

**ЗАКЛАД ВИЩОЇ ОСВІТИ «ПОДІЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»
ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Кафедра технічного сервісу і загальнотехнічних дисциплін

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НА ТЕМУ:

**«ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОГО
ДОЗАТОРА БОРОШНА»**

Виконав:

здобувач освітнього ступеня «Магістр»
освітньо-професійної програми
«Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
денної форми навчання
ОЗАРЄВ Віталій Олегович

Керівник:

канд. тех. наук, доцент
ПІДЛІСНИЙ Віталій Володимирович

Оцінка захисту:

Національна шкала _____
Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

«_____» _____ 20__ р.

Допускається до захисту:

«_____» _____ 20__ р.

Гарант освітньо-професійної програми «Агроінженерія»
спеціальності 208 «Агроінженерія»
канд. тех. наук, доцент

(підпис) **ДУГАНЕЦЬ Василь Іванович**

З М І С Т

	Стор.
ЗАВДАННЯ.....	4
АНОТАЦІЯ.....	5
РЕФЕРАТ.....	6
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ДОЗАТОРІВ ДЛЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ПОШУК ПРОБЛЕМИ.....	11
1.1. Загальні відомості про обладнання для дозування сипких продуктів.....	11
1.2. Аналіз конструкцій дозаторів об'ємного типу для сипких матеріалів.....	13
1.3. Аналіз використання вібрації при дозуванні сипких матеріалів.....	16
1.4. Основні проблеми дозування дрібнодисперсних сипких матеріалів.....	22
Задачі дослідження.....	24
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА РОЗРОБКА ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ.....	25
2.1. Методика планування експериментальних досліджень.....	25
2.2. Опис розробленої експериментальної установки.....	27
Висновок до другого розділу.....	30
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ДОЗАТОРА БОРОШНА.....	31
3.1. Дослідження впливу параметрів дозатора та висоти шару матеріалу на його ефективну в'язкість.....	31
3.2. Дослідження впливу вібраційних параметрів кінцевого днища на продуктивність дозатора.....	39
Висновок до третього розділу.....	46

РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ДОЗАТОРА В ПРОЦЕСІ ТРАНСПОРТУВАННЯ БОРОШНА.	48
Висновок до четвертого розділу.	55
РОЗДІЛ 5. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.	56
5.1. Загальні вимоги охорони праці при роботі з дозаторами борошна.	56
5.2. Пожежна безпека та вибухозахист у борошномельному виробництві.	58
5.3. Електробезпека.	59
5.4. Безпека в надзвичайних ситуаціях.	59
Висновки до п'ятого розділу.	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.	62
ДОДАТКИ.	67

АНОТАЦІЯ

В кваліфікаційній роботі представлено обґрунтований підхід що до вибору оптимальних параметрів роботи вібраційного об'ємного дозатора дрібнодисперсних сипких матеріалів. Встановлені залежності та результати оптимізації дозволяють підвищити точність дозування, стабільність потоку та продуктивність обладнання при дозуванні та транспортуванні пшеничного борошна.

SUMMARY

The qualification work presents a well-founded approach to the selection of optimal parameters for the operation of a vibrating volumetric batcher of fine-dispersed bulk materials. The established dependencies and optimization results allow to increase the dosing accuracy, flow stability and equipment productivity in the dosing and transportation of wheat flour.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра складається з пояснювальної записки, виконаної на 67 аркушах друкованого тексту формату А4, яка вміщує 5 розділів, 5 таблиць, 25 рисунків, 41 формула 40 найменувань використаних джерел і презентаційний матеріал на 15 слайдах.

Мета даної роботи полягає в обґрунтуванні та визначенні оптимальних параметрів роботи вібраційного об'ємного дозатора для забезпечення рівномірного витікання і високої точності дозування борошна.

В роботі виконано аналіз конструкцій дозаторів для сипких матеріалів та пошук проблеми. Представлено методику планування експериментальних досліджень та розробка дослідної установки. Виконано експериментальні дослідження робочих параметрів дозатора борошна. Проведено оптимізацію параметрів роботи дозатора в процесі транспортування борошна. Розроблено заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях. Сформульовані загальні висновки по роботі, складено список використаних джерел та оформлено додатки.

Ключові слова: ВІБРАЦІЙНИЙ ОБ'ЄМНИЙ ДОЗАТОР, БОРОШНО, РОЗВАНТАЖУВАЛЬНА ЛУНКА, ДОЗУЮЧІ ПРИСТРОЇ, ВІБРАЦІЯ.

ВСТУП

Актуальність роботи. Процеси дозування сипких матеріалів посідають важливе місце в різних галузях, оскільки від точності формування дози залежить якість кінцевої продукції, стабільність технологічних операцій та рівень ресурсоефективності виробництва. Особливо складними для дозування є дрібнодисперсні сипкі матеріали, які характеризуються нестійкими фізико-механічними властивостями, схильністю до злипання, утворення склепінь та непередбачуваною поведінкою під час руху в робочих органах дозаторів. Саме ці фактори зумовлюють необхідність пошуку рішень, що забезпечують рівномірне та кероване витікання матеріалу.

У сучасній практиці найпоширенішими є вагові та об'ємні дозувальні пристрої. Незважаючи на те, що вагові системи забезпечують високу точність, вони складніші за конструкцією, дорожчі в експлуатації та мають нижчу продуктивність. Об'ємні дозатори, навпаки, вирізняються простотою конструкції, високою надійністю та економічністю. Однак їх широке застосування обмежується чутливістю до нестабільної поведінки дрібнодисперсних сипких матеріалів, що ускладнює забезпечення точності дозування.

Перспективним напрямом підвищення ефективності об'ємних дозаторів є використання вібраційних впливів, які здатні суттєво покращувати текучість матеріалу, зменшувати внутрішнє тертя та забезпечувати режим віброкипіння. Вібраційні дозатори мають низку переваг — відсутність пар тертя, мінімальна кількість механічних передач, надійність і простота конструкції. Проте питання взаємодії дрібнодисперсного матеріалу з робочим органом дозатора під дією вібрацій залишається недостатньо дослідженим.

У зв'язку з цим актуальним є наукове обґрунтування параметрів та режимів роботи вібраційних об'ємних дозаторів для дрібнодисперсних сипких матеріалів. Вирішення цього завдання дозволить підвищити точність дозування, забезпечити рівномірність витікання матеріалу та підвищити загальну ефективність технологічних процесів. Отримані результати можуть

бути використані під час проєктування нового обладнання та модернізації існуючих дозувальних систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами досліджень. Робота виконувалась у відповідності з Державною науковою програмою “Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі” на 2020-2025 рр. Відповідає напрямкам наукових досліджень кафедри технічного сервісу і загальнотехнічних дисциплін інженерно-технічного факультету.

Мета і завдання досліджень. Мета дослідження полягає обґрунтування та визначення оптимальних параметрів роботи вібраційного об'ємного дозатора для забезпечення рівномірного витікання і високої точності дозування борошна. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **завдання**:

1. Проаналізувати сучасний стан дозування сипких дрібнодисперсних матеріалів та виявлення недоліків в процесі роботи дозаторів.
2. Дослідити ефективну в'язкість дрібнодисперсного сипкого матеріалу та його поведінку під дією вібраційних впливів в процесі дозування.
3. Провести експериментальні дослідження роботи дозатора та порівняти результати з теоретичними даними.
4. Встановити та оптимізувати раціональні параметри режимів роботи дозатора при подачі та транспортуванні борошна.
5. Розробити заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях при роботі з дозаторами борошна.

Об'єкт досліджень. Процес дозування борошна у вібраційному об'ємному дозаторі.

Предмет досліджень. Закономірності руху дрібнодисперсних сипких матеріалів та параметри вібраційного впливу, що визначають ефективність та точність дозування.

Методи досліджень. У роботі використано комплекс методів, що забезпечують всебічне дослідження процесу дозування дрібнодисперсних сипких матеріалів. Для теоретичного обґрунтування застосовано аналітичні методи, та методи моделювання, елементи теорії вібрацій. Дослідження роботи дозатора

проводили із використанням експериментальних методів на лабораторній установці, де фіксували параметри витікання матеріалу та вплив режимів коливань. Отримані результати обробляли за допомогою статистичних методів, а їх порівняння з теоретичними залежностями здійснювали методами порівняльного аналізу..

Практичне значення отриманих результатів. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні та модернізації об'ємних вібраційних дозаторів у промисловості. Застосування розроблених рекомендацій дозволяє підвищити точність дозування, стабільність процесу подачі та загальну ефективність технологічних ліній, що працюють із дрібнодисперсними сипкими матеріалами.

Отримані результати також можуть бути використані в навчальному процесі з для здобувачів вищої освіти спеціальностей: 208 “Агроінженерія” 181 «Харчові технології» Закладу вищої освіти «Подільський державний університет».

Апробація результатів роботи. Основні положення роботи доповідалися й обговорювалися на науково-практичних конференціях ЗВО «Подільський державний університет» у 2024-2025р.

Публікації. Основний зміст роботи опубліковано в 1 друкованій публікації: Озарєв В.О., Підлісний В.В. Обґрунтування конструкції вібраційного об'ємного дозатора для борошна // Перші наукові кроки – 2025: збірник наукових праць ХІХ Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців (17 квітня 2025 р., м. Кам'янець-Подільський). Кам'янець-Подільський, 2025. 65 с.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ДОЗАТОРІВ ДЛЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ПОШУК ПРОБЛЕМИ

1.1 Загальні відомості про обладнання для дозування сипких продуктів

Процедури дозування мусять гарантувати коректне ведення технологічних процесів, визначену рецептуру, правильне та точне фасування фінальної продукції, яка потрапляє до клієнтів.

При проектуванні механізмів дозування варто насамперед брати до уваги фізико-механічні та гранулометричні характеристики продуктів, що фасуються:

а) розміри частинок, насипну густину, плинність (сипкість), вологість, злипання, утворення грудок, здатність до склепіння та розпилення (для сипких субстанцій);

б) густину, клейкість, наявність завислих частинок (для рідких субстанцій);

в) насипну густину, консистентність, клейкість, плинність, еластичність (для пасто- та тісто подібних субстанцій).

Дозуючі пристрої повинні бути пристосовані до регулювання, переналадження, зміни режиму роботи та забезпечувати при цьому точне і надійне дозування.

Дозування може бути безперервним та порціонним. Останній вид дозування застосовується, як правило, при фасувальних операціях.

За принципом дозування всі дозуючі пристрої діляться на об'ємні і вагові.

Ваговий спосіб дозування, як правило, забезпечує більшу точність, тому для дозування основного компонента тіста – борошна, як при безперервному, так і порціонному тістоприготуванні частіше використовують вагові дозатори.

Об'ємний принцип дозування конструктивно більш простий, тому дозатори, засновані на цьому принципі роботи, більш надійні. Застосування об'ємного методу суттєво спрощує процес дозування рідких компонентів.

Разом із цим, об'ємне дозування нерідке характеризується більш значною погрішністю, що в окремих випадках обмежує його застосування.

При ваговому дозуванні погрішність звичайно становить у середньому близько 0,1%, а при об'ємному – близько 2...3 %.

Для дозування *сипучих продуктів* застосовуються об'ємні і вагові дозатори, порціонні та безперервного дозування.

Для *готування сумішей* із сипучих продуктів, як правило, застосовують в залежності від конструкції робочого органа *об'ємні дозатори* – барабанні, тарілчасті, шнекові, мірні ємності і *вагові* – бункерні із противагою.

Для *дозування готових продуктів* використовуються об'ємні дозатори: секторні, шиберні, плунжерні, грейферні, стрічкові та мірні ємності.

Для *дозування вологих розсипних* продуктів звичайно використовують стрічкові або шнекові транспортери, що мають засоби для регулювання витрати, що і включаються в строго певний час.

Рідкі продукти дозуються в основному за допомогою мірних ємностей різних конструкцій.

Вибір способу дозування й типу дозатора залежить від фізико-механічних і технологічних властивостей матеріалів, що дозуються.

Загальна класифікація дозуючих пристроїв представлена на рисунку 1.1.

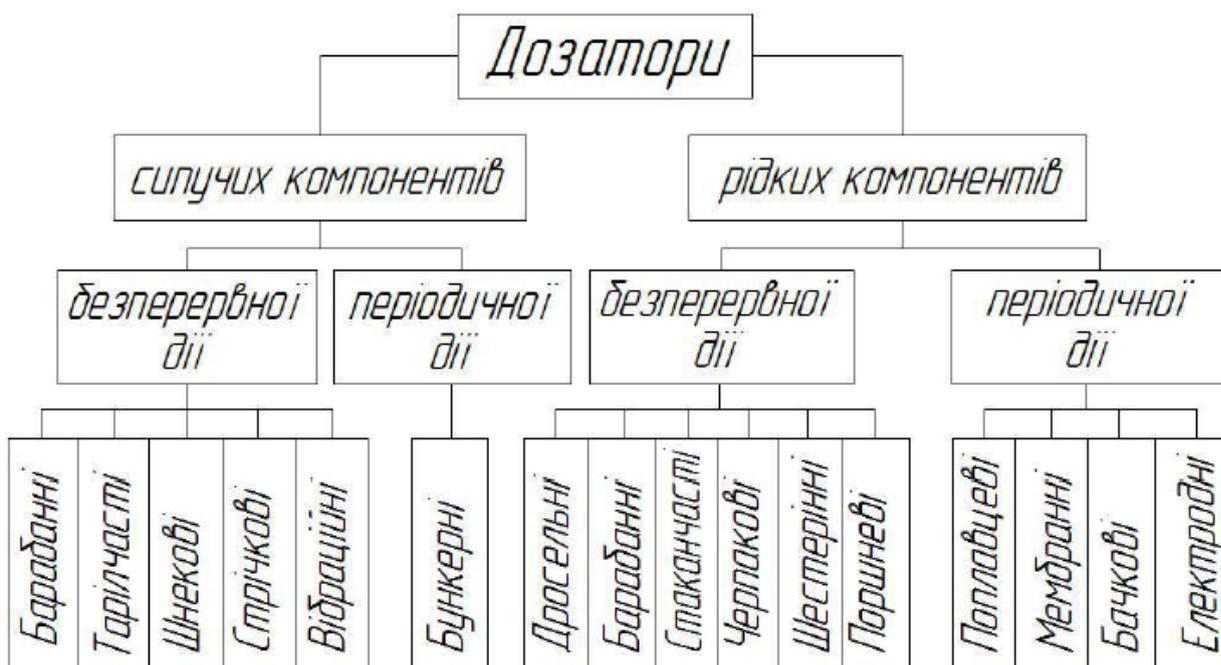


Рисунок 1.1 – Загальна класифікація дозуючих пристроїв

Дозування *тістоподібних продуктів* здійснюється шляхом безперервного відділення від загальної маси окремих шматків певного об'єму і відповідно рівної маси. При цьому повинна бути забезпечена рівномірна щільність шматків. Похибка дозування, наприклад у хлібопекарському виробництві, не повинна перевищувати $\pm 2,5\%$ від середньої маси.

1.2 Аналіз конструкцій дозаторів об'ємного типу для сипких матеріалів

Принцип роботи об'ємних дозаторів безперервної дії для сипких матеріалів базується на переміщенні продукту з бункера за допомогою робочого органа, який здійснює обертальний, лінійний або зворотно-поступальний рух. Для реалізації безперервної подачі в промисловості застосовуються різні типи обладнання, зокрема барабанні, тарілчасті, шнекові, стрічкові та вібраційні дозатори.

