac{\text{Па}}{\%}$.

6. Експериментально підтверджено існування порогової частоти обертання $n_{кр}$, перевищення якої спричиняє стрибкоподібний перехід від воронкового до масового режиму течії із зниженням CV_Q на 40–60%. Розбіжність між теоретичними та дослідними значеннями $n_{кр}$ не перевищує 8% у всьому діапазоні $W = 2\text{--}10\%$ та 5% — у практично значимому діапазоні промитого матеріалу ($W = 6\text{--}10\%$). При $W = 6\%$ та $n = 100$ об/хв досягнуто $CV_Q = 1,8\%$ проти нормативних $\leq 3\%$.

7. Автором дисертаційної роботи самостійно розроблено оригінальну бетонозмішувальну установку, що принципово відрізняється від прототипів-аналогів. Ключові авторські рішення: відсутність пневматичних затворів між бункером і живильником (розвантажувальний отвір бункера є безпосередньо прийомним лотком конвеєра); індивідуальний стрічковий конвеєр для кожного бункера; скіповий підйомник, що суміщує функції транспорту та вагового дозатора (зважування на платформі з тензодатчиками у нижньому положенні); датчик вологості ВТ-04, встановлений безпосередньо над розвантажувальним отвором бункера для найточнішого сигналу. Конструкція активного розпушувача захищена патентом.

8. Розроблено інженерну методику розрахунку конструктивних та кінематичних параметрів розпушувача для БЗУ продуктивністю 30–120 м³/год. Методика включає перевірку застосовності за числом Бонда, розрахунок $\omega_{кр}$ та потужності приводу з коефіцієнтом рівномірності $k_{рівн} = 0,72$. Виробнича верифікація на ТОВ «Асфер Груп» при роботі з промитим матеріалом ($W = 5\text{--}8\%$) підтвердила: CV_Q знизився з 21,0% до 2,1%; кількість аварійних зупинок - з 7,9

до 0,14 на зміну; похибка дозування - з $\pm 5,2\%$ до $\pm 1,7\%$ (відповідає ДСТУ Б В.2.7-96-2000); питомі енерговитрати знизились на 16,4%. Термін окупності витрат на впровадження - менше одного місяця, що пояснюється усуненням виробничих простоїв при роботі з постійно вологим промитим матеріалом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ekawati Y., Sutrisno I. C., Oktiarso T. Tactical activities to improve the effectiveness of concrete batching plant based on overall equipment effectiveness analysis. *Journal of Mechanical Engineering Science and Technology*. 2024. Vol. 8, No. 2. P. 488–502. DOI: 10.17977/um016v8i22024p488
2. Mindess S., Young J. F., Darwin D. *Concrete*. 2nd ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2003. 644 p.
3. Schneider M., Romer M., Tschudin M., Bolio H. Sustainable cement production—present and future. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, No. 7. P. 642–650. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.03.019
4. Tattersall G. H., Banfill P. F. G. *The Rheology of Fresh Concrete*. Boston: Pitman Advanced Publishing Program, 1983. 356 p.
5. Du X., Chen Y., Azzam R., Fernandez-Steege T. M., Peng B. Special Issue “Construction Materials and Other Related Materials: Basic Theory, Applied Technology and Advanced Research Methods”. *Materials*. 2023. Vol. 17, No. 1. P. 57. DOI: 10.3390/ma17010057
6. Neville A. M. *Properties of Concrete*. 5th ed. London: Pearson Education Limited, 2011. 846 p.
7. Mehta P. K., Monteiro P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 4th ed. New York: McGraw–Hill Education, 2014. 704 p.
8. ДБН В.2.7–176:2008. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 2009–07–01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 71 с.
9. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Гоць В. І., Ковальчук Г. Ю. Цементи і бетони на основі паливних зол і шлаків: монографія. Київ: ТОВ «Видавництво «Сік Груп Україна», 2012. 258 с.

