

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний аграрний університет
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра технологічних процесів та обладнання переробних і харчових
виробництв

Допущений до захисту:
завідувач кафедри
д.т.н., проф. І.В. Севостьянов

«__» листопада 2019 р.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНИХ
ОБ'ЄМНИХ ДОЗАТОРІВ ДЛЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ СИПКИХ
МАТЕРІАЛІВ.**

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

Виконав: студент групи 61-АІ маг
Черниш Ігор Володимирович

Керівник: к.т.н., доцент,
Деревенько Ірина Анатоліївна

Вінниця 2019

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра технологічних процесів
та обладнання переробних
і харчових виробництв

Інженерно-технологічний
факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою технологічних процесів
та обладнання переробних
і харчових виробництв

_____ д.т.н., проф. І.В. Севостьянов

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Чернишу Ігорю Володимировичу

затверджену наказом від «13»травня 2019 р., № 101-М

Вихідні дані для підготовки роботи:

1. Методичні вказівки з виконання магістерської роботи.
2. План – проспект магістерської роботи.
3. Підручники, і навчально-методичні посібники, статистичні дані.
4. Наукові видання (монографії, книги, збірники, журнали)
5. Нормативна та спеціальна література, дані держаних стандартів
6. Дані власних досліджень, одержаних в попередній період.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ РОБОТИ

Структура роботи		Обсяг сторінок	Термін підготовки
Анотація		2	
Вступ		3	
Розділ 1	АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВИДІВ ВІБРАЦІЙНИХ ОБ'ЄМНИХ ДОЗАТОРІВ ДЛЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ	27	
Розділ 2	ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТІКАННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЛУНКИ ДОЗАТОРА	16	
Розділ 3	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ОБ'ЄМНОГО ДОЗАТОРА	10	
Розділ 4	МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ОБ'ЄМНИХ ДОЗАТОРІВ ДЛЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ	15	
Висновки		1	
Список використаних джерел		8	

Термін подання роботи на кафедру

для попереднього захисту

« » _____ 2019 р.

Завдання видав

керівник к. т. н., доцент Деревенько І. А. _____ « » _____ 2019 р.

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновку, списку використаної літератури, обсяг роботи 87 сторінок.

Робота присвячена дослідженню параметрів та режимів роботи вібраційних об'ємних дозаторів для дрібнодисперсних сипких матеріалів.

Дослідження показали, що фізико-механічні властивості та поведінка дрібнодисперсних сипких матеріалів значною мірою залежать як від умов навколишнього середовища, так і особливостей процесу дозування.

Проведений огляд існуючих видів вібраційних дозаторів дозволяє стверджувати, що під впливом коливань робочого органу дрібнодисперсний сипкий матеріал може змінювати свої фізико-механічні властивості, текучість, реалізовувати рух у потрібному напрямі, а також здійснювати безперервну циркуляцію у бункері. Особливості поведінки продукту дозування під дією вібрації значною мірою залежать від геометрії розвантажувальної лунки бункера.

Досліджено математичну модель витікання дрібнодисперсних сипких матеріалів із розвантажувальної лунки дозатора при вібраційному збуренні потоку (модель Лоренца), що дозволяє прогнозувати поведінку дрібнодисперсного сипкого матеріалу (ущільнення, циркуляційні рухи, хаотичні рухи продукту) в залежності від амплітуди та частоти коливань робочого органу, а також геометрії розвантажувальної лунки дозатора.

Ключові слова: сипкий матеріал, вібраційний дозатор, бункер, лунка, амплітуда, частота, коливання.

ABSTRACT

The master's thesis consists of an introduction, four sections, a conclusion, a list of used literature, a volume of 87 pages.

The work is devoted to the study of parameters and modes of operation of vibrating bulk dispensers for fine particulate materials.

Studies have shown that the physico-mechanical properties and behavior of fine particulate materials are largely dependent on both environmental conditions and the characteristics of the dosing process.

The conducted review of existing types of vibration dispensers allows to state that, under the influence of vibrations of the working body, fine particulate material can change its physical and mechanical properties, fluidity, realize movement in the desired direction, as well as carry out continuous circulation in the hopper. The characteristics of the behavior of the product of the dosing under the action of vibration largely depend on the geometry of the unloading well of the hopper.

The mathematical model of leakage of fine particulate bulk materials from the discharge well of the dispenser under vibration perturbation of the flow (Lorentz model) is investigated, which allows to predict the behavior of fine particulate bulk material (seals, circulatory motions, chaotic motions of the actuary of the product) unloading well hole.

Keywords: bulk material, vibration dispenser, hopper, well, amplitude, frequency, vibrations.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВИДІВ ВІБРАЦІЙНИХ ОБ'ЄМНИХ ДОЗАТОРІВ ДЛЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ	11
1.1 Аналіз особливостей конструкцій вібраційних об'ємних дозаторів для сипких матеріалів	11
1.2 Аналіз математичних моделей процесу витікання сипких матеріалів із ємкостей	23
1.3 Вплив параметрів вібрації на поведінку сипких матеріалів	32
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТІКАННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЛУНКИ ДОЗАТОРА	38
2.1 Обґрунтування геометричних параметрів розвантажувальної лунки дозатора при гравітаційному витіканні дрібнодисперсних СМ	38
2.2 Моделювання процесу витікання сипкого матеріалу з конічної лунки дозатора під дією вібрації	47
2.3 Дослідження впливу параметрів коливань віброуючого конічного днища на ефективність роботи вібраційного об'ємного дозатора	48
РОЗДІЛ 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ОБ'ЄМНОГО ДОЗАТОРА	53
3.1 Методика планування та проведення експериментальних досліджень	53
3.2 Експериментальне дослідження впливу параметрів вібрації робочого органу дозатора та висоти шару дрібнодисперсного сипкого матеріалу на його ефективну в'язкість	58
РОЗДІЛ 4 МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ОБ'ЄМНИХ ДОЗАТОРІВ ДЛЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ СИПКИХ	64

МАТЕРІАЛІВ

4.1 Будова та принцип роботи вібраційного об'ємного дозатора
для дрібнодисперсних сипких матеріалів 64

ВИСНОВКИ 78

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 79

ВСТУП

Актуальність теми. Ринок пакувальної продукції на сьогоднішній день багатий на дрібнодисперсні сипкі матеріали (СМ). До них належать продукти із умовним діаметром частинок менше 50 мкм, а саме: борошно, цукор-пудра, крохмаль та ін. Дозування цих матеріалів створює чимало труднощів, пов'язаних із утворенням грудок, нестабільною насипною щільністю, налипанням на робочі поверхні, зависанням, нерівномірністю витікання продукту тощо.