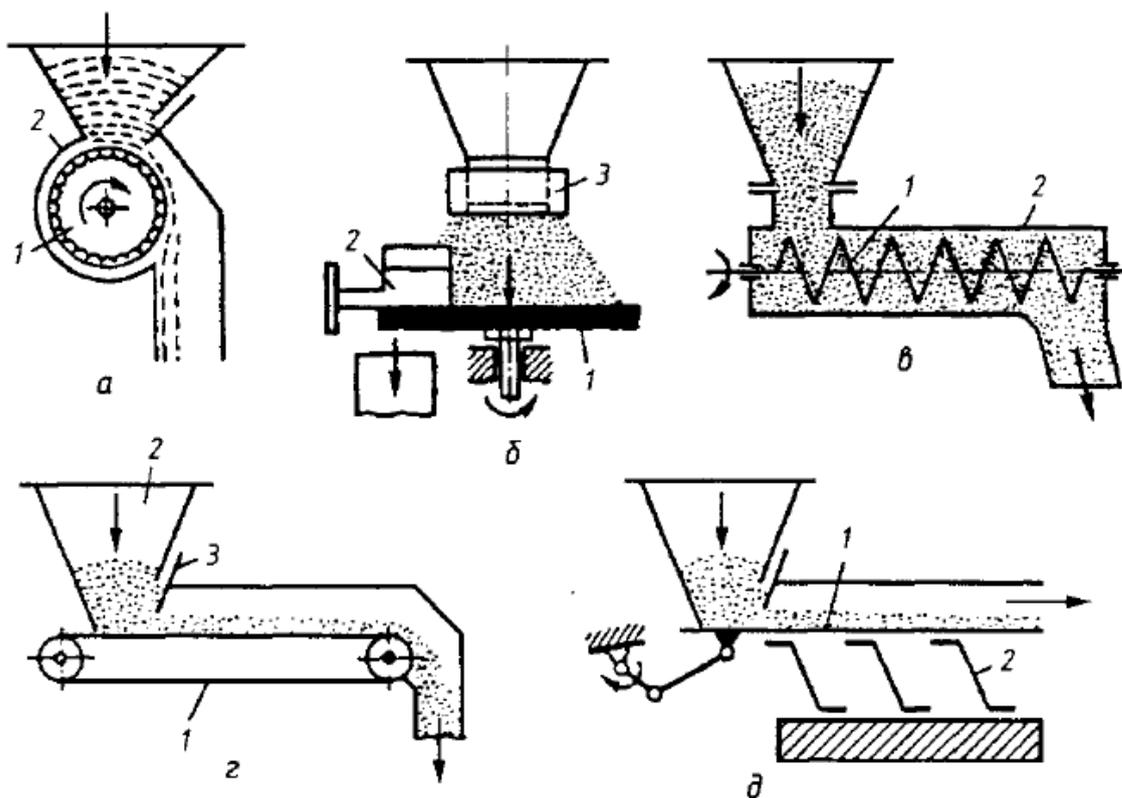


Рисунок 1.2 – Схеми дозаторів об'ємного типу для сипких матеріалів:
а - барабанний; б - тарілчастий; в - шнековий; г - стрічковий; д - вібраційний.

Барабанний дозатор (рис. 1.2, а) має робочий орган 1, розміщений у корпусі 2, з кількома гніздами (лотками), які наповнюються сипким матеріалом завдяки дії сили ваги. При налаштуванні продуктивності змінюють об'єм поглиблень (лотків) або швидкість обертання барабана. З лотків продукт самопливом надходить у вихідний патрубок дозатора.

Тарілчастий дозатор (рис. 1.2, б) є горизонтальним диском 1, що обертається (тарілка), з якого матеріал скидається скребком 2. Висота шару матеріалу коригується пересувним манжетом 3, який перекриває вихідний патрубок бункера. Сипкий матеріал на тарілці розташовується зрізаним конусом, розміри якого залежать від висоти розміщення манжета.

Шнековий дозатор (рис. 1.2, в) являє собою розташований у кожусі 2 короткий шнек 1. Шнек забирає матеріал з бункера і проштовхує його до вихідного патрубку. Продуктивність дозатора може контролюватися частотою обертання шнека.

Стрічковий дозатор (рис. 1.2, г) є коротким стрічковим конвеєром 1, розташованим під живильним бункером 2. Подачу матеріалу можна регулювати переміщенням заслінки 3 або зміненням швидкості конвеєра.

Вібраційний дозатор (рис. 1.2, д) має робочий орган у вигляді коливального лотка 1, підвішеного на гнучких опорах 2. При вібрації лотка сипучий матеріал переміщається в поздовжньому напрямку.

Вібраційні дозатори можуть подавати різні матеріали. Число коливань лотка рекомендується до 3000 у хвилину, а амплітуда коливань - до 4 мм. При цьому спостерігається короткочасний відрив матеріалу від дна лотка, і протягом деякого проміжку часу матеріал перебуває в стані вільного польоту. Це зменшує тривалість контакту вантажу з лотком і знижує зношування останнього.

Принцип дії *вагових дозаторів* заснований на використанні квадрантних або важільних вагових механізмів. Вагові дозатори борошна, в основному, використовують на хлібопекарських підприємствах при порціонному і потоковому тісто приготуванні.

Сипкий матеріал (діаметр частинки $d_{\text{ч}} \leq 50$ мкм) — належить до

дрібнодисперсних зв'язних продуктів, при витіканні сипкого матеріалу з ємності надзвичайно важливе підтримання стабільності його фізико-механічних властивостей, для забезпечення передусім заданих параметрів технологічного процесу. Це дуже актуально для дрібнодисперсних сипких продуктів, поведінка яких у процесі витікання часто має випадковий та непередбачуваний характер. Застосування спеціальних пристроїв для покращення показників плинності таких сипких матеріалів вимагає додаткових витрат, але результат не завжди сприятливий. Тому дослідженню поведінки дрібнодисперсних сипких матеріалів приділено багато праць [4, 5, 6, 7, 8]. На виробництвах, використовуються автоматичні дозатори, оскільки при використанні механічних дозаторів не зменшує частку ручної праці у технологічному процесі.

Дозатори об'ємного типу вимірюють дозу матеріалу за його об'ємом та у найпростішому випадку представляють собою мірний стакан. Точність їх дозування значною мірою залежать від розподілу насипної щільності СМ.

На рис. 1.3 приведено конструктивну схему об'ємного дозатора [10], принцип роботи якого полягає у наступному: через отвір 3 із бункера 4 сипкий матеріал потрапляє в пустотілий циліндр 1, який призначений для формування дози матеріалу. При повертанні циліндра 1 навколо осі 2 на 180° відбувається висипання сформованої дози матеріалу в приймальну ємність 5.

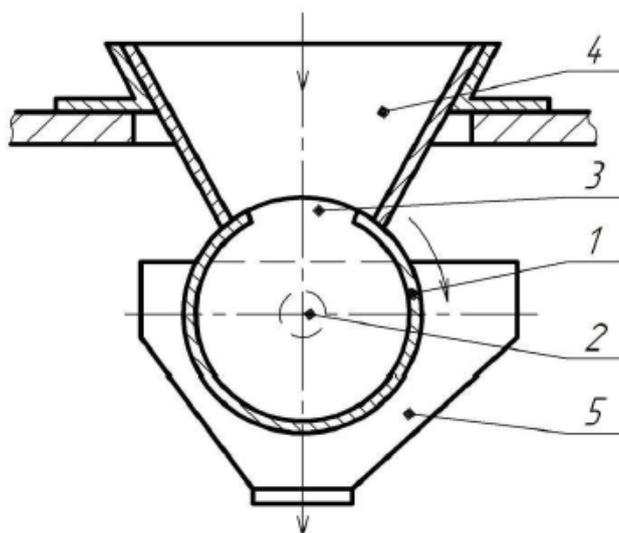


Рисунок 1.3 - Конструктивна схема дозатора об'ємного типу

Об'ємні дозатори вирізняються низкою суттєвих переваг, серед яких простота конструкції, висока продуктивність та відносно невисока вартість.

Водночас такі дозувальні системи мають і певні обмеження. Одним із ключових недоліків є невеликий діапазон регулювання об'єму дозуючої мірки: у більшості конструкцій коригування порції можливе лише в межах близько $\pm 30\%$.

Ще одним недоліком об'ємних дозаторів є недостатня точність дозування у випадках, коли не застосовуються допоміжні пристрої, призначені для стабілізації або інтенсифікації витікання сипкого матеріалу. Фактична маса дози істотно залежить від ступеня ущільнення продукту, який визначається його вологістю, гранулометричним складом, формою частинок та іншими фізико-механічними характеристиками.

Проблема нестабільного та непередбачуваного витікання є особливо значущою під час роботи з дрібнодисперсними сипкими матеріалами, поведінка яких суттєво ускладнює забезпечення рівномірності подачі та високої точності дозування.

1.3 Аналіз використання вібрації при дозуванні сипких матеріалів

Одним із ефективних методів покращення текучості СМ є застосування динамічної дії вібрації, яка руйнує зв'язки між частинками продукту, змінює його напружений стан і, тим самим, покращує показники текучості. Ряд робіт присвячено дослідженню впливу вібрації на поведінку сипкого матеріалу [16, 17, 18, 19]. За рахунок дії механічних коливань щільність сипкого матеріалу може змінюватись в широкому діапазоні, тому встановлення оптимальних параметрів вібрації є важливим для забезпечення високої продуктивності та точності дозування, та дозволить стабілізувати фізико-механічні властивості дозуючого матеріалу.

Вібродія на СМ може бути реалізована за рахунок віброуючих днищ, додаткових перегородок, похилих лотків, а також за допомогою безпосередньо введених в робочу камеру віброзбудників. Зовнішні віброзбудники доцільно встановлювати тільки на бункерах невеликого об'єму [20]. Використання потужних віброзбудників, що вмонтовані в бункерах великої ємкості,

створюють значні динамічні навантаження, що призводить до збільшення металоємкості конструкції дозатора.

В залежності від способу вібраційного впливу на СМ є два найпоширеніші види вібраційних об'ємних дозаторів для дрібнодисперсних СМ: бункерні та лоткові. Значну частину серед бункерних дозаторів займають «беззаслінкові», перевагою яких є реалізація ефекту «самозапирання потоку» матеріалу дозування при припиненні дії вібрації, тобто формування стійкого склепіння над випускним отвором. Інерційність запирання потоку СМ визначається швидкістю формування стійкого склепіння над вихідним отвором і становить близько 0,03 – 0,05 с [2]. Розрізняють два види конструкцій вібраційних «беззаслінкових» дозаторів: з коливним робочим органом, що розміщений у розвантажувальній лунці (рис. 1.4, а), та з коливною розвантажувальною лункою (рис. 1.4, б).

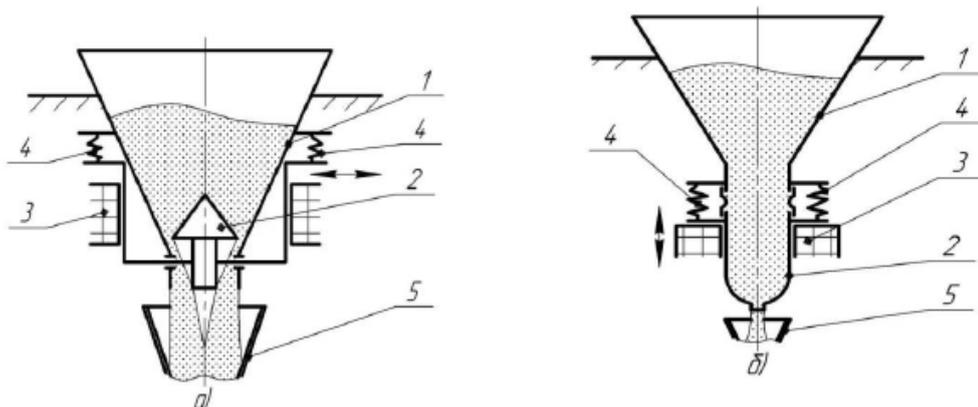


Рисунок 1.4 - Дозатори «беззаслінкові» вібраційні: а) з конічним коливним днищем; б) з коливним розвантажувальним отвором

Дозатор (рис. 1.4, а) потребує вібробудника невеликої потужності, оскільки достатньо навіть незначного зусилля для приведення у рух СМ, що знаходиться у безпосередньому контакті із коливним конічним днищем у розвантажувальному отворі. Коливальне конічне днище виконує три основні функції:

- створення додаткових сил, призначених для руйнування потенційних стійких склепінь в матеріалі;
- зменшення напруження в матеріалі біля випускного отвору;

- формування кільцевого випускного отвору.

Основними конструктивними елементами дозатора (рис. 1.4, а) є бункер 1, конічне днище 2, віброзбудник 3. Віброзбудник 3 створює коливання конічного днища 2, яке стимулює витікання матеріалу у приймальну ємкість 5. Для забезпечення віброізоляції дозатора бункер 1 встановлений на пружні амортизатори 4. Конічне коливне днище ефективно використовується у деяких конструкціях запатентованих дозаторів [21, 22].

Іншим поширеним у пакувальній промисловості різновидом вібраційних «безклапанних» дозаторів є дозатор з коливною лункою (рис. 1.4, б), який складається із бункера 1 і пружно підвішеної через систему амортизаторів 4 розвантажувального отвору 2, що приводиться у рух віброзбудником 3. Під дією коливань розвантажувального отвору 2 сипкий матеріал потрапляє у приймальну ємкість 5. Недоліком такого вібраційного дозатора є те, що інтенсифікація потоку матеріалу відбувається лише біля розвантажувального отвору 2. Тому при збільшенні розмірів виникає потреба у використанні віброзбудника великої потужності, що в свою чергу призводить до погіршення віброізоляції окремих елементів дозатора.

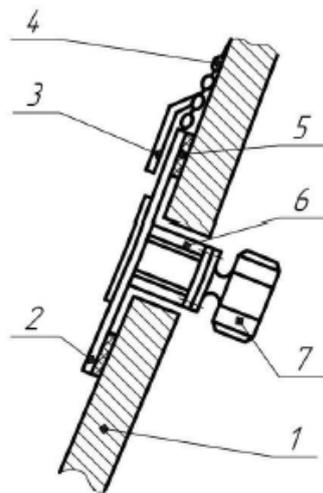


Рисунок 1.5 - Конструктивна схема встановлення віброзбудника на «фальшивій стінці»

При дозуванні великої маси продукту ефективно використовувати вібраційний дозатор із віброзбудником, що вмонтований на «фальшивій стінці» розвантажувальної лунки (рис. 1.5) [13]. «Фальшива стінка» являє собою плиту 2 товщиною 6-10 мм, що виготовлена із легованої сталі, яку монтують за

допомогою пружних підвісок 4 (ланцюгів або шарнірів) на внутрішній стороні стінки бункера 1 [13]. Між плитою і стінкою бункера розміщують гумові амортизатори 5. До плити 2, над якою встановлюють захисну пластину 3 для запобігання потрапляння під неї сипкого матеріалу, кріплять опорну стійку 6, яка призначена для встановлення віброзбудника 7. Ефективність такого кріплення віброзбудника достатньо висока, оскільки коливання передаються через «фальшиву стінку» просто до матеріалу дозування, а не до стінки розвантажувального отвору. Суттєвою перевагою використання «фальшивої стінки» є можливість передачі до сипкого матеріалу коливань високої інтенсивності. Обмежене використання цієї конструкції викликане можливістю руйнування «фальшивої стінки» чи стійки 6, до якої вона кріпиться, внаслідок значних динамічних навантажень. Ефективним способом покращення текучості дрібнодисперсних СМ у пірамідальній розвантажувальній лунці є використання «фальшивої стінки» у кутових стиках її бічних стінок [14].