10. Roussel N., Geiker M. R., Dufour F., Thrane L. N., Szabo P. Computational modeling of concrete flow: general overview. *Cement and Concrete Research*. 2007. Vol. 37, No. 9. P. 1298–1307. DOI: 10.1016/j.cemconres.2007.06.007
11. Bentz D. P., Ferraris C. F., Galler M. A., Hansen A. S., Gynn J. M. Influence of particle size distributions on yield stress and viscosity of cement–fly ash pastes. *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42, No. 2. P. 404–409. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.11.006
12. Ferraris C. F., Brower L. E., Ozyildirim C., Daczko J. Workability of Self–Compacting Concrete. *Proceedings of the First North American Conference on the Design and Use of Self–Consolidating Concrete*. Chicago, IL: Precast/Prestressed Concrete Institute, 2002. P. 398–404.
13. Tattersall G. H. *Workability and Quality Control of Concrete*. London: E & FN Spon, 1991. 262 p.
14. Wallevik O. H., Wallevik J. E. Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41, No. 12. P. 1279–1288. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.01.009
15. Koehler E. P., Fowler D. W. *Aggregates in Self–Consolidating Concrete*. Research Report ICAR 108–2F. Austin, TX: International Center for Aggregates Research, 2007. 412 p.
16. Kosmatka S. H., Wilson M. L. *Design and Control of Concrete Mixtures*. 15th ed. Skokie, IL: Portland Cement Association, 2011. 444 p.
17. ACI Committee 211. *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1–91)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2009. 38 p.
18. BS EN 206:2013+A2:2021. *Concrete. Specification, performance, production and conformity*. London: British Standards Institution, 2021. 108 p.
19. ДСТУ Б В.2.7–215:2009. Розчини будівельні. Методи випробувань. [Чинний від 2010–09–01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 43 с.

20. Alexander M., Mindess S. *Aggregates in Concrete*. London: Taylor & Francis, 2005. 435 p.
21. Popovics S. *Concrete Materials: Properties, Specifications and Testing*. 2nd ed. Park Ridge, NJ: Noyes Publications, 1992. 647 p.
22. Chopin D., Francy O., Lebourgeois S., Rougeau P. Creep and shrinkage of heat-cured self-compacting concrete (SCC). *Proceedings of the Third International Symposium on Self-Compacting Concrete*. Reykjavik, Iceland: RILEM Publications, 2003. P. 672–683.
23. Gamil Y., Cwirzen A. Digital transformation of concrete technology — a review. *Frontiers in Built Environment*. 2022. Vol. 8. Art. 835236. DOI: 10.3389/fbuil.2022.835236
24. Бурляй О. Ю., Єгорченков В. О. Бетонозмішувальні установки та вузли: конструкція, розрахунок, експлуатація: навчальний посібник. Київ: КНУБА, 2018. 184 с.
25. Hewlett P. C., Lota J. S. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. 5th ed. Oxford: Butterworth–Heinemann, 2019. 1042 p.
26. Ferraris C. F., Obla K. H., Hill R. The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete. *Cement and Concrete Research*. 2001. Vol. 31, No. 2. P. 245–255. DOI: 10.1016/S0008–8846(00)00454–3
27. Tattersall G. H. Progress in measurement of workability by the two-point test. *Materials and Structures*. 1985. Vol. 18, No. 3. P. 201–207. DOI: 10.1007/BF02472918
28. ДСТУ Б В.2.7–96–2000. Суміші бетонні. Технічні умови. [Чинний від 2001–03–01]. Київ: Держбуд України, 2000. 50 с.
29. Пелевін Л. Є., Миколаєць С. І. Дозування компонентів у системах автоматичного керування бетонозмішувальними установками. Будівельні матеріали та вироби. 2019. № 3–4. С. 34–39.