Для формування дози СМ найчастіше використовують два типи дозаторів: ваговий та об'ємний. Через непрогнозовану поведінку дрібнодисперсних продуктів для їх дозування на сьогоднішній день, в основному, використовуються вагові дозатори. Однак об'ємні дозатори мають ряд вагомих переваг, а саме: висока продуктивність, простота конструкції та, відповідно, низька вартість. Оскільки проблеми, пов'язані із нестабільними фізико-механічними властивостями та непрогнозованою поведінкою продукту дозування, мають істотне значення для такого типу дозаторів, то основним напрямком розвитку об'ємних дозаторів для дрібнодисперсних СМ є забезпечення точності та ефективності процесу дозування шляхом реалізації безперервного та рівномірного витікання продукту.

Ефективним способом покращення текучості СМ є застосування вібрації, зокрема, доведення продукту до стану віброкипіння. Вібраційні дозатори у порівнянні з іншими мають ряд переваг: це, насамперед, відсутність пар тертя і додаткових механічних передач між двигуном та робочим органом, простота конструкції і висока надійність обладнання. Однак на сьогоднішній день недостатньо досліджено поведінку дрібнодисперсних СМ під дією вібрації. Тому підбір оптимальних режимів та параметрів вібраційних об'ємних дозаторів для дрібнодисперсних СМ є актуальним завданням, вирішення якого дозволить забезпечити рівномірність витікання продукту, високу точність та ефективність процесу дозування.

Створенням конструкції вібраційних дозаторів та дослідженням

витікання сипких матеріалів займались такі вчені, як Зенков Р. Л., Алфьоров К. В., Платонов П. М., Лук'янов П. І., Ловейкін В. С., Федоренко І. Я., Пирожков Д. Н., Повідайло В. О., Франчук В. П., Червоненко А. Г., Русанов С. А., Каталимов А. В., Тищенко Л. Н., Ольшанский В. П., Ольшанский С. В., Човнюк Ю. В., Банніков Д. О., Пальчевський Б. О., Комченко Е. В. та ін. Також цими завданнями займались закордонні вчені, зокрема німецькі, такі як: Г. Кахе, Ю. Томас.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення ефективності роботи вібраційних об'ємних дозаторів для дрібнодисперсних сипких матеріалів дослідженням його основних параметрів та режимів роботи.

Для досягнення поставленої мети були вирішені такі задачі:

- аналіз особливостей конструкцій вібраційних об'ємних дозаторів та моделей руху СМ у процесі дозування;
- встановлення аналітичних залежностей для визначення параметрів розвантажувальної лунки та режимів роботи вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ;
- дослідження ефективної в'язкості дрібнодисперсних СМ у процесі дозування, продуктивності та точності вібраційного об'ємного дозатора.

Об'єкт дослідження – процес вібраційного дозування дрібнодисперсних сипких матеріалів.

Предмет дослідження – параметри та режими роботи вібраційного дозатора для дрібнодисперсних сипких матеріалів.

Методи дослідження. Теоретичні розрахунки проводились на основі дослідження напруженого стану сипких матеріалів у склепінні; математичного моделювання процесу витікання продукту під дією вібрації з використанням методів гідродинаміки (закону Бернуллі, рівнянь Нав'є-Стокса), термодинаміки (наближення Буссінеска) та методів дослідження стійкості динамічних систем (критеріїв Ляпунова). Експериментальні дослідження проводились на основі класичних методів планування багатофакторного експерименту.

Результати аналітичних та експериментальних досліджень оброблено за допомогою пакетів програм MathCAD.

Наукова новизна отриманих результатів:

- розроблено математичні моделі руху дрібнодисперсних СМ із конічної розвантажувальної лунки дозатора при гравітаційному витіканні та вібраційному збуренні потоку;

- отримано аналітичні залежності для визначення параметрів розвантажувальної лунки та режимів роботи вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ;

– обґрунтовано параметри та встановлено оптимальні режими роботи вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ;

Практичне значення отриманих результатів. У результаті проведених досліджень встановлено оптимальні режими роботи вібраційного об'ємного дозатора та конструктивні особливості розвантажувальної лунки в залежності від властивостей продукту дозування, що дозволяє забезпечити рівномірне та неперервне витікання матеріалу і, тим самим, підвищити ефективність дозувального обладнання.

Структура і обсяг роботи. Магістерська робота складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел. Обсяг роботи складає 87 сторінок основного тексту, рисунки та таблиці.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ВИДІВ ВІБРАЦІЙНИХ ОБ'ЄМНИХ ДОЗАТОРІВ ДЛЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1. Аналіз особливостей конструкцій вібраційних об'ємних дозаторів для сипких матеріалів

Ринок України диктує певні умови, спричиняючи стрімкий розвиток промисловості та сільського господарства, в напрямку створення якісної продукції у надійній упаковці. У будівельній та харчовій галузі використовується різноманіття СМ, які відрізняються розмірами і формою частинок, фізико-механічними властивостями, походженням, призначенням та хімічним складом, що лягло в основу різноманітних класифікацій дозуючих матеріалів. Умовно усі СМ можна розділити на дві групи: ідеально сипкі, що не мають сил зчеплення між частинками матеріалу, і зв'язні, що характеризуються значними силами зчеплення [1]. Однак такий поділ є доволі умовним, оскільки одні і ті ж матеріали при різних умовах експлуатації можуть проявляти себе як ідеально сипкими, так і зв'язними. У процесі переробки більшість СМ, що використовуються у промисловості, переходять від одного стану в інший, що спричинено зміною їх фізико-механічних властивостей і показників текучості [2]. На сьогоднішній день існують класифікаційні таблиці СМ за гранульованим складом, об'ємною щільністю, сипучістю, здатністю до аерації і утворення стійких склепінь над випускним отвором [3].