«Безклапанні» вібраційні живильники – це змішані живильники, в яких коливання створюються як через донний, так і через вихідний отвори. У конструкції живильників зустрічаються два типи змішаних «безклапанних» живильників: перший реалізується з використанням одного віброзбудника, другий – двох незалежних, що дозволяють встановлювати різні значення амплітуди, частоти та напрямку коливань для донного та вихідного отворів. У промисловості відомий вібраційний живильник для СМ, в якому віброуючим дном виступає куля, яка завдяки коливанням конічного вихідного отвору, що передаються на неї, регулює рух і подає видається продукт до приймальної ємності [15].

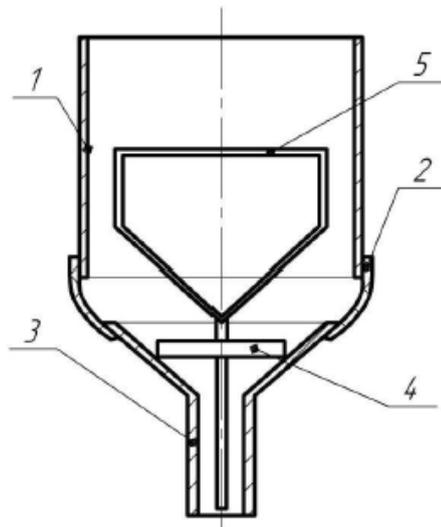


Рисунок 1.6 - Вібраційний «безклапанний» дозатор з коливним диском

Розглянемо конструктивні особливості «безклапанного» вібраційного живильника [16] (рис. 1.6). Пристрій складається з бункера 1, який з'єднаний із вихідним отвором 3 за допомогою гнучкої кільцевої втулки 2. Вихідний отвір 3 приводиться в дію віброзбудником, що формує кругові коливання робочого елемента. Усередині цього отвору встановлено диск 4, закріплений на штоку, кінцева частина якого обладнана тонкою жорсткою рамою 5. Під дією коливань вихідного отвору диск 4 здійснює обертання навколо вертикальної осі та, періодично взаємодіючи зі стінками, чергує перекриття та відкриття вихідного перетину. Коливання жорсткої рами відіграють роль механізму розпушення матеріалу в бункері, що забезпечує стабілізований потік дрібнодисперсного продукту.

Ще одним різновидом вібраційних бункерних дозаторів є конструкція, подана на рис. 1.7. Вона включає бункер 1 з конічним днищем 2, форма якого сприяє покращенню переміщення сипкого матеріалу в напрямку зони завантаження мірників. Під дією коливань конічної частини бункера матеріал переміщується по поверхні до периферійної ділянки, де розташований отвір для подачі СМ у мірники 3.

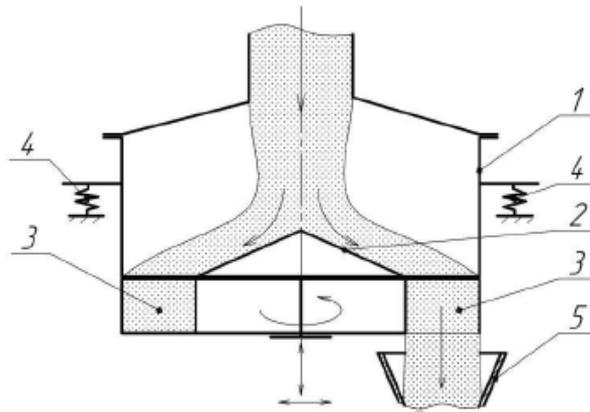


Рисунок 1.7 - Дозатор вібраційний бункерний

Коли мірники 3 потрапляють у положення, що збігається з розвантажувальною лункою 5, відбувається їхнє повне спорожнення. У промисловій практиці застосовують дозатори з рухомими та стаціонарними мірниками, вибір яких визначається умовами конкретного технологічного процесу. Для підвищення ефективності роботи обладнання, призначеного для дозування дрібнодисперсних сипких матеріалів (СМ), доцільним є розподіл загальної маси матеріалу на кілька окремих потоків. Це пояснюється тим, що великі об'єми СМ у поєднанні з високими силами зчеплення між частинками часто спричиняють утворення застійних зон і заторів, які перешкоджають стабільному надходженню матеріалу на стадію формування дози. У промисловості використовують широкий спектр конструкцій вібраційних бункерних дозаторів [27, 28, 29].

До іншої поширеної групи вібраційних дозувальних систем належать лоткові дозатори, що представлено значною кількістю конструктивних виконань. Залежно від властивостей матеріалу та вимог технологічного процесу, робочі органи таких дозаторів можуть мати різну форму й конфігурацію: прямокутну, овальну, напівкруглу, круглу, а також відкриту або закриту конструкцію. Принцип їхньої роботи полягає у транспортуванні матеріалу завдяки дії вібрацій по горизонтальній або нахиленій поверхні лотка. Швидкість переміщення визначається зміною параметрів коливань – амплітуди, частоти, кута дії вібрації, величини нахилу робочої поверхні, а також характеристик тертя між частинками матеріалу та поверхнею лотка.

У пакувальній промисловості найбільш поширеними типами віброприводів є ексцентрикові, гідравлічні, дебалансні, електромагнітні та пневматичні системи. Ексцентрикові та гідравлічні приводи зазвичай застосовують у низькочастотних вібраційних машинах, оскільки вони забезпечують можливість отримання значних амплітуд коливань робочого органа та формування великої рушійної сили [16]. Дебалансні віброзбудники доцільно використовувати в обладнанні, що працює в середньочастотному діапазоні – приблизно 12–25 Гц [26].

Для високочастотних вібромашин, які функціонують при малих амплітудах коливань (приблизно 0,5 - 3 мм), найбільш ефективними є електромагнітні віброзбудники [16]. Їх перевагами виступають відсутність елементів тертя та підшипникових вузлів, що зазвичай зазнають високих динамічних навантажень, а також мінімальна тривалість перехідних процесів. Проте суттєвими обмеженнями таких приводів є неможливість забезпечення широкого діапазону регулювання амплітуди та висока чутливість до змін напруги живлення й навантаження.

Пневматичні приводи, подібно до електромагнітних, здебільшого застосовують у високочастотному вібраційному обладнанні, а також у технологічних процесах, що потребують підвищеного рівня вибухобезпеки [16].

1.4 Основні проблеми дозування дрібнодисперсних сипких матеріалів

Дозування дрібнодисперсних сипких матеріалів супроводжується низкою технологічних труднощів, зумовлених їхніми фізико-механічними властивостями. Насамперед тонкі порошки характеризуються нестабільною текучістю: через високу питому поверхню та значні адгезійні сили частинки легко утворюють агломерати, що призводить до утворення “склепін” і каналів у бункерах. Це спричиняє різкі переривання потоку та непередбачувані коливання витрати.

Ще однією характерною проблемою є мінливість насипної щільності. Дрібнодисперсні матеріали схильні до ущільнення під дією вібрацій або власної

ваги, тому при об'ємному дозуванні фактична маса порції може суттєво відрізнятись від розрахункової. Це ускладнює забезпечення стабільної точності процесу та потребує частих переналаштувань обладнання.

Важливим фактором є також електростатичне наелектризування частинок, що викликає їх прилипання до стінок робочих камер та елементів дозатора. Таке явище не тільки змінює реальну витрату, а й може спричинити засмічення або нерівномірність подачі. Додатковою проблемою виступає схильність тонких порошоків до інтенсивного пиловиділення, що зменшує реальний вихід продукту та створює ризики для персоналу й навколишнього середовища.

На точність дозування також впливають вологість і повітропроникність матеріалу: підвищена вологість сприяє злипанню частинок, а надмірна легкість порошку – пульсаціям потоку. Крім того, дрібнодисперсні сипкі матеріали часто демонструють схильність до сегрегації, що порушує однорідність подачі в апаратах безперервної дії.

Усі зазначені явища зумовлюють значну варіативність поведінки матеріалу в процесі дозування та потребують ретельного підбору конструкції обладнання, способу подачі та систем регулювання, здатних підтримувати стабільні параметри потоку.

На основі проведеного аналізу використання вібрації при дозуванні сипких матеріалів можна зробити висновок, що дозатори сухої речовини з хорошою сипучістю не завжди підходять для дозування.

Сипкий матеріал при дозуванні утворює дуги та засмічення, осідає на стінках ємностей та грудкується, що ускладнює процес дозування та негативно впливає на точність та ефективність роботи дозаторів. У зв'язку з цим виникає актуальна потреба в дослідженні процесу дозування сипких матеріалів та вдосконалення конструкції дозаторів для підвищення їхньої ефективності.

Задачі дослідження

Для досягнення поставленої мети були вирішені такі задачі:

1. Проаналізувати сучасний стан дозування сипких дрібнодисперсних матеріалів та виявлення недоліків в процесі роботи дозаторів.
2. Дослідити ефективну в'язкість дрібнодисперсного сипкого матеріалу та його поведінку під дією вібраційних впливів в процесі дозування.
3. Провести експериментальні дослідження роботи дозатора та порівняти результати з теоретичними даними.
4. Встановити та оптимізувати раціональні параметри режимів роботи дозатора при подачі та транспортуванні борошна.
5. Розробити заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях при роботі з дозаторами борошна.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА РОЗРОБКА ДОСЛІДНОЇ УСТАНОВКИ

2.1 Методика планування експериментальних досліджень

Основною метою проведення експериментальних досліджень є часткове доповнення та обґрунтування, що дозволяє встановити режими роботи та геометричні параметри розвантажувальної лунки дозатора, що в свою чергу забезпечуватиме високу продуктивність та точність роботи дозатора. Під час планування експерименту основним завданням стояло забезпечити наступні умови, такі, як [10]:

- чітка інтерпретація результатів експериментальних досліджень та висока їх надійність;
- проведення дослідів повинно бути максимальної формалізації, а опрацювання результатів дослідження виконуватися використовуючи комп'ютерні програми.

Для послідовності та зручності проведення експериментальних досліджень використовувалася програма досліджень, яка складається із трьох основних етапів [10]:

- перший етап – стосується розроблення методики та програми досліджень, яка створює умови їх проведення з мінімальними затратами ресурсів; вибору необхідних для дослідження вхідних параметрів; вибору, для ефективного опрацювання дослідних даних, технічних засобів;
- другий етап – стосується підготовки дослідного обладнання та вимірювальних приладів, градація необхідних додаткових конструктивних частин; проведення експерименту і опрацювання отриманих даних; порівняльна оцінка припущених та одержаних дослідних;
- третій етап – стосується узагальнення попередніх двох етапів та встановлення оптимальних конструктивно технологічних параметрів при

проектуванні та впровадження результатів експериментальних досліджень у виробництво.

Виконання впровадження результатів експериментальних досліджень проводилося в наступній послідовності: виявлення факторів, які найбільше впливатимуть на процес дозування; дослідження впливу виявлених факторів на ефективну в'язкість СМ; вивчення впливу форми розвантажувальної камери та робочих умов дозатора на його продуктивність.

До вхідних факторів першої групи належать k -мірний вектор X керованих параметрів, тобто тих, які можна в процесі проведення досліду змінювати. До таких параметрів відносяться: амплітуда $x_1=a$, частота коливань $x_2=v$, ширина випускного отвору розвантажувальної лунки дозатора $x_3=b_0$. Область можливих значень параметрів $x_1 \dots x_k$, де $k=3$, формує факторний простір.

Таблиця 2.1 - Вхідні фактори експерименту при дослідженні величини опору пшеничного борошна під дією вібрації

Характеристика фактора	Амплітуда коливань $x_1, м$	Частота коливань $x_2, Гц$	Висота шару сипкого матеріалу $x_3, м$
+	0,004	30	0,2
-	0,002	10	0,08

До другої групи вхідних факторів належать параметри які можна контролювати, і вони формують вектор W , але в процесі проведення досліду такі параметри можна регулювати. До контрольованих але некерованих параметрів належать: кут нахилу стінок розвантажувальної лунки дозатора w_1 , висота шару сипкого матеріалу w_2 . Фактори цієї групи є незмінними під час проведення експериментальних досліджень.

До третьої групи вхідних параметрів належать фактори, що часто мають випадковий характер. Ця група формує вектор Z . Сюди належать: насипна щільність матеріалу z_1 , зчеплення між частинками z_2 . До цієї групи належать параметри, які важко контролювати в процесі проведення досліду.

Вектор відгуку Y , що являється функцією вхідних факторів, залежить від

мети та поставленого завдання. Для перевірки теоретичних припущень було експериментально проаналізовано такі вектори відгуку: коефіцієнт ефективної в'язкості $y_1 = \mu$ та продуктивність $y_2 = Q$.

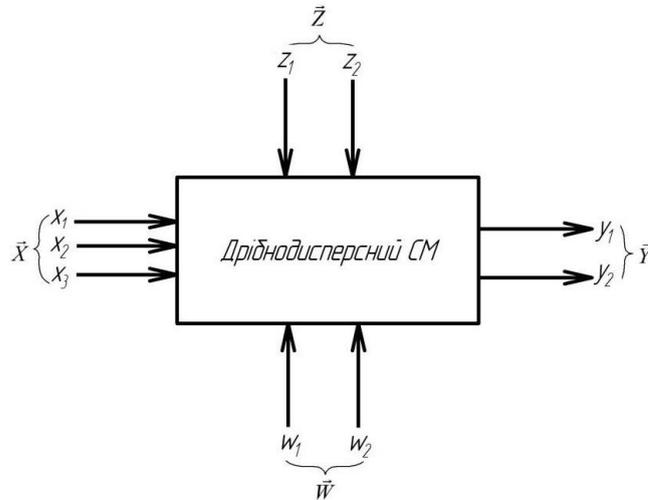


Рисунок 2.1 - Схема впливу факторів на поведінку дрібнодисперсного сипкого матеріалу.

Задля досвідченого доповнення тези теоретичного припущення запропонованої моделі вивчались чинники першої групи, проте при тлумаченні здобутків брався до уваги вплив і інших показників. Залежно від того, який вектор відгуку вивчався, на проведення досліду впливали ті чи інші вихідні чинники.

Одним із найважливіших завдань другого етапу програми дослідних випробувань є конструювання та створення дослідного апарату. До нього були поставлені такі вимоги:

- нескладність будови та змога швидкої переналадки;
- сталість режимів роботи;
- просте керування вхідних показників у потрібних межах.

2.2 Опис розробленої експериментальної установки

Розроблена експериментальна установка вібраційного об'ємного дозатора (рис.2.2) із технічними характеристиками (табл. 2.2) складається із конічної розвантажувальної лунки 1, на дні якої розміщене коливне конічне днище 2. Конічне днище приводиться у дію ексцентриковим віброприводом 3 через

кривошипно-шатунний механізм 4.



Рисунок 2.2 - Дослідна установка вібраційного дозатора

Таблиця 2.2 - Технічна характеристика дослідного вібраційного дозатора для дрібнодисперсних сипких матеріалів

Показники	Значення
Потужність електродвигуна, кВт	1
Максимальна частота обертання електродвигуна, Гц	30
Мінімальна частота обертання електродвигуна, Гц	10
Амплітуда коливань, м	0,0005...0,004
Маса дозатора, кг	17
Габарити дозатора:	
довжина ширина висота, м	0,5×0,5×0,95

Зміна амплітуди коливань $0,5 \cdot 10^{-3}$ м до $4 \cdot 10^{-3}$ м здійснювалась

шляхом розведення двох пів муфт, що мають пазами. Частота коливань регулювалася в межах 10 □□ □ 30 Гц при допомозі частотного перетворювача. У відповідності до досліджуваного фактору відгуку дослідна установка вібраційного об'ємного дозатора (рис. 2.2) додатково укомплектовувався приладами та пристосуваннями.