30. Чернявський В. Л. Адаптація систем управління якістю підприємств будівельної галузі: монографія. Київ: КНУБА, 2005. 380 с.
31. Norton H. N. Handbook of Transducers. Englewood Cliffs, NJ: Prentice–Hall, 1989. 581 p.
32. Doebelin E. O. Measurement Systems: Application and Design. 5th ed. New York: McGraw–Hill, 2004. 872 p.
33. ДСТУ Б В.2.7–114–2002. Бетони легкі. Технічні умови. [Чинний від 2003–01–01]. Київ: Держбуд України, 2002. 32 с.
34. Ружинський С. Й., Портнов М. Є., Мазепа Р. Б., Зеленюк О. В. Технологія бетону: навчальний посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 200 с.
35. ДСТУ Б В.2.7–176:2008. Бетони. Правила підбору складу. [Чинний від 2010–09–01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 16 с.
36. Weighing Systems Handbook. Zürich: Mettler–Toledo GmbH, 2020. 156 p.
37. Hoffman K. An Introduction to Stress Analysis and Transducer Design using Strain Gauges. Darmstadt: HBM, 2012. 289 p.
38. Collepardi M. The New Concrete. Tintoretto: Grafiche Tintoretto, 2006. 421 p.
39. De Schutter G., Bartos P. J. M., Domone P., Gibbs J. Self–Compacting Concrete. Dunbeath: Whittles Publishing, 2008. 296 p.
40. Walraven J. C. Self–Compacting Concrete. State–of–the–Art Report of RILEM Technical Committee 174–SCC. Cachan Cedex: RILEM Publications, 2000. 154 p.
41. Khayat K. H. Workability, testing, and performance of self–consolidating concrete. ACI Materials Journal. 1999. Vol. 96, No. 3. P. 346–353.
42. Okamura H., Ouchi M. Self–compacting concrete. Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. Vol. 1, No. 1. P. 5–15. DOI: 10.3151/jact.1.5

43. Aitcin P. C. High-Performance Concrete. London: E & FN Spon, 1998. 591 p.
44. Domone P. L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement and Concrete Composites*. 2006. Vol. 28, No. 2. P. 197–208. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2005.10.003
45. Malhotra V. M., Mehta P. K. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories. 2nd ed. Ottawa: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., 2005. 124 p.
46. Wilińska I., Pacewska B., Antonovič V. Hydration processes of four-component binders containing a low amount of cement. *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 6. P. 2192. DOI: 10.3390/ma15062192
47. Bensted J., Barnes P. Structure and Performance of Cements. 2nd ed. London: Spon Press, 2002. 564 p.
48. Олійник Р. В. Підвищення енергоефективності виробництва будівельних матеріалів: монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. 204 с.
49. ДСТУ ISO 9000:2015. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів (ISO 9000:2015, IDT). [Чинний від 2016–07–01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 45 с.
50. Åström K. J., Hägglund T. Advanced PID Control. Research Triangle Park, NC: ISA – The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. 460 p.
51. ДСТУ 3926–99. Стандартизація. Метрологія. Сертифікація. Основні положення. [Чинний від 2000–01–01]. Київ: Держстандарт України, 1999. 52 с.
52. Aitcin P. C., Flatt R. J. Science and Technology of Concrete Admixtures. Cambridge: Woodhead Publishing, 2016. 613 p. DOI: 10.1016/B978-0-08-100693-1.00001-3

53. Newman J., Choo B. S. Advanced Concrete Technology: Concrete Properties. Oxford: Butterworth–Heinemann, 2003. 309 p.
54. Banfill P. F. G. Rheology of Fresh Cement and Concrete. London: E & FN Spon, 1991. 356 p.
55. Hu J., Wang K. Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. Construction and Building Materials. 2011. Vol. 25, No. 3. P. 1196–1204. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.09.035
56. Brito J., Saikia N. Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste. London: Springer–Verlag, 2013. 429 p. DOI: 10.1007/978–1–4471–4540–0
57. Shi C., Zheng K. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. Resources, Conservation and Recycling. 2007. Vol. 52, No. 2. P. 234–247. DOI: 10.1016/j.resconrec.2007.01.013
58. ДСТУ Б В.2.7–217:2009. Суміші бетонні і бетон. Основні вимоги до виготовлення, контролю якості, приймання, маркування, транспортування та зберігання. [Чинний від 2010–09–01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 28 с.
59. MacGregor J. G., Wight J. K. Reinforced Concrete: Mechanics and Design. 6th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2012. 1132 p.
60. Khurana R., Torresan I. New admixtures for eliminating steam curing and its negative effects. Concrete International. 2001. Vol. 23, No. 1. P. 37–42.
61. Ulm F.-J., Coussy O. Mechanics and Durability of Solids. Vol. 1: Solid Mechanics. Cambridge, MA: MIT Press, 2003. 428 p.
62. Grobelna I. Intelligent industrial process control systems. Sensors. 2023. Vol. 23, No. 15. P. 6838. DOI: 10.3390/s23156838
63. Chandra S. S., Sepasgozar S. M. E., Kumar V. R. P., Singh A. K., Krishnaraj L., Awuzie B. O. Assessing factors affecting construction equipment productivity using structural equation modeling. Buildings. 2023. Vol. 13, No. 2. P. 502. DOI: 10.3390/buildings13020502