При витіканні СМ з ємкості дуже важливо підтримувати стабільність їх фізико-механічних властивостей, щоб гарантувати забезпечення наперед заданих параметрів технологічного процесу. Це особливо актуально для дрібнодисперсних сипких продуктів, поведінка яких у процесі витікання часто носить випадковий і непрогнозований характер. Використання спеціальних пристроїв для покращення показників текучості таких СМ

потребує додаткових затрат, однак результат не завжди позитивний. Тому дослідженню поведінки дрібнодисперсних СМ присвячено ряд робіт [4, 5, 6, 7, 8].

У виробництві на сьогоднішній день, як правило, використовуються автоматичні дозатори, оскільки використання механічних дозаторів не зменшує частку ручної праці у технологічному процесі. В залежності від принципу роботи розрізняють два види автоматичних дозаторів: вагові і об'ємні. До усіх видів дозаторів ставляться загальні вимоги, а саме: висока точність дозування; наявність пристроїв, що вказують на величину дози та продуктивність; зручність обслуговування, герметичність та надійність роботи; відповідність конструкції основних вузлів особливостям технологічного процесу.

Однак поряд із тим вагові і об'ємні дозатори мають ряд відмінностей. Ваговий спосіб дозування характеризується вимірюванням величини дози матеріалу через безпосереднє зважування продукту. Дозатори такого виду мають три основні переваги: дозування широкої номенклатури продуктів; висока точність; широкий діапазон регулювання вимірювальної дози. Однак, незважаючи на ряд істотних переваг, вагові дозатори мають також і недоліки, серед яких одним із найважливіших є низька продуктивність роботи. Другим недоліком є висока ціна, що приблизно на 15% більша, ніж об'ємного дозатора аналогічної продуктивності [9].

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. Вага дози розрихленого продукту є мінімальною, однак при ущільненні матеріалу, викликаному додатковим навантаженням чи вібрацією, кількість продукту дозування, що вміщається у мірник, зростає.

На рис. 1.1 зображена типова конструктивна схема об'ємного дозатора [10], принцип роботи якого наступний: через отвір 3 із бункера 4 СМ потрапляє у пустотілий циліндр 1, що призначений для формування дози матеріалу. При повертанні циліндра 1 навколо осі 2 на 180° реалізовується

витікання сформованої дози продукту у приймальну ємкість 5.

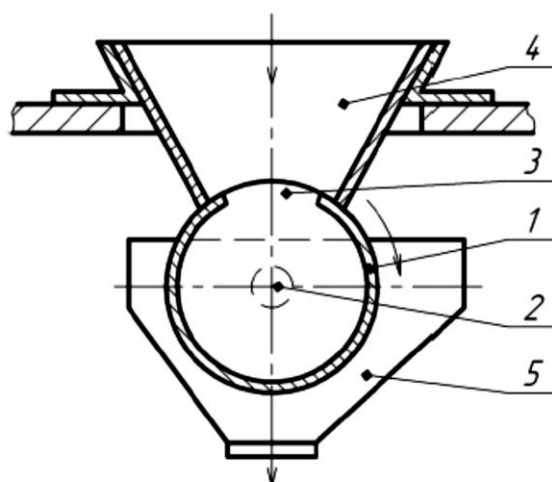


Рисунок 1.1. Конструктивна схема об'ємного дозатора

Об'ємні дозатори характеризуються рядом переваг, до яких належать: простота конструкції, висока продуктивність та низька ціна. Однак поряд із значними перевагами об'ємні дозатори мають недоліки. Одним із недоліків об'ємних дозаторів є малий діапазон регулювання об'єму дозуючого мірника. У більшості випадків конструкція об'ємного дозатора дозволяє регулювати дозу матеріалу лише у межах $\pm 30\%$. Також до недоліків об'ємних дозаторів належить низька точність дозування. У випадку невикористання додаткового пристосування, що інтенсифікує процес витікання СМ, виміряна доза продукту буде залежати від ступеня його ущільнення, який визначається вмістом вологи у продукті дозування, гранульованим складом, формою частинок та рядом інших факторів. Проблеми нерівномірного та непрогнозованого витікання особливо актуальні при дослідженні поведінки дрібнодисперсних СМ.

Значну увагу питанням об'ємного дозування СМ приділено у дослідженнях Б. О. Пальчевського та Д. В. Бондарчука [11, 12, 13, 14, 15]. У роботах [11, 12] встановлено вплив способу відсікання дози на точність об'ємних дозаторів. За результатами цих досліджень отримано два патенти на корисні моделі [13, 14]. У праці [15] запропоновано методи підвищення ефективності роботи об'ємного дозатора зв'язних кормових сумішей, однак

дані дослідження стосуються лише дозаторів барабанного типу.

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 продукту [16, 17, 18, 19]. Оскільки під дією механічних коливань щільність СМ може змінюватись у широкому діапазоні, тому для забезпечення високої продуктивності та точності дозування важливим є встановлення оптимальних параметрів вібрації, що дозволять стабілізувати фізико-механічні властивості продукту дозування.

Вібродія на СМ може бути реалізована за рахунок віброуючих днищ, додаткових перегородок, похилих лотків, а також за допомогою безпосередньо введених в робочу камеру віброзбудників. Це і спричинило виникнення великої кількості конструкцій вібраційних дозаторів. Зовнішні віброзбудники доцільно встановлювати тільки на бункерах невеликого об'єму [20]. Використання потужних віброзбудників, що вмонтовані в бункерах великої ємкості, спричиняють 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» продукту 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 типові види конструкцій вібраційних «беззаслінкових» дозаторів: з коливним робочим органом, що розміщений у розвантажувальній лунці (рис. 1.2, а), та з коливною розвантажувальною лункою (рис. 1.2, б).