Для проведення експериментальних досліджень використовувався такий дрібнодисперсний сипкий матеріал як пшеничне борошно, що характеризується такими властивостями як наведені в (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 - Фізико механічні властивості сипкого матеріалу

Фізико-механічні властивості сипкого матеріалу	Борошно
Середній діаметр, мкм	30-50
Насипна щільність матеріалу, кг/м ³	450-700
Коефіцієнт внутрішнього тертя	0,57-1,16
Коефіцієнт зовнішнього тертя:	
по сталі	0,49-0,65
по резині	0,85-0,95
Початковий опір зсуву, Па	50
Коефіцієнт динамічного ущільнення	1,08-1,13
Вологість, %	10

Під час проведення досліджень використовувалась конічна розвантажувальна лунка із фіксованими геометричними параметрами (рис. 2.3).

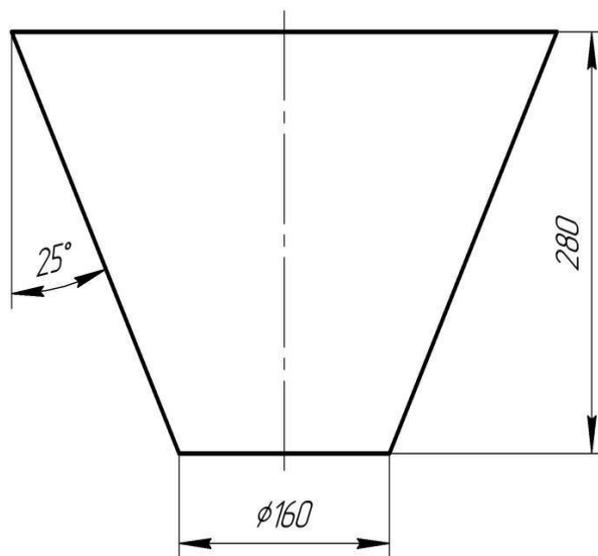


Рисунок 2.3 – Розрахункова схема розвантажувальної лунки дозатора

Висновок до другого розділу

Отже, для забезпечення ефективного функціонування вібраційного об'ємного дозатора дрібнодисперсних сипких матеріалів важливим етапом є визначення параметра r^* . З цією метою необхідно експериментально встановити вплив режимів роботи дозатора – амплітуди a , частоти коливань ν та висоти шару h дрібнодисперсного матеріалу - на значення коефіцієнта ефективної в'язкості μ даного продукту. Після цього визначаються оптимальні параметри коливань a і ν робочого органу дозатора при заданому співвідношенні h/R_0 . Отримане значення параметра r^* надалі дає змогу встановити необхідні режими роботи об'ємного дозатора, що забезпечують його максимальну ефективність з урахуванням геометрії конічного розвантажувального отвору та висоти шару завантаженого сипкого матеріалу.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧИХ ПАРАМЕТРІВ ДОЗАТОРА БОРОШНА

3.1 Дослідження впливу параметрів дозатора та висоти шару матеріалу на його ефективну в'язкість

Першим етапом проведення експериментальних досліджень було визначення впливу режимів роботи дозатора a , \square та висоти шару h дрібнодисперсного СМ на коефіцієнт ефективної в'язкості \square продукту [11]. Принципова схема експериментальної установки вібраційного об'ємного дозатора зображена на рис. 3.1.

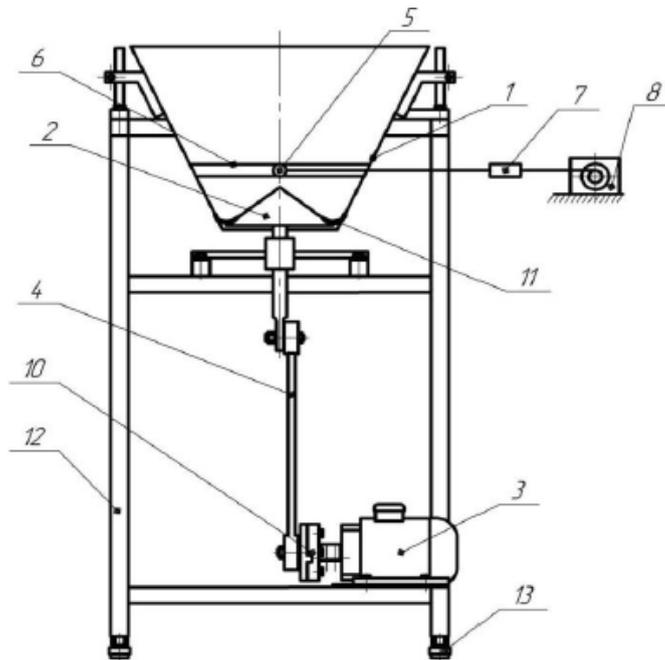


Рисунок 3.1 - Схема вібраційного об'ємного дозатора, для визначення коефіцієнта ефективної в'язкості дрібнодисперсних СМ

Основними складовими елементами експериментального зразку об'ємного дозатора є розвантажувальна лунка 1, коливне конічне днище 2, вібропривід 3 та кривошипно-шатунний механізм 4. Для проведення експерименту по визначенню коефіцієнта ефективної в'язкості дрібнодисперсного СМ у середині розвантажувальної лунки дозатора 1 було протягнуто та зафіксовано паралельно дві струни 6, що виконували функцію

напрямних для кульки 5. Визначення ефективної в'язкості продукту здійснювалось шляхом протягування кульки 5 всередині розвантажувальної лунки 1 через сипке середовище. Напрямні 6 були встановлені вище вершини внутрішнього конуса 2.

За допомогою механізму 8 кулька 5 рівномірно протягувалась через розвантажувальну лунку дозатора 1 та давачем 7 вимірювався опір сипкого середовища. Регулювання амплітуди коливань конічного днища 2 відбувалось шляхом розведення півмуфт 10. Кільцевий випускний отвір розвантажувальної лунки дозатора 1 перекривався за допомогою вакуумної гуми 11. Весь експериментальний зразок змонтований на рамі 12, яка встановлена на регульованих ніжках 13.

Експериментальні дослідження коефіцієнта ефективної в'язкості дрібнодисперсних СМ проводились при різних значеннях амплітуди a , частоти коливань \square робочого органу дозатора та висоті шару h завантаженого продукту, що були визначені у якості вхідних факторів для цього експерименту. Знімаючи показники давача 7 фіксувалось значення сили, що прикладалась до кульки для її протягуванні через СМ із середньою швидкістю $0,2$ м/с. Для проведення експерименту використовувалась кулька діаметром $10^{\square 2}$ м.

Значення коефіцієнта ефективної в'язкості визначено за формулою:

$$\mu = \frac{F_{o.c}}{3 \cdot \pi \cdot d_k \cdot V_k}, \quad (3.1)$$

де $F_{o.c}$ - зусилля, що прикладалось до кульки для подолання опору середовища при її протягуванні; d_k - діаметр кульки; V_k - швидкість руху кульки.

Оскільки кількість вхідних факторів рівна $k=3$, тому мінімальне число дослідів становило $N=2^k=2^3=8$. З метою зменшення впливу випадкової похибки на результати експерименту, досліді проводились із п'ятикратною повторюваністю $n \square 5$. З урахуванням числа паралельних дослідів загальна мінімальна кількість дослідів рівна $5 \times 8=40$. Результати експериментальних досліджень по визначенні зусилля опору пшеничного борошна під час протягування кульки представлені в (табл. 2.1, табл. 3.2).

З метою перевірки відтворюваності експериментальних досліджень обробка даних (табл. 3.1) виконана за планом [11].

Таблиця 3.1 - Результати дослідження коефіцієнта ефективної в'язкості пшеничного борошна

N п/п	Амплітуда коливань, мм	Частота коливань, Гц	Висота шару СМ, м	Коефіцієнт ефективної в'язкості СМ (μ_1), Пуаз	Коефіцієнт ефективної в'язкості СМ (μ_2), Пуаз	Коефіцієнт ефективної в'язкості СМ (μ_3), Пуаз	Коефіцієнт ефективної в'язкості СМ (μ_4), Пуаз	Коефіцієнт ефективної в'язкості СМ (μ_5), Пуаз	\square_{ξ}	σ_{ξ}^2	$\square_{\xi n}$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1	2	10	0,08	10,26	10,61	11,38	9,96	9,52	10,35	0,49	10,38
2	2	10	0,2	28,8	30,02	29,85	28,83	30,26	29,55	0,47	29,75
3	2	30	0,08	8,38	6,53	7,11	8,05	7,15	7,44	0,57	7,28
4	2	30	0,2	29,59	29,65	29,03	28,26	30,42	29,39	0,64	27,26
5	4	10	0,08	10,92	9,92	9,53	8,88	9,81	9,81	0,55	8,56
6	4	10	0,2	27,45	28,13	26,23	27,2	27,15	27,23	0,47	27,47
7	4	30	0,08	4,12	3,08	3,33	2,93	4,25	3,54	0,37	3,5
8	4	30	0,2	24,14	25,06	24,03	25,12	25,21	24,71	0,33	24,44

1. Здійснено оцінку дисперсії експериментальних значень коефіцієнта ефективної в'язкості пшеничного борошна, яка для кожного рядка матриці планування та результатів експерименту (табл. 3.3) визначена за формулою:

$$\sigma_{\xi}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{\xi=1}^n (\mu_{\xi n} - \bar{\mu}_{\xi})^2, \quad (3.2)$$

де $\xi=1..N$ – порядковий номер дослід; n – число повторень експерименту; $\mu_{\xi n}$ – експериментальне значення коефіцієнта ефективної в'язкості СМ; $\bar{\mu}_{\xi}$ – середнє експериментальне значення коефіцієнта ефективної в'язкості СМ для кожного дослід.

2. Перевірка відтворюваності результатів експериментальних досліджень коефіцієнта ефективної в'язкості пшеничного борошна з допомогою критерію Кохрена.

Для перевірки відтворюваності експериментальних досліджень (табл. 3.3) визначено критерій Кохрена [11]:

$$G = \frac{\sigma_{\xi \max}^2}{\sum_{\xi=1}^N \sigma_{\xi}^2} = \frac{2,14}{8} \approx 0,27, \quad (3.3)$$

де $\sigma_{\xi \max}^2$ – максимальна дисперсія експериментальних значень коефіцієнта ефективної в'язкості пшеничного борошна (вибирається із XII стовпця табл. 3.3); $\sum_{\xi=1}^N \sigma_{\xi}^2$ – сума дисперсій експериментальних значень коефіцієнта ефективної в'язкості пшеничного борошна.

Критичне значення критерію Кохрена G_{max} являє собою максимально можливе його значення, при якому гіпотеза про відтворюваність експерименту справедлива з надійністю 95 %. Критичне значення для коефіцієнту ризику $\alpha = 0,05$ при $n=5$, $N=8$ [13] рівне $G_{max}=0,39$. Оскільки виконується умова $G_{max} \geq G$, тому можна вважати, що експеримент по дослідженні коефіцієнта ефективної в'язкості пшеничного борошна є відтворюваним.

Створення математичної моделі, що описує залежність коефіцієнта ефективної в'язкості μ_t від амплітуди a , частоти коливань ν та висоти шару матеріалу h .

Використавши результати експериментальних досліджень (табл. 3.1) та зробивши припущення, що взаємодія усіх трьох факторів експерименту a , ν , h на функцію відгуку μ_t відсутня, за допомогою програмного середовища Excel знайдено коефіцієнти рівняння регресії, що описує залежність коефіцієнта ефективної в'язкості μ_t від амплітуди a , частоти коливань ν та висоти шару матеріалу h .

Отримано у явному вигляді наступне рівняння регресії для визначення коефіцієнта ефективної в'язкості пшеничного борошна:

$$\mu_t = b_0 + b_1 \cdot a + b_2 \cdot \nu + b_3 \cdot h + b_4 \cdot a \cdot \nu + b_5 \cdot a \cdot \nu \cdot h + b_6 \cdot \nu \cdot h. \quad (3.4)$$

де $b_0 = 5,1$; $b_1 = 1477,5$; $b_2 = -0,23$; $b_3 = 133,9$; $b_4 = -22,88$; $b_5 = 3775$;

$b_6 = 0,85$ - коефіцієнти рівняння регресії.

Після встановлення коефіцієнтів рівняння регресії здійснено оцінку їх значущості за критерієм Стьюдента (t -критерієм):

$$t_i = \frac{|b_i|}{\sqrt{\sigma^2(b_i)}}, \quad (3.5)$$

де b_i - коефіцієнти рівняння регресії; $\sigma^2(b_i)$ - дисперсія помилок коефіцієнтів рівняння регресії.

Дисперсія помилок коефіцієнтів рівняння регресії визначена за формулою:

$$\sigma^2(b_i) = \frac{\sigma^2(\mu)}{n \cdot N}, \quad (3.6)$$

де $\sigma^2(\mu) = \sum_{\xi=1}^N \frac{\sigma_{\xi}^2}{N} = \frac{4,21}{8} \approx 0,53$ - дисперсія відтворюваності експериментальних досліджень.

Використавши значення дисперсії відтворюваності експериментальних досліджень коефіцієнта ефективної в'язкості пшеничного борошна, визначено дисперсію помилок коефіцієнтів рівняння регресії (3.4) за формулою (3.6): $\sigma^2(b_i) \approx 0,013$.

Знайдено із формули (3.5) t -критерії кожного коефіцієнта рівняння регресії (3.4):

$$t_0 = 46,23; t_1 = 13394,49; t_2 = 2,09; t_3 = 1214; t_4 = 207,4; t_5 = 34223; t_6 = 7,71.$$

Для визначення значущих для рівняння регресії (3.4) коефіцієнтів, необхідно отримані їх значення порівняти із критичним $t_{кр}$, що встановлюється із табл. В. 5. [110]: при коефіцієнті ризику $\alpha_2 \approx 0,05$ і $n \cdot N = 40$ - $t_{кр} = 2,02$. Оскільки $t_0 > t_{кр}$, $t_1 > t_{кр}$, $t_2 > t_{кр}$, $t_3 > t_{кр}$, $t_4 > t_{кр}$, $t_5 > t_{кр}$, $t_6 > t_{кр}$, то можна із надійністю 95% стверджувати, що усі коефіцієнти є значущими для даного рівняння регресії.

Таким чином рівняння регресії, що описує залежність коефіцієнта ефективної в'язкості пшеничного борошна від амплітуди a , частоти коливань ω та висоти шару матеріалу h , має наступний вигляд:

$$\sigma_{ad}^2 = \frac{1}{N-d} \sum_{\xi=1}^N (\bar{\mu}_{\xi} - \mu_t)^2 \approx 0,9, \quad (3.7)$$

4. Перевірка адекватності отриманого рівняння регресії.

Для перевірки адекватності рівняння регресії необхідно оцінити відхилення теоретичного значення коефіцієнта ефективної в'язкості μ_t , визначеного за формулою (3.7), від експериментального μ_{ξ} .

Оцінка дисперсії адекватності математичної моделі (3.7) проведена за формулою:

$$\sigma_{ad}^2 = \frac{1}{N-d} \sum_{\xi=1}^N (\bar{\mu}_{\xi} - \mu_t)^2 \approx 0,9, \quad (3.8)$$

де $d = 7$ - число членів апроксимуючого поліному.

Дисперсію відтворюваності експериментальних досліджень (табл. 3.3) визначено по формулі:

$$\sigma_{\mu}^2 = \sum_{\xi=1}^N \frac{\sigma_{\xi}^2}{N} \approx 0,49. \quad (3.9)$$

Оскільки $\sigma_{ad}^2 \triangleright \sigma_{\mu}^2$, то перевірку адекватності моделі потрібно виконувати за допомогою критерію Фішера (F-критерію). Використавши значення (3.8) та (3.9) обчислено критерій Фішера:

$$F = \frac{\sigma_{ad}^2}{\sigma_{\mu}^2} \approx 1,85. \quad (3.10)$$

Критичне значення критерію Фішера $F_{кр}$ при коефіцієнті ризику $\beta_3 = 0,05$, $\nu_1^* = N - d = 1$ та $\nu_2^* = N(n - 1) = 32$ [10] рівне $F_{кр} = 4,12$. Оскільки виконується умова $F_{кр} \square F$, то отримане рівняння регресії (3.7) адекватно відтворює результати експерименту.