64. Harnby N., Edwards M. F., Nienow A. W. *Mixing in the Process Industries*. 2nd ed. Oxford: Butterworth–Heinemann, 1992. 414 p.
65. Paul E. L., Atiemo–Obeng V. A., Kresta S. M. *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2004. 1377 p. DOI: 10.1002/0471451452
66. Arnold P. C., McLean A. G., Roberts A. W. *Bulk Solids: Storage, Flow and Handling*. Tunbridge Wells: TUNRA Bulk Solids Research Associates, 1982. 247 p.
67. Schulze D. *Powders and Bulk Solids: Behavior, Characterization, Storage and Flow*. Berlin: Springer–Verlag, 2008. 517 p. DOI: 10.1007/978–3–540–73768–1
68. McGlinchey D. *Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation*. Oxford: Blackwell Publishing, 2008. 280 p. DOI: 10.1002/9781444305449
69. Повидайло В. А., Попович В. В., Гаврилко П. І. *Вібраційні машини та процеси: навчальний посібник*. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 260 с.
70. Mills D. *Pneumatic Conveying Design Guide*. 2nd ed. Oxford: Butterworth–Heinemann, 2004. 668 p.
71. Jenike A. W. *Storage and flow of solids*. Bulletin No. 123. Salt Lake City: University of Utah, 1964. 198 p.
72. Shamlou P. A. *Handling of Bulk Solids: Theory and Practice*. Oxford: Butterworth–Heinemann, 1988. 290 p.
73. Рудь В. Д., Василишин М. С., Репетов О. В. *Механіка сипких середовищ: навчальний посібник*. Одеса: Астропринт, 2009. 176 с.
74. Roberts A. W. *Particle Technology – Reflections and Horizons: an engineering perspective*. *Chemical Engineering Research and Design*. 1998. Vol. 76, No. A3. P. 775–796. DOI: 10.1205/026387698525630
75. Коробко Б. О., Новіцький Я. М. *Машини для ущільнення ґрунтів: навчальний посібник*. Полтава: ПолтНТУ, 2015. 268 с.

76. Ottino J. M., Khakhar D. V. Mixing and segregation of granular materials. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2000. Vol. 32. P. 55–91. DOI: 10.1146/annurev.fluid.32.1.55
77. Brown R. L., Richards J. C. *Principles of Powder Mechanics: Essays on the Packing and Flow of Powders and Bulk Solids*. Oxford: Pergamon Press, 1970. 221 p.
78. Nedderman R. M. *Statics and Kinematics of Granular Materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 352 p. DOI: 10.1017/CBO9780511600043
79. Platonov P., Sinkevich O., Tsurkan O. Optimization of Concrete Mixing Plant Operation. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. Vol. 73. P. 387–395. DOI: 10.1007/978-3-030-42939-339
80. Andreev S. E., Zverevich V. V., Perlov V. A. *Crushing, Grinding and Screening of Industrial Minerals*. London: Primary Sources, 2005. 296 p.
81. Гевко І. Б. Технологічні основи функціонування гнучких гвинтових конвеєрів: монографія. Тернопіль: Астон, 2004. 192 с.
82. Mehta P. K., Aïtcin P. C. *Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete*. ACI Special Publication SP-121. Detroit: American Concrete Institute, 1990. P. 265–286.
83. ДСТУ Б В.2.7–224:2009. Бетони. Правила контролю міцності. [Чинний від 2010–09–01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 20 с.
84. Гевко Р. Б., Рогатинський Р. М. Гвинтові транспортно–технологічні механізми: монографія. Тернопіль: ТДТУ, 2008. 278 с.
85. Hay J. E. *Bulk Materials Handling*. Tunbridge Wells: Palladian Publications, 1988. 256 p.
86. Bolton W. *Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering*. 6th ed. Harlow: Pearson Education Limited, 2015. 624 p.