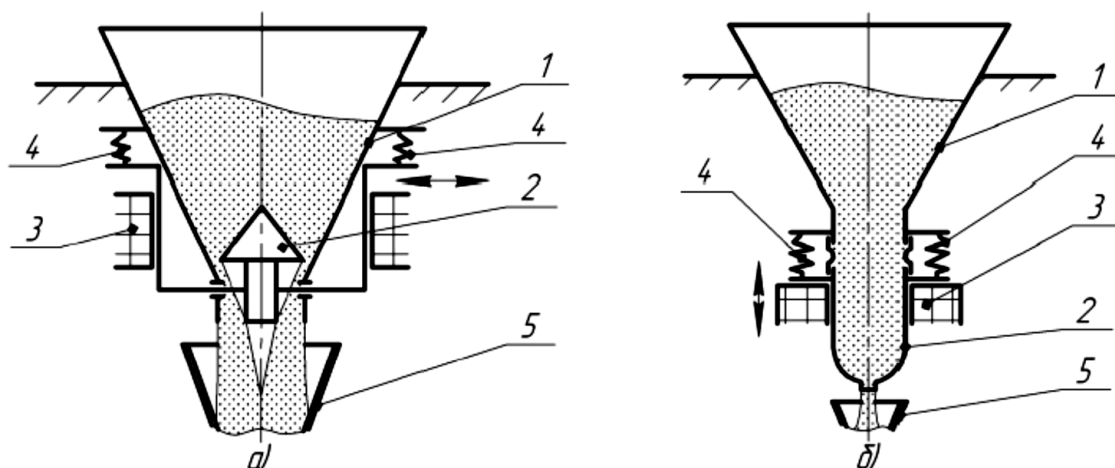


Рисунок 1.2. Вібраційні «беззаслінкові» дозатори: а) з конічним коливним днищем; б) з коливною розвантажувальною лункою

Дозатор (рис. 1.2, а) потребує віброзбудника невеликої потужності, оскільки достатньо навіть незначного зусилля для приведення у рух СМ, що знаходиться у безпосередньому контакті із коливним конічним днищем у розвантажувальній лунці. Коливне конічне днище виконує три основні завдання:

- створення додаткових сил, що призначені для руйнування потенційних стійких склепінь у дозуючому матеріалі;
- зменшення напруження у матеріалі в області випускного отвору;
- формування кільцевого випускного отвору.

Основними конструктивними елементами дозатора (рис. 1.2, а) є бункер 1, конічне днище 2, віброзбудник 3. Віброзбудник 3 збудує коливання конічного днища 2, яке стимулює витікання матеріалу у приймальну ємкість 5. Для забезпечення віброізоляції дозатора бункер 1 встановлений на пружні амортизатори 4.

Іншим поширеним у пакувальній промисловості різновидом вібраційних «беззаслінкових» дозаторів є дозатор з коливною лункою (рис. 1.2, б), який складається із бункера 1 і пружно підвішеної через систему амортизаторів 4 розвантажувальної лунки 2, що приводиться у рух віброзбудником 3. Під дією коливань робочого органу 2 СМ потрапляє

у приймальну ємкість 5. Недоліком даного вібраційного дозатора є те, що інтенсифікація потоку матеріалу реалізується лише у розвантажувальній лунці 2. Тому при збільшенні її розмірів виникає необхідність використовувати віброзбудник великої потужності, що призводить до погіршення віброізоляції окремих елементів дозатора.

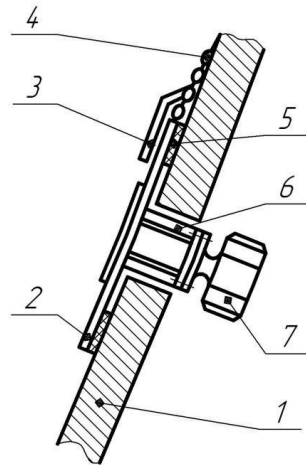


Рисунок 1.3. Конструктивна схема встановлення віброзбудника на «фальшивій стінці»

При дозуванні великої маси продукту ефективно використовувати вібраційний дозатор із віброзбудником, що вмонтований на «фальшивій стінці» розвантажувальної лунки (рис. 1.3) [23]. «Фальшива стінка» представляє собою плиту 2 товщиною 6-10 мм, що виготовлена із легованої сталі, яку монтують за допомогою пружних підвісок 4 (ланцюгів чи шарнірів) на внутрішній стороні стінки бункера 1 [23]. Між плитою і стінкою бункера розміщують гумові амортизатори 5. До плити 2, над якою встановлюють захисну пластину 3 для унеможливлення потрапляння під неї СМ, кріплять опорну стійку 6, що призначена для встановлення віброзбудника 7. Ефективність такого кріплення віброзбудника достатньо висока, оскільки коливання передаються через «фальшиву стінку» безпосередньо продукту дозування, а не стінці розвантажувальної лунки. Значною перевагою використання «фальшивої стінки» є можливість передачі СМ 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 [22].

Ще одним різновидом вібраційних «беззаслінкових» дозаторів є змішаний, у якому коливання здійснюють як днище, так і розвантажувальна лунка. У практиці проектування дозаторів є два типи такого змішаного виду «беззаслінкового» дозатора: перший реалізується з допомогою одного віброзбудника, другий – двох незалежних, що дозволяють встановлювати різні значення амплітуди, частоти і напрямку вібрації для днища і розвантажувальної лунки. У промисловості відомий вібраційний дозатор для СМ, у якому у якості коливного днища виступає кулька, яка завдяки коливанням конічної розвантажувальної лунки, що передаються на неї, забезпечує регулювання руху та подачу продукту дозування у приймальну ємність [25].