Використавши формулу (3.7) у програмному середовищі MathCAD отримано графічні залежності $\mu(h)$ для пшеничного борошна (рис. 3.2а). Дослідження впливу висоти шару дрібнодисперсного СМ h на коефіцієнт ефективної в'язкості μ пшеничного борошна здійснювалось при амплітуді коливань робочого органу $a = 2 \cdot 10^{-3}$ м. Для графічного представлення впливу частоти коливань \square робочого органу на коефіцієнт ефективної в'язкості \square пшеничного борошна (рис. 3.2б) досліджувався шар продукту висотою $h=0,2$ м.

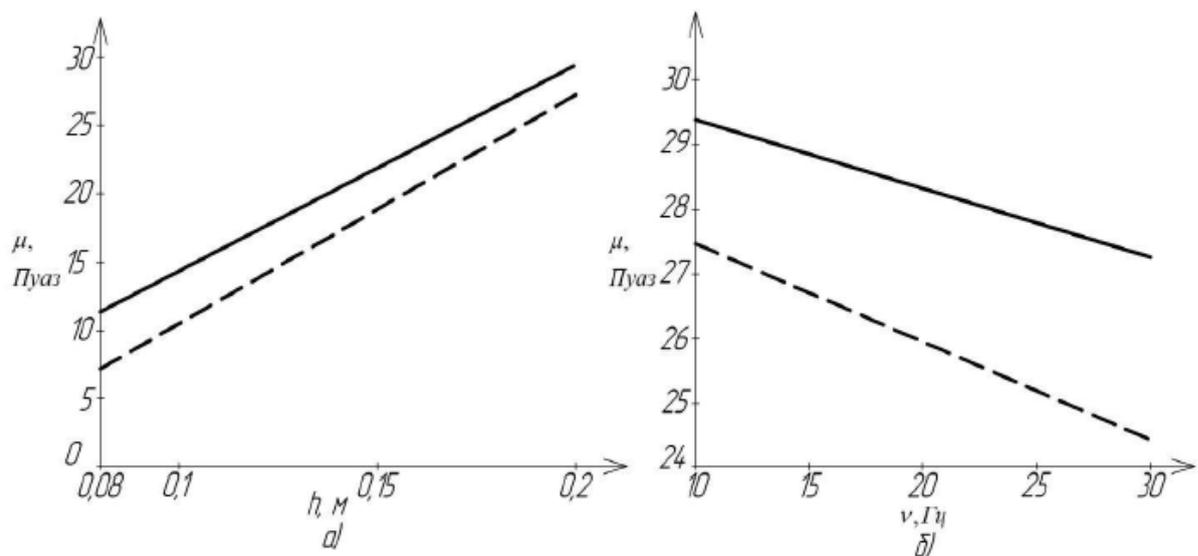


Рисунок 3.2 - Залежність коефіцієнта ефективної в'язкості пшеничного борошна від: а) висоти шару СМ (— — для $\square \square 10$ Гц, - - - - для $\square \square 30$ Гц); б) частоти коливань (— — для $a = 2 \cdot 10^{-3}$ м, - - - - для $a = 4 \cdot 10^{-3}$ м)

Аналіз графічних залежностей (рис. 3.2, а) дозволяє стверджувати, що при зростанні висота шару h СМ істотно зростає в'язкість дрібнодисперсного продукту. На інтенсивність зростання залежності $\mu(h)$ значно впливає частота коливань \square робочого органу дозатора. Чим вона вища, при однаковій висоті шару h СМ, тим менше значення коефіцієнта ефективної в'язкості \square пшеничного борошна і тим кращі показники текучості продукту.

Проаналізувавши отримані рівняння регресії для визначення коефіцієнта ефективної в'язкості пшеничного борошна (3.7) та цементу (3.11) та відповідні їм графічні залежності (рис. 3.2) можна стверджувати:

1. При зниженні амплітуди a та частоти коливань \square робочого органу дозатора ефективна в'язкість СМ збільшується. Однак при зростанні цих показників в'язкість продукту зменшується і у певний момент СМ переходить у стан віброкипіння.

2. Із збільшенням висоти шару h дрібнодисперсного СМ значно зростає його коефіцієнт ефективної в'язкості \square через значне ущільнення продукту у області випускного отвору, що спричинене зростанням тиску вище лежачих шарів матеріалу.

3. Із зростанням насипної щільності дрібнодисперсного СМ збільшується вплив висоти шару продукту на його коефіцієнт ефективної в'язкості через

збільшення ваги шару матеріалу, що знаходиться вище.

Як уже зазначалось, дослідження впливу режимів коливань a , ω робочого органу дозатора та висоти шару h дрібнодисперсного продукту на його коефіцієнт ефективної в'язкості μ є важливим етапом для регулювання стану СМ і, тим самим, забезпечення ефективної роботи об'ємного дозатора.

3.2 Дослідження впливу вібраційних параметрів конічного днища на продуктивність дозатора

Продуктивність витікання пшеничного борошна досліджували за такою методикою. У конічну приймальну лунку 1 завантажували певну кількість борошна. Після натискання кнопки «пуск» вмикався електродвигун 3, який через муфту 7 передавав обертальний рух робочому механізму. Завдяки коливанням конічного днища 2 відбувалося витікання борошна через щілинний зазор, утворений між конічним днищем 2 та стінкою розвантажувальної частини дозатора 1.

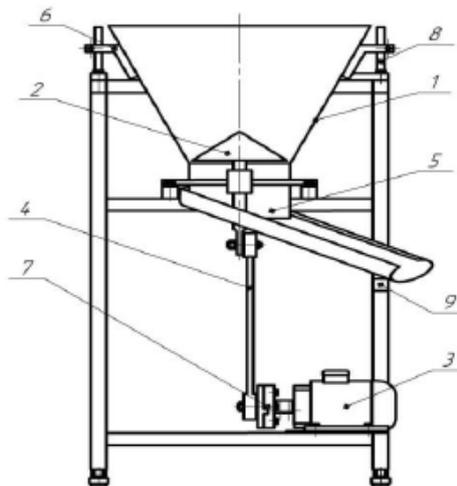


Рисунок 3.3 - Схема вібраційного об'ємного дозатора для визначення продуктивності

Після виходу пшеничного борошна через випускний отвір розвантажувальної лунки 1 воно надходило у патрубок 5, закріплений на рамі 9 за допомогою планки, а далі спрямовувалося до приймальної ємності. Продуктивність роботи дозатора визначали на основі вимірювання часу витікання фіксованої маси борошна. Під час експерименту фіксували

тривалість проходження порції пшеничного борошна масою $m_6 = 3$ кг. Кожен дослід виконували п'ять разів ($n = 5$) для забезпечення задовільної відтворюваності результатів. На підставі отриманих даних за відповідною залежністю обчислювали продуктивність витікання пшеничного борошна табл. 3.2.

Таблиця 3.2 - Матриця планування та результатів повнофакторного експерименту при дослідженні ефективної в'язкості пшеничного борошна

N п/п	x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 \cdot x_2$	$x_1 \cdot x_3$	$x_2 \cdot x_3$	$x_1 \cdot x_2 \cdot x_3$	$F_{o.c1}, Н$	$F_{o.c2}, Н$	$F_{o.c3}, Н$	$F_{o.c4}, Н$	$F_{o.c5}, Н$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	0,193	0,2	0,215	0,188	0,179
2	+	-	-	+	+	-	-	+	0,543	0,566	0,563	0,540	0,57
3	+	-	+	-	-	+	-	+	0,158	0,123	0,134	0,152	0,135
4	+	-	+	+	-	-	+	-	0,558	0,559	0,547	0,533	0,573
5	+	+	-	-	-	-	+	+	0,206	0,187	0,18	0,167	0,185
6	+	+	-	+	-	+	-	-	0,517	0,53	0,494	0,513	0,512
7	+	+	+	-	+	-	-	-	0,078	0,058	0,063	0,055	0,08
8	+	+	+	+	+	+	+	+	0,455	0,472	0,453	0,474	0,475

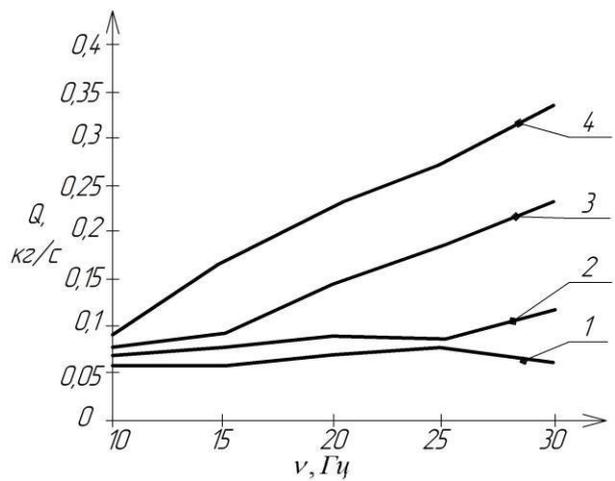
$$Q_i = \frac{m_6}{t_i}, \quad (3.11)$$

де t_i — тривалість витікання борошна під час проведення i -го дослід.

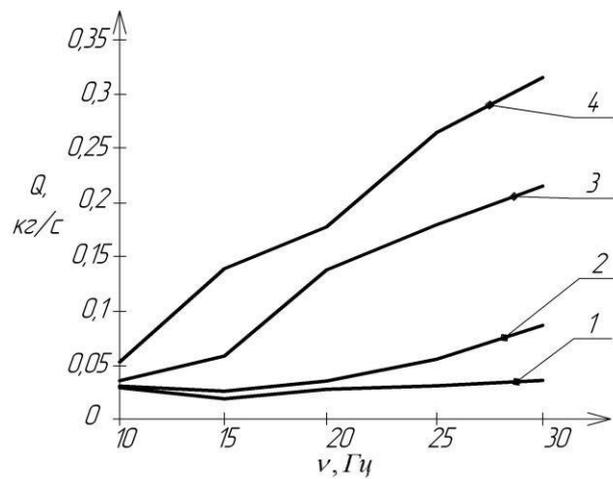
Експериментальні результати (табл. 3.2) були використані для встановлення закономірностей впливу частоти коливань ν конічного днища на продуктивність Q вібраційного об'ємного дозатора пшеничного борошна. Дослідження виконували при різних амплітудах коливань:

1 – $a = 0,0005$ м; 2 – $a = 0,001$ м; 3 – $a = 0,002$ м; 4 – $a = 0,003$ м.

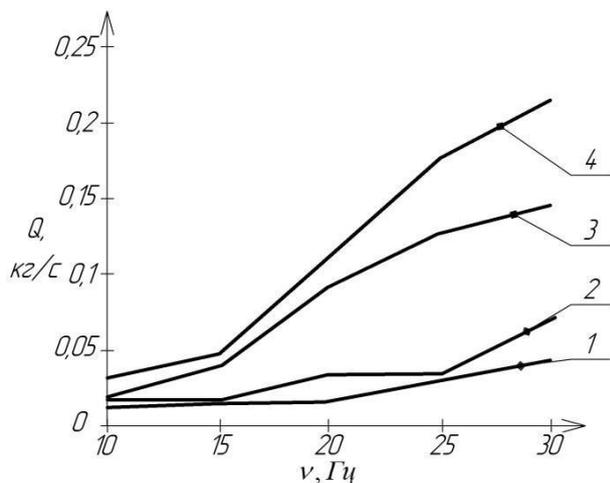
Випробування проводили для декількох розмірів випускного отвору: а) $b_0 = 0,008$ м (рис. 3.4 а), б) $b_0 = 0,006$ м (рис. 3.4 б), в) $b_0 = 0,004$ м. (рис. 3.4 в).



а)



б)



в)

Рисунок 3.4 – Графіки залежності продуктивності дозатора від частоти коливань при різних розмірах випускного отвору:

а) $b_0 = 0,008$ м, б) $b_0 = 0,006$ м,
в) $b_0 = 0,004$ м.

Аналіз отриманих графічних залежностей (рис. 3.4 а), б), в) показує, що підвищення частоти ν та амплітуди a коливань кінцевого днища призводить до зростання продуктивності дозатора Q . Водночас встановлено, що збільшення продуктивності більш ніж на 50 % також пов'язане з розширенням розміру кільцевого випускного отвору з $b_0 = 0,004$ м до $b_0 = 0,008$ м, оскільки більша площа перерізу забезпечує пропускання більшої кількості продукту за однаковий інтервал часу.

Відносну похибку експериментального визначення продуктивності дозатора для пшеничного борошна обчислювали за формулою [13]:

$$\delta_Q = \frac{\Delta Q}{Q}, \quad (3.12)$$

де ΔQ - абсолютна похибка досліджень продуктивності визначається [9]:

$$\Delta Q = t_{кр} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta(Q_i))^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (3.13)$$

Коефіцієнт Стьюдента $t_{кр}$ визначали за відповідною таблицею: при коефіцієнті ризику $\beta_2 = 0,05$ та загальній кількості спостережень ($n \cdot N = 25$) його значення становить: $t_{кр} = 2,06$ [10].

Аналіз результатів продуктивності витікання матеріалу (табл. 3.3) показує, що відхилення окремих вимірювань від середнього значення продуктивності не перевищує $\delta Q \leq 4 \%$ за умов, коли амплітуда коливань становить $a \geq 0,002$ м, а частота – $\nu \geq 20$ Гц. Водночас, при значенні параметра вібрації $a\omega^2 < 31$ м/с² варіація продуктивності зростає й знаходиться у межах $8 \leq \delta Q \leq 42 \%$. Це свідчить про нестабільний, хаотичний та важкопрогнозований характер руху пшеничного борошна за низької інтенсивності вібраційного впливу.

Таблиця 3.3 - Результати дослідження продуктивності витікання пшеничного борошна при $\delta Q < 4 \%$

Ширина кільцевого випускного отвору, b_0 , м	Амплітуда коливань, a , м	Частота коливань, ν , Гц	Продуктивність витікання, Q_1 , кг/с	Продуктивність витікання, Q_2 , кг/с	Продуктивність витікання, Q_3 , кг/с	Продуктивність витікання, Q_4 , кг/с	Продуктивність витікання, Q_5 , кг/с	Q , кг/с	Відносна похибка вимірювань продуктивності, δ_Q	Похибка експериментальних досліджень, δ
0,008	0,003	20	0,221	0,238	0,221	0,238	0,238	0,231	0,04	0,11
	0,003	25	0,258	0,282	0,282	0,282	0,282	0,277	0,04	0,13
	0,003	30	0,344	0,310	0,344	0,344	0,344	0,337	0,04	0,14
	0,002	20	0,141	0,148	0,141	0,141	0,148	0,144	0,02	0,15
	0,002	25	0,182	0,182	0,194	0,194	0,182	0,187	0,03	0,15
	0,002	30	0,238	0,238	0,221	0,238	0,221	0,231	0,04	0,11
	0,001	30	0,124	0,119	0,119	0,124	0,119	0,121	0,02	0,07
0,006	0,003	20	0,172	0,182	0,182	0,172	0,182	0,178	0,03	0,06
	0,003	25	0,258	0,258	0,258	0,282	0,258	0,263	0,04	0,10
	0,003	30	0,310	0,310	0,310	0,310	0,344	0,317	0,04	0,09
	0,002	20	0,142	0,135	0,139	0,141	0,143	0,140	0,02	0,08
	0,002	25	0,180	0,175	0,180	0,185	0,180	0,180	0,02	0,13
	0,002	30	0,221	0,221	0,207	0,207	0,221	0,215	0,03	0,13
	0,001	30	0,091	0,084	0,084	0,082	0,086	0,085	0,04	0,07
0,004	0,003	20	0,115	0,111	0,119	0,111	0,115	0,114	0,03	0,12
	0,003	25	0,182	0,172	0,182	0,172	0,182	0,178	0,03	0,11
	0,003	30	0,221	0,207	0,207	0,221	0,221	0,215	0,03	0,13
	0,002	20	0,089	0,094	0,091	0,089	0,091	0,091	0,02	0,14
	0,002	25	0,124	0,129	0,119	0,129	0,124	0,125	0,03	0,14
	0,002	30	0,148	0,141	0,148	0,155	0,141	0,147	0,04	0,13
	0,001	30	0,067	0,070	0,067	0,069	0,067	0,068	0,02	0,13

Використання показників відносної похибки вимірювання продуктивності (табл. 3.3) як основного критерію оцінки точності роботи дозатора є недоцільним, оскільки для отримання статистично достовірних висновків кількість паралельних вимірювань повинна становити щонайменше

20 [2]. У зв'язку з цим наступним етапом експериментальних досліджень стало вивчення впливу режимів коливань конічного днища на точність дозування, що значною мірою визначається фізико-механічними властивостями досліджуваного матеріалу.