87. Silva Ribeiro A., Alves e Sousa J., Oliveira Costa C., Vieira de Sousa J. F., Almeida Garrett J., Lages Martins L. Measurement quality and uncertainty evaluation in civil engineering research. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*. 2013. Vol. 4, No. 2. P. 127–134. DOI: 10.1051/ijmqe/2013043
88. ISO 5725–1:2023. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions. Geneva: International Organization for Standardization, 2023. 26 p.
89. ДСТУ Б А.3.1–9–2014. Управління, організація і технологія. Зведення будинків і споруд. Правила виконання бетонних і залізобетонних робіт. Київ: Мінрегіон України, 2014. 66 с.
90. Box G. E. P., Hunter J. S., Hunter W. G. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005. 633 p.
91. ДСТУ ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2017, IDT). [Чинний від 2019–12–01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 31 с.
92. Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Ігнатенко С. В., Костюк Т. О. *Основи бетонознавства: навчальний посібник*. Київ: Основа, 2007. 224 с.
93. Marketos G., Bolton M. D. Quantification of dense randomly packed granular assemblies. *Géotechnique*. 2010. Vol. 60, No. 11. P. 801–811. DOI: 10.1680/geot.9.P.047
94. Drescher A., Cousens T. W., Bransby P. L. Kinematics of the mass flow of granular material through a plane hopper. *Géotechnique*. 1978. Vol. 28, No. 1. P. 27–42. DOI: 10.1680/geot.1978.28.1.27
95. Johanson J. R. Stress and velocity fields in the gravity flow of bulk solids. *Journal of Applied Mechanics*. 1964. Vol. 31, No. 3. P. 499–506. DOI: 10.1115/1.3629668

96. Beverloo W. A., Leniger H. A., van de Velde J. The flow of granular solids through orifices. *Chemical Engineering Science*. 1961. Vol. 15, No. 3–4. P. 260–269. DOI: 10.1016/0009-2509(61)85030-6
97. Mankoc C., Janda A., Arévalo R. et al. The flow rate of granular materials through an orifice. *Granular Matter*. 2007. Vol. 9, No. 6. P. 407–414. DOI: 10.1007/s10035-007-0062-2
98. Коробко Б. О., Левченко О. П. Оптимізація роботи приймального бункера під час склепіння сипких матеріалів. *Техніка будівництва*. 2024. № 41. С. 47–55. DOI: 10.32347/tb.2024–41.0405
99. Korobko Bogdan, Levchenko Oleksandr, Rudyk Rostyslav. Development of an energy–saving design for the feeding system of a concrete mixing plant. *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2024. DOI: 10.26906/znp.2023.61.0000
100. Osinov, V.A. (1994). A model of a discrete stochastic medium for the problems of loose material flow. *Continuum Mechanics and Thermodynamics* 6, 51–60. <https://doi.org/10.1007/BF01138306>
101. Левченко О. П. Обґрунтування параметрів бетонозмішувальної установки: кваліфікаційна наукова робота. Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2024. 198 с.
102. Левченко О. Дослідження впливу вологості на дозування сипких матеріалів. *Innovations in Scientific Research: World Experience and Realities: матеріали XVIII Міжнар. наук.–практ. конф. (Рига, Латвія, 23–25 жовтня 2024 р.)*. Рига: International Scientific Unity, 2024. С. 112–116.
103. Levchenko O., Korobko B. Optimization of the concrete production process in terms of energy consumption. *Technology Audit and Production Reserves*. 2024. Vol. 6, No. 1(80). P. 11–15. DOI: 10.15587/2706–5448.2024.319827
104. Обґрунтування параметрів бетонозмішувальної установки для виробництва монолітного та збірного залізобетону / О. П. Левченко, Б. О.

Коробко. Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки: матеріали VI Всеукр. наук.–техн. конф. Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», 2023. С. 85–88.

105. Ejiko S. O., Ejiko S. O., Filani A. O. Mathematical modeling: a useful tool for engineering research and practice. *International Journal of Mathematics Trends and Technology*. 2021. Vol. 67, No. 9. P. 50–64. DOI: 10.14445/22315373/IJMTT-V67I9P506

106. Prochorov S. Use of modern construction machinery in the construction. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 193. Art. 04022. DOI: 10.1051/matecconf/201819304022

107. Creswell J. W., Creswell J. D. *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*. 5th ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2018. 275 p.