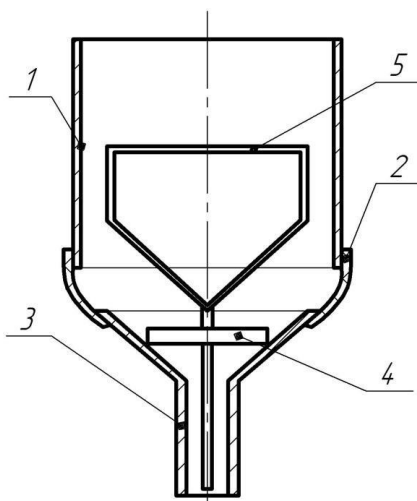


Рисунок 1.4. Вібраційний

«беззаслінковий» дозатор з коливним диском

Вібраційний «беззаслінковий» дозатор [26] (рис. 1.4), який складається із бункера 1, що з'єднаний гнучкою кільцевою втулкою 2 із розвантажувальною лункою 3. Остання приводиться у дію віброзбудником, що надає їй кругові коливання. В середині розвантажувальної лунки 3 розміщений диск 4, що встановлений на стержень, на кінці якого розміщена тонка жорстка рамка 5.

Диск 4 повертається навколо вертикальної осі завдяки коливанням розвантажувальної лунки 3 та при вдарянні до її стінок здійснює закривання та відкривання випускного отвору. Стабілізація потоку дрібнодисперсного СМ реалізується завдяки коливанням жорсткої рамки, що встановлена для розрихлення зв'язного продукту в бункері.

Вібраційні «беззаслінкові» дозатори також поділяються на безліч видів у залежності від форми та розмірів бункера. На рис. 1.5 зображені типові форми бункерів, які використовуються у промисловості [23]. Найбільш поширеними є конструкції бункерів, що складаються із двох частин: верхньої (циліндричної чи призматичної) та нижньої (конічної, клиновидної чи півсферичної) (рис. 1.5, а, б, в). У випадку дозування невеликої кількості СМ використовуються бункери без верхньої частини (рис. 1.5, г, д, е, ж, з).

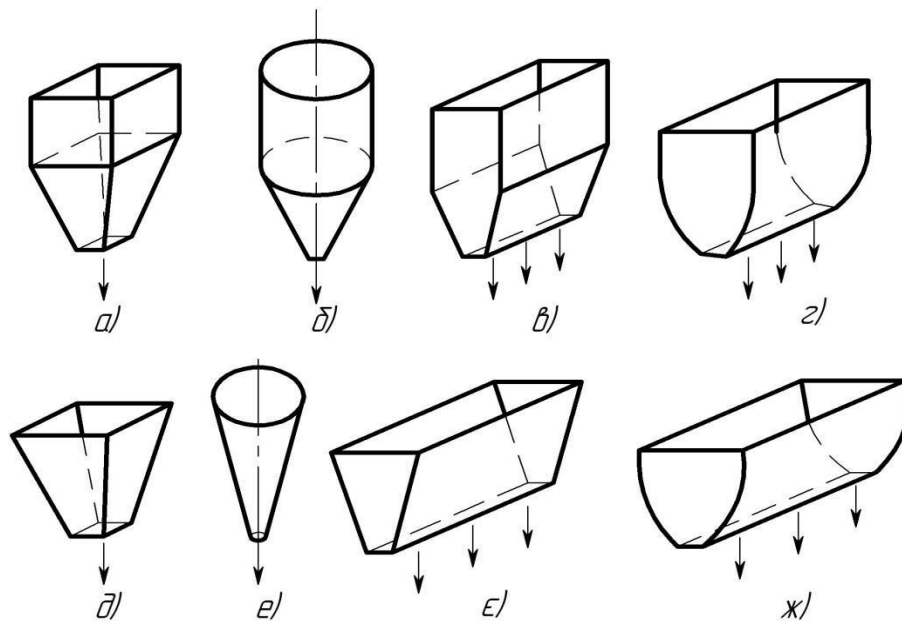


Рисунок 1.5. Типові конструкції бункерів

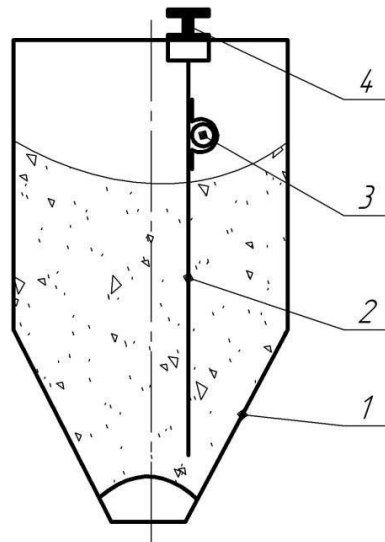


Рисунок 1.6. Конструктивна схема мембранного вібраційного «беззаслінкового» дозатора

Також до «беззаслінкових» вібраційних дозаторів належать дозатори із підвісними зворушувачами матеріалу, що призначені для інтенсифікації основного потоку матеріалу, а також унеможливлення утворення склепіння у бункері. Найпоширенішим різновидом дозаторів даного типу є мембранний вібраційний «беззаслінковий» дозатор (рис. 1.6) [23], що складається із опущеної всередину бункера 1 металевої пластини (зворушувача) 2, на верхній частині якої розміщений вібробудник 3. Конструкція зворушувача 2 кріпиться через амортизатори до двотаврової балки 4, що встановлена на стінках бункера 1. Амплітуда коливань нижнього кінця пластини 2 у декілька раз перевищує амплітуду коливань пластини у місці кріплення до двотавра, цим самим реалізуються максимальна інтенсифікація процесу витікання у зоні можливого зависання СМ [23]. У процесі витікання продукту вібробудник повинен працювати безперервно для того, щоб не чинити перешкод витіканню матеріалу. Однак істотним недоліком такого дозатора є те, що вібрації піддається лише частина СМ, що безпосередньо контактує із коливним робочим органом. Через це при використанні вібраційного зворушувача у бункері великого розміру неможливо забезпечити інтенсифікацію усього об'єму продукту дозування.