Для аналізу точності роботи дозатора були розглянуті три режими його функціонування, які відповідають різній інтенсивності вібрації:

$$a\omega^2 < 31 \text{ м/с}^2; a\omega^2 \approx 31 \text{ м/с}^2; a\omega^2 \gg 31 \text{ м/с}^2.$$

З цією метою проведено серію дослідів для визначення впливу зазначених режимів коливань на масу пшеничного борошна, що витікає через розвантажувальну лунку з розміром кільцевого випускного отвору $b_0 = 0,008$ м протягом часу $t = 20$ с. Для забезпечення високої достовірності результатів кожен режим досліджувався за двадцятикратної повторюваності ($n = 20$).

Експериментальні випробування точності дозатора проводилися за трьох значень інтенсивності вібрації:

1 – $a\omega^2 = 17,7 \text{ м/с}^2$ ($a = 0,002$ м, $\nu = 15$ Гц); 2 – $a\omega^2 = 31,6 \text{ м/с}^2$ ($a = 0,002$ м, $\nu = 20$ Гц); 3 – $a\omega^2 = 71 \text{ м/с}^2$ ($a = 0,002$ м, $\nu = 30$ Гц),

Результати яких наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Результати дослідження впливу режимів коливань днища на точність роботи дозатора для борошна

Режим роботи дозатора	M_1 , кг	M_2 , кг	M_3 , кг	M_4 , кг	M_5 , кг	M_6 , кг	M_7 , кг	M_8 , кг	M_9 , кг	M_{10} , кг	M_{11} , кг	M_{12} , кг	M_{13} , кг	M_{14} , кг	M_{15} , кг	M_{16} , кг	M_{17} , кг	M_{18} , кг	M_{19} , кг	M_{20} , кг
$a\omega^2 = 17,7 \text{ м/с}^2$	$M \square 1,81 \text{ кг}; S \square 0,18; \square_m \square 10\%$																			
	1,85	2,06	1,98	1,52	1,83	1,66	2,13	1,67	1,74	1,97	1,75	1,97	1,8	1,52	1,96	1,74	1,67	2,05	1,78	1,57
$a\omega^2 = 31,6 \text{ м/с}^2$	$M \square 3,22 \text{ кг}; S \square 0,058; \square_m \square 1,8\%$																			
	3,22	3,25	3,23	3,17	3,26	3,21	3,26	3,18	3,26	3,17	3,21	3,16	3,33	3,22	3,11	3,23	3,21	3,37	3,19	3,2
$a\omega^2 = 71 \text{ м/с}^2$	$M \square 4,8 \text{ кг}; S \square 0,072; \square_m \square 1,5\%$																			
	4,78	4,89	4,82	4,71	4,77	4,67	4,79	4,81	4,84	4,82	4,8	4,91	4,79	4,86	4,73	4,66	4,82	4,93	4,76	4,85

У практичних умовах для оцінювання точності роботи дозатора зазвичай застосовують показник середньоквадратичного відхилення маси проби від її номінального (заданого) значення. У рамках проведених експериментальних досліджень це відхилення розраховували за формулою:

$$S = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{n-1}}, \quad (3.14)$$

де M_i – маса i -тої відібраної проби;

\bar{M} – середнє значення маси проби за час її відбору;

n – кількість відібраних проб.

Для характеристики стабільності та точності процесу дозування додатково застосовували коефіцієнт варіації, який є одним із найбільш інформативних статистичних критеріїв точності роботи дозувальних пристроїв [2]. Він визначається як відношеня середньоквадратичного відхилення маси проби та дозволяє оцінити рівень коливань фактичної маси порцій відносно їх середнього значення.

$$\delta_m = \frac{S}{\bar{M}} \cdot 100\%. \quad (3.15)$$

Значення середньоквадратичного відхилення S , середньої маси проби \bar{M} та коефіцієнта варіації точності дозування δ_m , отримані для кожної серії експериментів, наведені в табл. 3.4.

На підставі експериментальних даних (табл. 3.4), було виконано аналіз відхилень мас окремих проб M_i від середнього значення \bar{M} для кожного із встановлених режимів роботи дозатора.

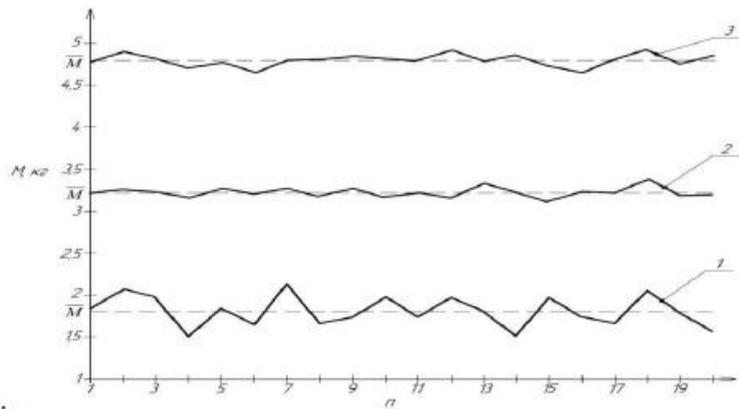


Рисунок 3.5 – Графіки залежності точності дозування від інтенсивності вібрації: 1 – $a\omega^2 = 17,7 \text{ м/с}^2$; 2 – $a\omega^2 = 31,6 \text{ м/с}^2$; 3 – $a\omega^2 = 71 \text{ м/с}^2$.

Аналіз побудованих залежностей (рис. 3.5) свідчить, що за інтенсивності вібрації $a\omega^2 = 17,7 \text{ м/с}^2$ (крива 1) коефіцієнт варіації точності дозування становить $\delta_m = 10 \%$, що вказує на нестабільний характер руху пшеничного борошна та, відповідно, на недостатню ефективність роботи дозатора в цьому режимі. Натомість за інтенсивності коливань $a\omega^2 = 31,6 \text{ м/с}^2$ (крива 2) та $a\omega^2 = 71 \text{ м/с}^2$ (крива 3) вібраційний об'ємний дозатор із конічною розвантажувальною лункою демонструє значно кращі показники роботи, забезпечуючи високу точність дозування пшеничного борошна, при якій коефіцієнт варіації становить $\delta_m = 2 \%$.

Відносну похибку δ експериментально отриманих значень продуктивності Q порівняно з теоретично розрахованими величинами Q_t для серії дослідів, проведених за інтенсивності вібраційного впливу $a\omega^2 = 31 \text{ м/с}^2$ (табл. 3.3), визначали згідно з такою залежністю:

$$\delta = \frac{\bar{Q} - Q_t}{Q_t}, \quad (3.16)$$

де Q_t – теоретично визначене значення продуктивності дозатора для пшеничного борошна.

На основі результатів експериментальних досліджень витікання борошна (табл. 3.3) та з використанням формули (3.20) було обчислено відносну похибку δ між експериментальними значеннями продуктивності Q_i теоретичною величиною Q_t . Аналіз отриманих даних показав, що проведені дослідження

характеризуються похибкою $\delta \leq 15 \%$, що відповідає допустимим межам і підтверджує достовірність експериментальних результатів.

Висновок до третього розділу

На основі аналізу результатів проведених експериментальних досліджень встановлено, що продуктивність дозатора зростає зі збільшенням амплітуди a , частоти ν та розміру випускного отвору b_0 . Для оцінки точності дозування необхідна двадцятикратна повторюваність дослідів; відносна похибка продуктивності не є надійним критерієм.

Встановлено, що низька інтенсивність вібрації ($a\omega^2 = 17,7 \text{ м/с}^2$) призводить до нестабільного витікання матеріалу ($\delta = 10 \%$). При $a\omega^2 = 31,6 \dots 71 \text{ м/с}^2$ дозатор забезпечує високу точність дозування ($\delta = 2 \%$).

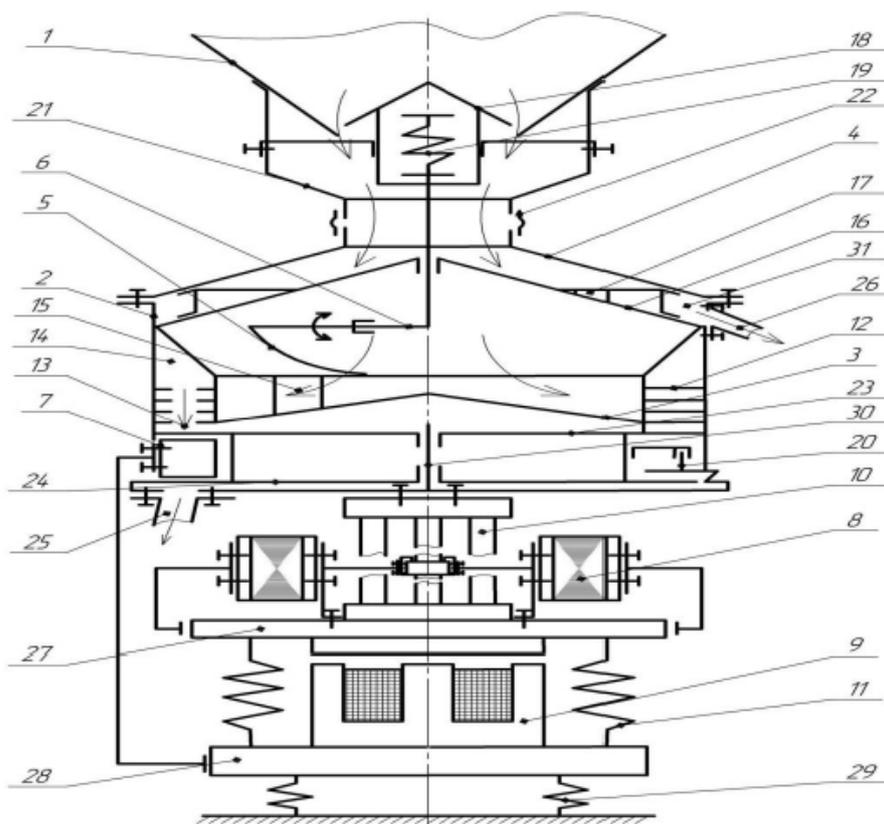
Експериментальні дані узгоджуються з теоретичними: відносна похибка продуктивності становить $\delta \leq 15 \%$. Точність та продуктивність значною мірою залежать від фізико-механічних властивостей сипкого матеріалу. Ефективність роботи дозатора визначається параметром r^* , що враховує інтенсивність коливань, висоту шару та властивості матеріалу.

РОЗДІЛ 4

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ДОЗАТОРА В ПРОЦЕСІ ТРАНСПОРТУВАННЯ БОРОШНА

На основі результатів проведених досліджень запропоновано принципову схему вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних сипких матеріалів [24], що забезпечує рівномірне дозування матеріалів, схильних до злежування та утворення грудок (рис. 4.1).

Для спрощення експлуатації в конструкції дозатора реалізовано автоматичну подачу матеріалу з бункера в дозувальну чашу за допомогою регулятора рівня матеріалу. Зміна положення контактів цього регулятора керує роботою віброзбуджувача, який здійснює транспортування сипкого матеріалу із завантажувального бункера. Конструктивні параметри й режими роботи віброзбуджувача визначені на основі теоретичної моделі процесу подачі.



*Рисунок 4.1 – Схема вібраційного об'ємного дозатора для
дрібнодисперсних сипких матеріалів*

При транспортуванні сипких продуктів із хорошими сипучими властивостями зазвичай не виникає труднощів. Проте для дрібнодисперсних

сипких матеріалів ефективність процесу може знижуватись через низьку швидкість руху продукту та, відповідно, зменшення продуктивності дозування. Для підвищення ефективності подачі таких матеріалів необхідно оптимізувати режими коливань робочої поверхні дозатора.

Ця оптимізація базується на встановленні залежності швидкості транспортування сипкого продукту від основних параметрів коливального руху: форми траєкторії коливань, частоти ν , амплітуди a , кута зсуву фаз між складовими амплітуди ε , кута вібрації γ та кута нахилу робочої поверхні β . Крім того, важливим є вплив фізико-механічних властивостей дрібнодисперсного матеріалу, товщини шару δ і умов експлуатації на вищезгадані параметри процесу вібротранспортування.

Для вибору оптимальних режимів вібраційного транспортування дрібнодисперсних сипких матеріалів були досліджені два типи коливань робочої поверхні – напрямлені (лінійні) та еліптичні, оскільки саме вони найчастіше реалізуються у конструкціях вібраційних дозаторів [18].

Спочатку було розглянуто процес вібротранспортування матеріалу під дією напрямлених коливань робочого органу. Прийнято, що робочий елемент вібраційного транспортера здійснює гармонічні прямолінійні коливання, напрямлені під кутом γ до його поздовжньої осі, з амплітудою a і частотою ν , які описуються рівнянням:

$$\eta = a \cdot \sin(\omega t), \quad (4.1)$$

де ω – кругова частота коливань робочого органу дозатора.

Колівальні рухи, які здійснює віброуюча поверхня можна розділити на такі дві складові: поперечний і поздовжній. В робочому процесі транспортування борошна забезпечуються різні функції його переміщення: швидкість забезпечується поздовжньою складовою режим транспортування – нормальна. Процес транспортування матеріалу зумовлений спільним впливом на нього інерційних сил і сил тертя.

Основними характеристиками процесу вібраційного транспортування дрібнодисперсного сипкого матеріалу є коефіцієнт швидкості ($K_{ш}$) та параметр

режиму вібротранспортування (ζ). Коефіцієнт швидкості ($K_{ш}$) визначається відповідно до такого співвідношення:

$$K_{ш} = \frac{V_{\delta}}{V_{\epsilon.m}}, \quad (4.2)$$

де V_{δ} – експериментально знайдена швидкість;

$V_{\epsilon.m}$ – швидкість вібротранспортування теоретична;

$$V_{\epsilon.m} = 2\pi \cdot \nu \cdot a_2; \quad (4.3)$$

a_2 - горизонтальна складова амплітуди коливань.

Перевантаження визначаємо за виразом:

$$\zeta = \frac{a_n \cdot \omega^2}{g} = \frac{a_n \cdot (2\pi \cdot \nu)^2}{g}. \quad (4.4)$$

де a_n - нормальна складова амплітуди коливань.