Один з різновидів вібраційних бункерних дозаторів, який представлений на рис. 1.7, складається із бункера 1 з конічним днищем 2, що призначене для

покращення руху СМ до позиції завантаження мірників. Під дією коливань конічного днища 2 продукт переміщується по його поверхні до периферії, де розміщений отвір для завантаження мірників 3 СМ. При співпадінні мірників 3 з розвантажувальною лункою 5 відбувається їх випорожнення. У промисловості використовують дозатори як з рухомими, так і нерухомими мірниками в залежності від умов технологічного процесу.

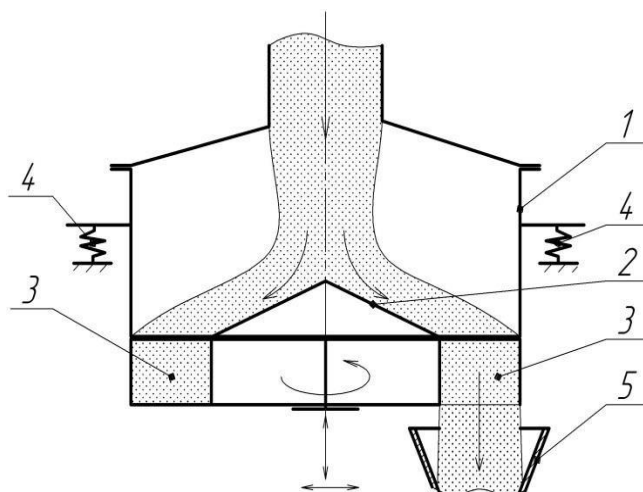


Рисунок 1.7. Вібраційний бункерний дозатор

Для покращення роботи дозатора для дрібнодисперсних СМ доцільно розділювати масу продукту на окремі потоки, оскільки накопичення великого об'єму СМ і значні сили зчеплення між частинками продукту спричиняють утворення заторів, які перешкоджають рівномірній подачі СМ на технологічну позицію формування дози. Вібраційні бункерні дозатори представлені у промисловості у вигляді різноманітних конструкцій [27, 28, 29].

Другим, не менш поширеним, видом вібраційних дозаторів є лоткові, що різняться великою кількістю модифікацій [30, 31, 32, 33, 34]. В залежності від властивостей СМ, що транспортуються, і вимог технологічного процесу лоткові дозатори бувають з робочими органами різного перерізу (прямокутного, овального, напівкруглого, круглого тощо; закриті або відкриті). Принцип роботи цих дозаторів базується на процесі вібраційного переміщення продукту по горизонтальній та похилій поверхнях лотка. Швидкість руху СМ регулюється зміною амплітуди та

частоти коливань робочого органу, кута вібрації, кута підйому робочої поверхні, коефіцієнта тертя спокою та ковзання між матеріалом та транспортуючою поверхнею.

Вібраційні лоткові дозатори проектують та виготовляють одномасовими, двомасовими, тримасовими, рідше із більшою кількістю мас. У промисловості найчастіше зустрічаються двомасові дозатори (рис. 1.8), оскільки їх конструкції забезпечують стабільність параметрів коливань та високу віброізоляцію обладнання [35]. Лоткові дозуючі пристрої поділяються на дозатори з направленими (рис. 1.8, а) та незалежними коливаннями (рис. 1.8, б) робочих органів. Вібраційний лотковий дозатор з напрямленими коливаннями (рис. 1.8, а) складаються з завантажувального бункера 1, реактивної маси 2, активної маси 3, пружних елементів 4, нахил яких визначає кут вібрації β , та електромагнітного віброзбудника 5 [35]. Із завантажувального бункера 1 СМ потрапляє на транспортну доріжку робочої маси 3, що реалізує напрямлені коливання завдяки віброзбуднику 5 та пружним елементам 4. Внаслідок вібротранспортування продукт переміщається по поверхні лотка 3 і потрапляє у приймальну ємкість 6.

Встановлення реактивної маси 2 на віброізолятори 7 унеможливорює передачу вібрації на основу. Даний тип дозаторів характеризується простотою конструкції та експлуатації, однак має недоліки – невисоку швидкість транспортування та відсутність незалежного регулювання складових амплітуди.

У двомасовому вібраційному лотковому дозаторі із незалежними коливаннями (рис. 1.8, б) горизонтальні коливання забезпечують два віброзбудники 5 та плоскі пружини 6, а вертикальні – віброзбудник 7 та плоскі пружини 4 [35]. Принцип роботи такого лоткового дозатора аналогічний до попереднього, однак істотною перевагою є можливість реалізації високих швидкостей транспортування СМ, а також реверсу продукту через існування окремих електромагнітів горизонтальних та вертикальних коливань.

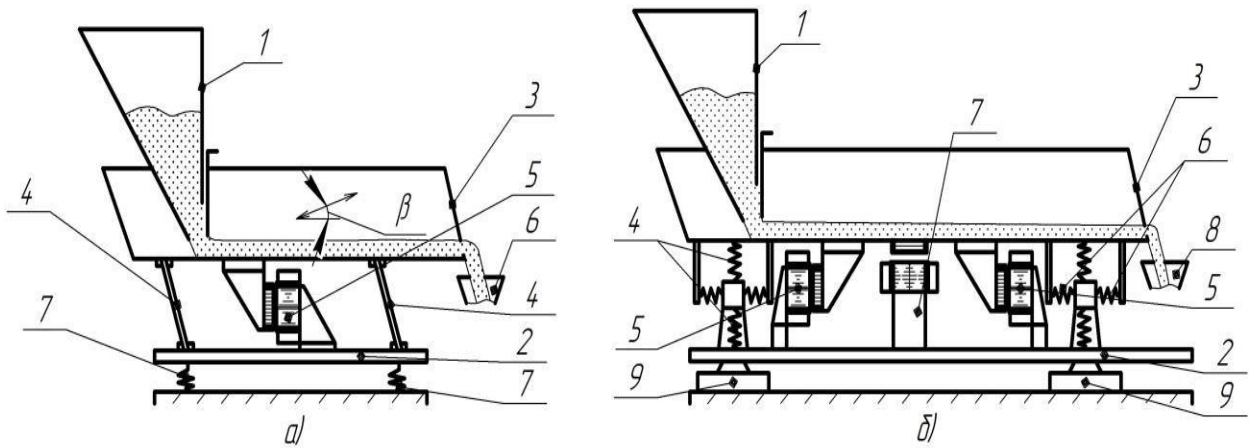


Рисунок 1.8. Конструктивні схеми двомасових вібраційних лоткових дозаторів: а) з напрямленими коливаннями; б) з незалежними коливаннями

Тримасові вібраційні лоткові дозатори використовуються з метою підвищення ефективності процесу дозування, однак їх істотним недоліком є складність конструкції і висока металоємкість.

Основними перевагами вібраційних лоткових дозаторів є: висока стійкість до зношування несучої поверхні, можливість виконання різноманітних технологічних операцій під час руху СМ (сушіння, перемішування, сепарація і ін.), простота конструкції, легке регулювання швидкості, простота обслуговування та експлуатації. Однак істотним недоліком вібротранспортування є неможливість переміщення великого шару дрібнодисперсних СМ та значний шум при роботі лотка.

Велике значення при проектуванні вібраційних дозаторів має правильний вибір віброприводу, що забезпечує коливання робочого органу із частотою меншою, рівною чи більшою за власну частоту коливань системи. Відповідно до цього, дозатор має можливість працювати у дорезонансному, резонансному і зарезонансному режимах.

Найчастіше у пакувальній галузі використовуються такі віброприводи: ексцентрикові, гідравлічні, дебалансні, електромагнітні та пневматичні. Загалом ексцентрикові та гідравлічні приводи використовуються у низькочастотних машинах, оскільки у такому випадку є можливість реалізувати високі амплітуди коливань робочого органу і велику вимушуючу силу [36]. Дебалансні віброзбудники найефективніше

використовувати у обладнанні, що експлуатується на частотах діапазону 12-25 Гц [36]. Для високочастотних вібротрибок, що працюють з невеликими амплітудами коливань робочого органу (0,5-3 мм), найефективнішим є використання електромагнітних вібротрибок [36], перевагою яких є відсутність вузлів тертя і підшипників, що характеризуються високими динамічними навантаженнями. Також до переваг електромагнітних вібротрибок належить мала тривалість перехідних процесів. Однак істотним недоліком таких вібротрибок є неможливість реалізації широкого діапазону зміни амплітуди, а також висока чутливість до коливань напруги мережі та навантаження. Пневматичні трибки, як і електромагнітні, найчастіше використовуються у високочастотному вібраційному обладнанні, а також у вибухонебезпечних технологічних процесах [36].

Отже, на основі проведеного аналізу існуючих конструкцій вібраційних об'ємних дозаторів для СМ можна зробити висновок, що дозатори для СМ з хорошою сипучістю не завжди придатні для дозування дрібнодисперсних СМ. Останні утворюють склепіння та затори, зависають на стінках ємкостей, збиваються в грудки, що ускладнює процес дозування та негативно позначається на точності та продуктивності роботи дозаторів. Тому на сьогоднішній день існує потреба в дослідженні процесу дозування дрібнодисперсних СМ та вдосконаленні конструкцій дозаторів з метою підвищення ефективності їх роботи.

1.2. Аналіз математичних моделей процесу витікання сипких матеріалів із ємкостей

Сипке середовище має властивості, з однієї сторони, твердих тіл (можливість чинити опір зовнішнім зусиллям) і, в той же час, з іншої сторони, властивості рідини (здатність текти або заповнювати наданий об'єм). Така особливість поведінки СМ призвела до існування величезної кількості гіпотез, підходів, досліджень та теорій, які створювались ще з давніших часів та продовжують з'являтися сьогодні. Проблема витікання СМ із ємкостей займалася з першої половини ХХ століття. Перша наукова

робота, присвячена аналізу руху сипких продуктів, опублікована у 1882 р. І. Робертсом [37].

Оскільки витікання СМ характеризується низкою проблем, вивчення яких актуальне і сьогодні, тому досі не існує єдиної гіпотези, що дозволяла б однозначно описати рух продукту дозування у процесі експлуатації. У ХХ столітті ряд вітчизняних науковців розробили кілька теорій поведінки сипкого продукту, що і сьогодні використовуються як основа для нових напрямків досліджень. Деякі дослідники, такі як: Платонов П. М., Покровський Г. І., Ареф'єв А. І., Лінчевський І. Т. запропонували гіпотезу саморозвантажувального склепіння [23], суть якої полягає у тому, що при витіканні СМ із ємкості над випускним отвором формується особлива нестійка структура – динамічне склепіння, яке руйнується миттєво. За цією теорією швидкість руху продукту залежить від висоти динамічного склепіння, що, у свою чергу, визначається геометрією випускного отвору. Прихильники даної гіпотези стверджували, що основним параметром, що впливає на характер поведінки СМ, є розмір випускного отвору [23].

Однак серед дослідників є багато таких, що спростовують теорію динамічного склепіння. Наприклад, Гячев Л. В. [38] стверджував, що жодні експерименти не підтверджують наявності динамічного склепіння. Такі дослідники, як Зенков Р. Л. [39, 40] і Алфьоров К. В. [41] висунули наукову теорію, яка полягає у тому, що поведінка СМ не залежить від розміру випускного отвору, а істотний вплив на неї має лише висота шару продукту у бункері.