Дослідним шляхом визначено залежність швидкості вібраційного транспортування пшеничного борошна (вологістю 10 %) від товщини шару борошна, яке транспортується [17], дослідження проводили для шарів різної товщини:

Товщина шару борошна, δ , м								
0,002	0,005	0,007	0,01	0,015	0,02	0,03	0,04	0,05

Результатом дослідження стали графічні залежності коефіцієнту швидкості $K_{ш}$ від параметра перевантаження (ζ) (рис. 4.2).

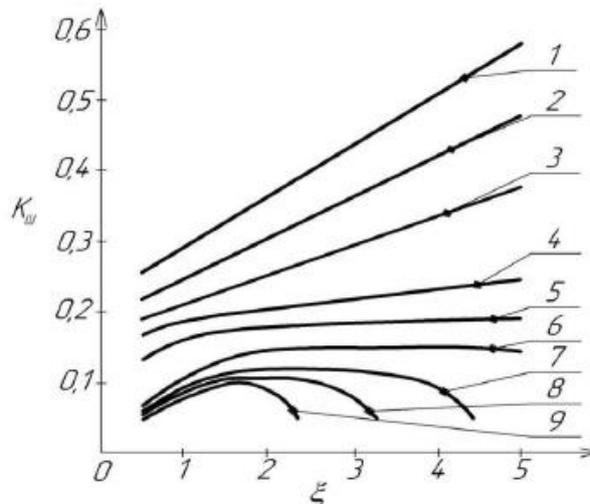


Рисунок 4.2 - Графік залежності $K_{ш}$ від (ζ) при прямолінійних коливаннях

На основі проведеного аналізу дослідних даних видно, що при збільшенні товщини шару борошна δ зменшується швидкість транспортування $K_{ш}$. Аналіз залежності $K_{ш} = f(\zeta)$ показує, що швидкість вібраційного транспортування V_δ будь якого шару борошна зростає у безвідривному режимі вібраційного транспортування $\zeta \leq 1$.

Проте у відривному режимі вібротранспортування ($\zeta \leq 1$) характер зміни кривої коефіцієнта швидкості ($K_{ш}$) визначається насамперед товщиною шару матеріалу (δ). При переході установки до інтенсивніших режимів роботи зростання швидкості спостерігалось лише для шарів завтовшки $0,002 \leq \delta \leq 0,02$ м. Для шарів із товщиною ($\delta > 0,02$ м) фіксувалося зниження швидкості, а за певних значень параметра ζ процес вібротранспортування ставав нестабільним, після чого повністю припинявся. Це пояснюється порушенням умов ефективної передачі енергії від вібруючої поверхні до маси матеріалу, що переміщається по ній.

Таким чином, борошно з товщиною шару менше ніж 0,02 м забезпечує стійке та ефективне транспортування в умовах інтенсивних режимів вібраційної дії. За таких параметрів зберігається оптимальний контакт між частинками матеріалу та робочою поверхнею, що гарантує безперервну передачу енергії та стабільний рух.

Натомість шари товщиною понад 0,02 м характеризуються погіршенням динамічної взаємодії з вібруючою поверхнею, що призводить до зменшення швидкості переміщення та можливого переходу процесу в режим нестійких коливань або повного припинення транспортування.

Після аналізу процесу транспортування сипких матеріалів під дією лінійних коливань було встановлено, що підвищити ефективність дозування можна шляхом використання еліптичних коливань робочого органу дозатора. Такий підхід дає змогу регулювати напрям руху сипкого матеріалу, а також розширює діапазон можливих режимів роботи системи.

При еліптичному русі геометрична форма траєкторії визначається горизонтальною (a_2) і нормальною (a_n) складовими амплітуди коливань, а також кутом зсуву фаз ε між ними.

$$\begin{cases} x = a_z \cdot \sin(\omega t), \\ y = a_n \cdot \sin(\omega t + \varepsilon). \end{cases} \quad (4.5)$$

Траєкторія руху робочого органу при еліптичних коливаннях описується рівнянням:

$$\frac{x^2}{a_n^2} + \frac{y^2}{a_z^2} - 2 \frac{xy}{a_n a_z} \cos(\varepsilon) = \sin^2(\varepsilon). \quad (4.6)$$

Із наведеного співвідношення випливає, що форма еліпса суттєво залежить від кута зсуву фаз ε і може змінюватися від прямолінійної до майже кругової. Наявність двох незалежних складових коливань дозволяє керувати напрямом руху сипкого матеріалу, змінюючи фазу однієї з них.

Експериментально встановлено, що на швидкість вібротранспортування основний вплив мають такі параметри, як форма траєкторії, співвідношення амплітуд складових, кут нахилу великої осі еліпса до горизонту, частота та амплітуда коливань, а також напрям обертання траєкторії [18]. Крім цього, на процес транспортування помітно впливають властивості сипкого матеріалу - його щільність, вологість, сипучість і товщина шару δ .

Експериментальні дослідження, результати яких наведено в [17], виконувалися на установці, що забезпечує еліптичний характер коливань робочої поверхні з частотою 50 Гц. Під час досліджень горизонтальну складову амплітуди коливань підтримували сталою $a_z = 0,0015$ м, тоді як нормальна складова амплітуди (a_n та кут зсуву фаз ε змінювалися відповідно до умов експерименту.

У процесі випробувань визначали швидкість вібротранспортування пшеничного борошна з вологістю ($W = 10\%$) для різних товщин шару в діапазоні $0,005 \leq \delta \leq 0,05$ м.

За результатами експерименту отримано низку графічних залежностей коефіцієнта швидкості ($K_{ш}$) від параметра перевантаження (ζ) для різних значень товщини шару (δ) та кутів зсуву фаз (ε):

1 - $\varepsilon = 0^0$; 2 - $\varepsilon = 30^0$; 3 - $\varepsilon = 60^0$; 4 - $\varepsilon = 90^0$; 5 - $\varepsilon = 120^0$; (рис. 4.4-4.7).

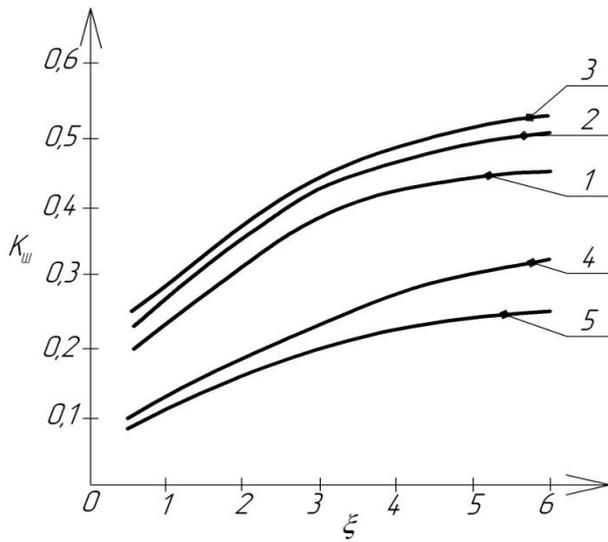


Рисунок 4.4 – Графік залежності коефіцієнта швидкості від режиму роботи при еліптичних коливаннях ($\delta = 0,005\text{м}$)

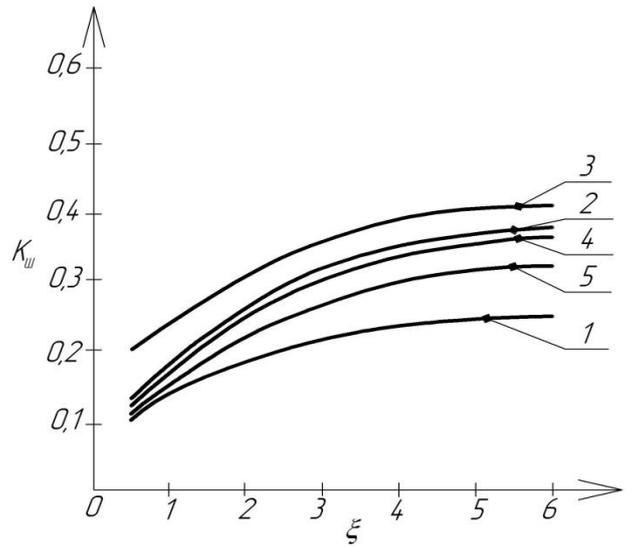


Рисунок 4.5 – Графік залежності коефіцієнта швидкості від режиму роботи при еліптичних коливаннях ($\delta = 0,01\text{м}$)

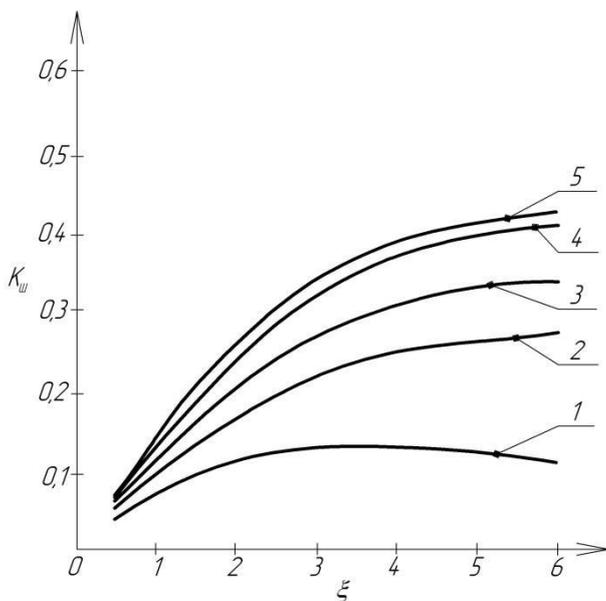


Рисунок 4.6 – Графік залежності коефіцієнта швидкості від режиму роботи при еліптичних коливаннях ($\delta = 0,02\text{м}$)

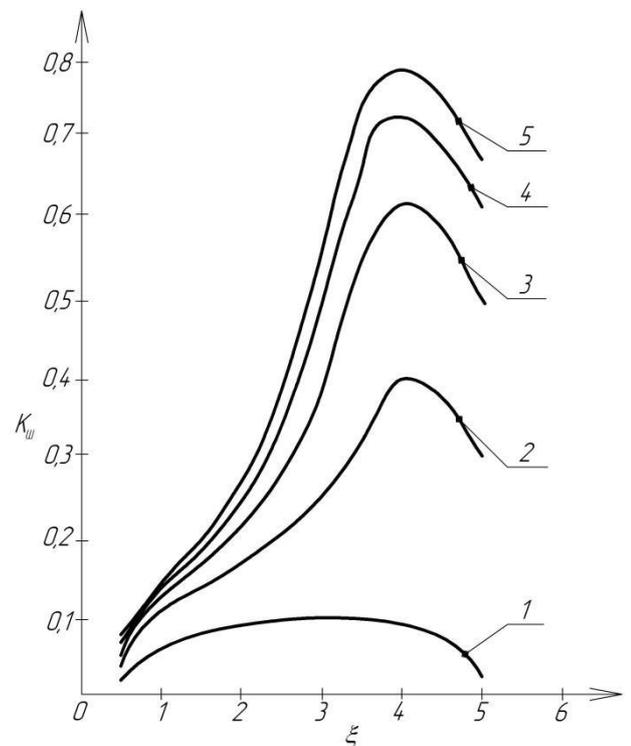


Рисунок 4.7 – Графік залежності коефіцієнта швидкості від режиму роботи при еліптичних коливаннях ($\delta = 0,04\text{м}$)

Отримані криві демонструють, що параметр перевантаження (ζ) суттєво впливає на інтенсивність переміщення дрібнодисперсного матеріалу. Для тонких шарів ($\delta = 0,005, \text{ м}$) спостерігається майже лінійне зростання коефіцієнта швидкості ($K_{ш}$) із збільшенням (ζ), що свідчить про ефективну передачу енергії від віброуючої поверхні до матеріалу.

У міру збільшення товщини шару до ($\delta = 0,01...0,02, \text{ м}$) зростання ($K_{ш}$) відбувається менш інтенсивно, проте залишається стабільним у широкому діапазоні значень (ζ).

Для товстих шарів ($\delta = 0,04...0,05, \text{ м}$) характер залежності змінюється: на початку також простежується збільшення швидкості, однак після досягнення певного критичного значення параметра перевантаження різко проявляється ефект віброкипіння, що призводить до зниження ($K_{ш}$) та втрати стабільності руху.

Встановлено, що форма та положення кривих для різних кутів зсуву фаз (ε) істотно відрізняються. Це свідчить про те, що зміна фази між складовими коливань є ефективним інструментом керування процесом транспортування і дозволяє оптимізувати умови переміщення дрібнодисперсних сипких матеріалів залежно від їх фізичних властивостей і товщини шару.

Висновок до четвертого розділу

1. Швидкість вібраційного транспортування пшеничного борошна товщиною шару $\delta < 0,01 \text{ м}$ при прямолінійних і еліптичних коливаннях практично однакова, однак для шарів $0,01 < \delta < 0,04 \text{ м}$ швидкість у режимі еліптичних коливань є майже в 10 разів більшою.

2. Із ростом товщини шару сипкого матеріалу швидкість вібротранспортування знижується, а при $\delta > 0,04 \text{ м}$ — наближається до нуля. Максимальна швидкість досягається при формі траєкторії коливань у вигляді витягнутого еліпса зі співвідношенням осей 1:2...1:5.

3. При горизонтальному положенні великої осі еліпса зміна напрямку обертання траєкторії спричиняє зміну напрямку руху сипкого матеріалу.

4. Для кожної товщини шару існує свій оптимальний кут зсуву фаз ε_{opt} , за якого транспортування відбувається з максимальною ефективністю.

5. Застосування еліптичних коливань робочого органу дозатора дозволяє забезпечити оптимальні режими роботи для широкого діапазону зміни фізико-механічних властивостей дрібнодисперсних сипких матеріалів, підвищуючи продуктивність і стабільність процесу дозування.

РОЗДІЛ 5

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

5.1 Загальні вимоги охорони праці при роботі з дозаторами борошна

Організація безпечних умов праці під час проєктування, виготовлення, монтажу та експлуатації дозаторів борошна є одним із ключових аспектів ефективного функціонування технологічних ліній борошномельного виробництва. Враховуючи специфіку роботи з дрібнодисперсними сипкими матеріалами, необхідно приділяти особливу увагу заходам запобігання пиловиховим ситуаціям, забрудненню робочого середовища, травмуванню персоналу рухомими частинами обладнання, а також впливу шуму, вібрацій і електромагнітних полів.

Робочі місця операторів дозаторів мають бути організовані відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», Державних санітарних норм і правил ДСН 3.3.6.042-99, Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (ПБЕЕС), ДСТУ ISO 45001:2019 та Правил пожежної безпеки в Україні (НАПБ А.01.001-2014).

До основних небезпечних і шкідливих виробничих факторів під час експлуатації дозаторів борошна належать:

- запиленість повітряного середовища, що може перевищувати гранично допустимі концентрації (ГДК) борошняного пилу;
- утворення вибухонебезпечних пилоповітряних сумішей, особливо при концентрації пилу понад 50-60 г/м³;
- підвищена температура та нагрівання окремих елементів обладнання, що може бути джерелом займання пилу;
- механічна небезпека – травмування при обертанні або коливанні робочих органів дозатора;
- електричне ураження у разі пошкодження ізоляції чи відсутності заземлення;

- вплив шуму та вібрацій, рівень яких може перевищувати допустимі норми за ДСН 3.3.6.037-99.

Для зниження впливу цих факторів у виробничих приміщеннях необхідно забезпечити такі технічні та організаційні заходи:

1. Герметизація вузлів дозатора і транспортних комунікацій, через які проходить борошно, що зменшує розповсюдження пилу в робочу зону.
2. Установлення систем аспірації та фільтрації повітря, які забезпечують безперервне видалення пилу з місць його утворення.
3. Регулярне технічне обслуговування дозаторів, перевірка кріплень, балансування вібраційних елементів та мастило рухомих частин відповідно до графіка ППР (планово-попереджувальних робіт).
4. Застосування систем блокування і захисних кожухів, що унеможливають контакт працівника з рухомими частинами дозатора.
5. Заземлення та перевірка опору ізоляції електрообладнання, періодичне тестування пристроїв захисного вимкнення (ПЗВ).
6. Освітлення робочих місць має відповідати вимогам ДБН В.2.5-28:2018 та забезпечувати рівномірну освітленість не нижче 300 лк.
7. Оптимальний мікроклімат у приміщенні: температура 18–22 °С, відносна вологість 60–70 %, швидкість руху повітря не більше 0,3 м/с.
8. Організація інструктажів (вступного, первинного, повторного, цільового) з питань охорони праці та пожежної безпеки.
9. Контроль рівня шуму та вібрацій на робочому місці, застосування демпфувальних прокладок під обладнанням.

Працівники, що обслуговують дозатори, повинні мати відповідну кваліфікацію та пройти медичний огляд відповідно до вимог Наказу МОЗ №246 від 21.05.2007 р. До роботи допускаються особи не молодше 18 років, які пройшли навчання, перевірку знань з охорони праці та мають посвідчення встановленого зразка.

Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) для операторів дозаторів повинні включати:

- респіратори класу захисту не нижче FFP2 або P2;
- захисні окуляри або щиток;
- комбінезон або халат із антистатичної тканини;
- діелектричне взуття;
- протишумові навушники при рівні шуму понад 80 дБА.

З метою профілактики професійних захворювань необхідно проводити періодичний лабораторний контроль повітряного середовища, моніторинг запиленості та оцінку вібраційних навантажень на працівників.

Організація робочого місця повинна передбачати зручне розташування дозатора, пульта керування, аварійного вимикача та сигналізації, що забезпечує оперативне реагування у разі виникнення нештатної ситуації.

Загалом, дотримання вимог охорони праці при експлуатації дозаторів борошна дозволяє знизити рівень виробничого травматизму, підвищити продуктивність праці, подовжити термін служби обладнання та забезпечити стабільну роботу технологічної лінії.

5.2 Пожежна безпека та вибухозахист у борошномельному виробництві

Борошно є горючою речовиною з високим потенціалом утворення вибухонебезпечного пилу. Концентрація пилу понад 50 г/м³ у повітрі може спричинити займання від іскри чи перегріву обладнання.

Для запобігання пожежам і вибухам необхідно:

- забезпечити аспіраційне видалення пилу із робочої зони дозатора;
- використовувати вибухозахищене електрообладнання відповідно до класу вибухонебезпечності приміщення;
- встановити системи автоматичного контролю температури електродвигунів та підшипників;

- здійснювати регулярну очистку від пилу технологічного обладнання, підлоги, стін і стелі;
- заборонити використання відкритого вогню, іскроутворюючих інструментів і куріння у виробничих приміщеннях;
- мати в наявності первинні засоби пожежогасіння (вогнегасники типу ВП-5, ВП-10);
- обладнати приміщення системами пожежної сигналізації та автоматичного оповіщення.

5.3 Електробезпека

Дозатори борошна належать до обладнання, що живиться від мережі змінного струму 220/380 В.

Для забезпечення електробезпеки слід:

- проводити заземлення всіх металевих частин, що можуть опинитися під напругою;
- застосовувати автоматичні вимикачі та пристрої захисного відключення (ПЗВ);
- забезпечити періодичний контроль опору ізоляції електромереж і заземлюючих контурів;
- допускати до роботи лише персонал, який має відповідну групу з електробезпеки не нижче II;
- виконувати інструктажі та перевірки знань з охорони праці не рідше одного разу на рік.

5.4 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Під час експлуатації дозаторів можливі надзвичайні ситуації техногенного або природного характеру: пожежі, вибухи пилу, короткі замикання, аварійні відключення електроенергії, землетруси тощо.

У таких випадках необхідно діяти відповідно до Плану реагування на надзвичайні ситуації, який розробляється на підприємстві.

Алгоритм дій персоналу:

1. негайно зупинити роботу обладнання.
2. Вимкнути електроживлення головним рубильником.
3. Повідомити керівництво або чергову службу цивільного захисту.
4. Розпочати евакуацію персоналу з небезпечної зони.
5. У разі займання - застосувати первинні засоби пожежогасіння, не наражаючи себе на небезпеку.

На підприємстві має бути призначена комісія з охорони праці, створена система оповіщення, а також визначені місця збору працівників у разі евакуації.

Висновок до п'ятого розділу

Забезпечення належного рівня охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях під час роботи з дозаторами борошна є необхідною умовою стабільного функціонування виробництва.

Дотримання вимог техніки безпеки, впровадження аспіраційних систем, вибухозахищеного обладнання та навчання персоналу значно знижують ризики травматизму, пожеж і техногенних аварій, підвищуючи надійність і ефективність експлуатації дозаторів у борошномельних підприємствах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В процесі виконання кваліфікаційної роботи було вирішено комплекс задач, спрямованих на підвищення ефективності роботи вібраційного об'ємного дозатора при транспортуванні та дозуванні дрібнодисперсних сипких матеріалів, зокрема пшеничного борошна. В результаті проведених теоретичних та експериментальних досліджень зроблено такі висновки:

1. Встановлено закономірності впливу параметрів вібраційного режиму – амплітуди a та частоти ν коливань робочого органу – a також висоти шару h матеріалу на формування ефективної в'язкості μ борошна.

2. Експериментально визначено коефіцієнт ефективної в'язкості μ для пшеничного борошна за різних режимів коливань та різної висоти шару. Встановлено, що зі зростанням сил міжчасткового зчеплення необхідно підвищувати інтенсивність вібрацій $a\omega^2$ для забезпечення стабільного та рівномірного дозування.

3. Доведено, що продуктивність Q дозатора залежить лінійно від частоти та амплітуди коливань лише за умови досягнення стану ламінарних циркуляцій у зоні розвантаження. Визначено межі робочих режимів, у яких дозатор забезпечує максимальну стабільність потоку матеріалу.

4. Проведено оптимізацію параметрів роботи дозатора, що дало змогу визначити раціональні значення амплітуди a , частоти ν та відношення h/R_0 , за яких коефіцієнт ефективної в'язкості мінімізується, а робота дозатора стає максимально стабільною та продуктивною. Визначено узагальнений параметр r^* , що враховує геометрію конічного розвантажувального отвору, висоту шару матеріалу та встановлені параметри коливань.

5. Розроблені заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях вирішують комплекс задач, спрямованих на підвищення ефективності роботи вібраційного об'ємного дозатора при транспортуванні та дозуванні пшеничного борошна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондарчук Д. В. Підвищення точності роботи об'ємних дозаторів сипких речовин / Д. В. Бондарчук : Технологічні комплекси. 2010. № 1. С. 99–103.
2. Технологічне обладнання переробних та харчових виробництв. Лабораторний практикум для студентів інженерних спеціальностей : Бендера І.М., Стрельчук О.Я., Семенов О.М. Кам'янець-Подільський : ФОП Сисин О.В. 2007 204с.
3. Владіміров С. В. Процеси фасування крупів харчових продуктів і розробка конструкцій обладнання : автореф. дис. к-та техн. наук : 05.18.12 / Владіміров С. В. Донецьк : Донец. нац. ун-т екон. і торг.і ім. М. Туган-Барановського, 2008. 17 с.
4. В.М. Федорів, В.В. Підлісний, О.М. Семенов, О.О. Єрменчук Обґрунтування впливу інтенсифікації процесу просіювання на адгезійні властивості сипких матеріалів // Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки. № 29. Львів : 2022. С.70-76.
5. Волинець Н. С. Дослідження процесу дозування в'язких молочних продуктів з метою вдосконалення конструкції фасувального автомату М-2 / Н. С. Волинець, С. Ф. Федоров // Ukrainian Food Journal. 2012. № 3. С. 54 – 58.
6. Камінський В.Д. Переробка та зберігання сільськогосподарської продукції: навч. посібник для вузів / В.Д. Камінський, М.Б. Бабич. Одеса : Аспект. 2000. 460 с.
7. Кодра Ю. В. Завантажувальні пристрої технологічних машин. Навч. посібник / Ю. В. Кодра, З. А. Стоцько, О. В. Гаврильченко / за ред. З. А. Стоцька. Львів : Видавництво «Бескид Біт». 2008. 356 с.
8. Ланець О. С. Узагальнення розрахунків на жорсткість та міцність резонансних пружних систем вібраційних машин з простим рухом робочого органа / О. С. Ланець // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". 2008. № 613. С. 139 – 154.
9. Магерус Н. І. Вплив параметрів вібрації та геометрії лунки на рух

дрібнодисперсного сипкого матеріалу у конічній лунці дозатора / Н. І. Магерус / Вібрації в техніці та технологіях. 2014. №2. С. 71 – 78.

10. Магерус Н. І. Дослідження кінематики фрикційного механізму повороту відсікаючих дисків вібраційного об'ємного дозатора / Н. І. Магерус // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка : Технічні науки «Механізація сільськогосподарського виробництва». 2015. Випуск 156. С. 446–452.

11. Малкіна, Віра, Кюрчев, Сергій, Гуцол, Тарас, Верхоланцева, Валентина, Кюрчева, Людмила, Мірошніченко, Микола, Білюк, Микола, Підлісний, Віталій, Гюргюлю, Хатіче та Ковальчик, Збігнєв. "Оптимізація параметрів віброконвеєрної системи для інфрачервоного сушіння сої" *Agricultural Engineering*, vol.26, no.1, 2022, pp.157-166.

12. Машина, обладнання та їх використання при переробці сільськогосподарської продукції / Інструктивно-методичні матеріали до лабораторних занять *по розділу Машина та обладнання для переробки продукції рослинництва / для здобувачів першого бакалаврського рівня спеціальності 208 «Агроінженерія» / В. В. Підлісний, О. М. Семенов, Кам'янець-Подільський: 2024. 131 с.*

13. Машина та обладнання переробних виробництв: Навч. посібник / [О.В. Дацишин, А. І. Ткачук, Д. С. Чубов та ін.]; за заг. ред. О. В. Дацишина. Київ : Вища освіта. 2005. 159 с.

14. Методичні рекомендації для виконання та оформлення дипломної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності Н7 «Агроінженерія» / Ю.І. Панцир, А.В. Рудь, В.І. Дуганець, В.І. Дуганець, Л.С. Шелудченко, С.М. Грушецький, Комарніцький С.П. За ред. В.І. Дуганця. Кам'янець-Подільський : ЗВО «ПДУ», 2025. 52 с.

15. Обладнання підприємств харчової та переробної промисловості / [І. С. Гулий, М. М. Пушанко, Л. О. Орлов та ін.] ; за заг. ред. І.С. Гулого. Вінниця : Нова книга, 2001. 576 с.

16. Озарєв В.О., Підлісний В.В. Обґрунтування конструкції вібраційного об'ємного дозатора для борошна // Перші наукові кроки – 2025: збірник

наукових праць XIX Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих науковців (17 квітня 2025 р., м. Кам'янець-Подільський). Кам'янець-Подільський : 2025. 65 с.

17. Основи технології виробництва та первинної переробки сільськогосподарської продукції : інструктивно-методичні матеріали для виконання лабораторних занять (для здобувачів освітнього ступеню “бакалавр” спеціальності 181 “Харчові технології”) / О.М. Семенов, В.В. Підлісний. Кам'янець-Подільський : ЗВО “ПДУ”, 2022. 76 с.

18. Пальчевський Б. О. Вплив відсікання дози сипкої речовини на точність дозування / Б. О. Пальчевський, Д. В. Бондарчук // Технологічні комплекси. 2011. № 2. С. 94 – 98.

19. Пальчевський Б. О. Аналіз точності роздільно-порційного об'ємного дозування сипких матеріалів / Б. О. Пальчевський, Д. В. Бондарчук // Наукові нотатки: міжвуз. зб. 2010. №28. С. 398 – 402.

20. Патент №100298 С2 України, МПК В65В 1/06. Об'ємний дозатор для сипкої речовини / Пальчевський Б. О., Бондарчук Д. В. № 201104335 ; Заявл. 11.04.2011 ; Опубл. 10.12.2012 ; Бюл. №23. 8с.

21. Патент №64909 U України, МПК В65В 1/06. Об'ємний дозатор для сипкої речовини / Пальчевський Б. О., Бондарчук Д. В. № 201104339 ; Заявл. 11.04.2011 ; Опубл. 25.11.2011 ; Бюл. №22. 3с.

22. Патент № 91402 U України, В65G27/00. Вібраційний конвеєр для транспортування сипучих матеріалів / Коц І. В., Богданов Є. В., Бадьора Н. П., Колісник О. П., Власенко А. М. № 201309937 ; Заявл. 09.08.2013 ; Опубл. 10.07.2014 ; Бюл. № 13. 5 с.

23. Патент № 95081 U України, В65G65/30. Вібраційний дозатор для сипких матеріалів / Ю. П. Шоловій, Н. І. Магерус. № 201407044 ; Заявл. 23.06.2014 ; Опубл. 10.12.2014 ; Бюл. № 23. 6 с.

24. Пальчевський Б. О. Експериментальне дослідження роботи об'ємних дозувальних пристроїв сипких речовин / Б. О. Пальчевський, Д. В. Бондарчук // Технологічні комплекси. 2011. № 3. С. 57 – 62.

25. Повідайло В. О. Вібраційні процеси та обладнання: навч. посіб./ В. О.

Повідайло. Львів : Видавництво Нац. ун-ту «Львівська політехніка». 2004. 248 с.

26. Проектування технологічних процесів переробних і харчових виробництв. Лабораторний практикум : навч. посіб. / Ю. Г. Сухенко, А. І. Ткачук, О. А. Дениско ; за ред. проф. Ю. Г. Сухенка. К. : НУБіП України. 2011. 262 с.

27. Іскович-Лотоцький Р. Д. Вібраційні та віброударні пристрої для розвантаження транспортних засобів : монографія / Р. Д. Іскович-Лотоцький, Я. В. Іванчук. Вінниця : ВНТУ. 2012. 156 с.

28. Єрмак В. П. Теоретичне дослідження відривного руху частки сипкого матеріалу по робочому органу вібраційного дозатора з електромагнітним збуджувачем коливань / В. П. Єрмак, Є.В. Богданов, О. С. Грачов // Вісник харківського національного технічного університету імені Петра Василенка / відп. ред. С. І. Овсянніков. 2011. Вип. 111. С.98 – 103.

29. Шоловій Ю. П. Обґрунтування конструктивних параметрів лунки дозатора для дрібнодисперсних сипких матеріалів / Ю. П. Шоловій, Н. І. Прокопець // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Український міжвід. наук.-техн. зб. Львів : Видавництво Львівської політехніки. 2013. Вип. 47. С. 45 – 50.

30. Шоловій Ю. П. Моделювання поведінки дрібнодисперсного сипкого матеріалу під дією вібрації у конічній лунці дозатора за допомогою системи Лоренца / Ю. П. Шоловій, Н. М. Тимошенко, Н. І. Магерус // Технологічні комплекси. 2014. №1. С. 109 – 117.

31. Шоловій Ю. П. Вплив параметрів вібрації на ефективність роботи об'ємного дозатора для дрібнодисперсних сипких матеріалів // Ю. П. Шоловій, Н. І. Магерус // Молодий вчений. 2016. № 2. С. 137 – 142.

32. Шоловій Ю. П. Оптимізація режимів роботи вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних сипких матеріалів / Ю. П. Шоловій, Н. І. Магерус // XII науково-практична конференція молодих вчених «Новітні технології пакування»: матеріали доповідей. Київ : 14 квітня 2016р. Упаковка. 2016. №3. С. 40 – 42.