Отже, як бачимо, розв'язання задач механіки сипкого середовища проводилось у різних напрямках, що зумовило існування безлічі гіпотез і, відповідно, методів прогнозування руху СМ та методик розрахунку дозуючого обладнання. Умовно можна виділити три основні напрямки, що використовуються на сьогоднішній день для дослідження поведінки сипкого продукту:

1. аналіз напруженого стану нерухомого шару СМ та визначення умов початку його руху;

2. дослідження кінематики і динаміки рухомого шару СМ із визначенням характерних зон руху, продуктивності і середньої швидкості витікання продукту;

3. дослідження пульсуючого режиму витікання СМ на основі поля напружень і деформацій продукту.

При аналізі напруженого стану нерухомого шару СМ досліджуються усі можливі варіанти зависання матеріалу у бункері, а також імовірні форми руху продукту при витіканні із ємкості (рис. 1.9). Багатьма дослідженнями встановлено, що в залежності від фізико-механічних властивостей СМ, а також геометричних розмірів бункера виникають різні форми руху продукту [42], що безпосередньо пов'язані із його напруженим станом. Аналіз напружень СМ дозволяє прогнозувати і досліджувати два можливі стани продукту дозування: активний і пасивний.

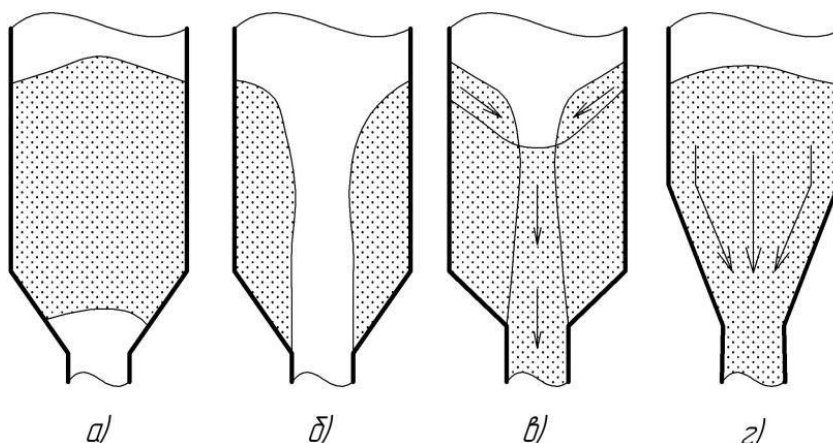


Рисунок 1.9. Варіанти зависання і руху сипкого матеріалу в бункерах:

а) – утворення склепіння; б) – трубоутворення; в) – несучільне витікання; г) – суцільне витікання

Численними дослідженнями [42, 43] встановлено, що умови руху матеріалу у конічній розвантажувальній лунці бункера є менш сприятливими, ніж у його циліндричній частині. При наповненні бункера СМ відбувається розподіл напружень (рис. 1.10, а), що відповідає активному напруженому стану продукту [24, 26].

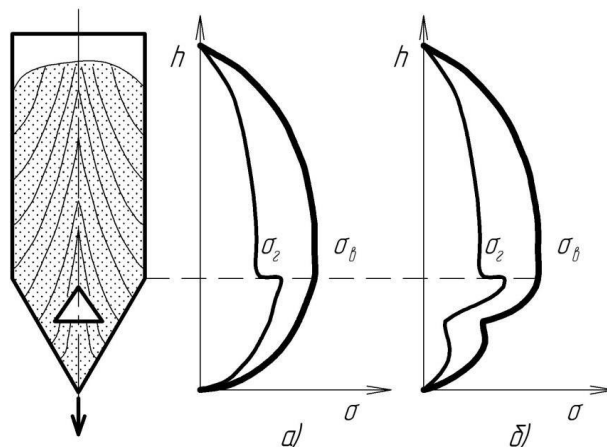


Рисунок 1.10. Розподіл напружень в активному напруженому стані СМ:
а) без дії вібрації; б) під дією вібрації

Він характеризується зростанням у циліндричній частині бункера горизонтальних і вертикальних напружень СМ, та їх зменшенням у конічній розвантажувальній лунці. Із наближенням до випускного отвору бункера значення напружень продукту дозування прямують до нуля. У випадку реалізації коливань конічним днищем (рис. 1.10, б) напруження СМ у розвантажувальній лунці різко зменшуються.

Характерною ознакою пасивного напруженого стану СМ є формування стійкого склепіння над випускним отвором, що особливо актуально для поведінки дрібнодисперсних продуктів. Типовий пасивний напружений стан зазвичай формується у конічній частині бункера через збіжність зон витікання та ущільнення матеріалу (рис. 1.11. б).

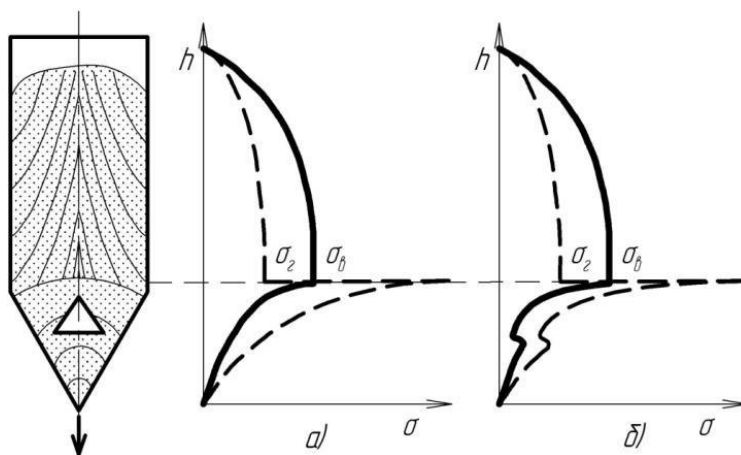


Рисунок 1.11. Розподіл напружень в пасивному напруженому стані СМ:
а) без дії вібрації; б) під дією вібрації

Пасивний напружений стан може траплятися також у будь-якій іншій частині бункера в залежності від особливостей його конструкції та форми руху матеріалу. Під дією вібрації (рис. 1.11, б) напруження СМ у конічній розвантажувальній лунці дозатора різко знижуються, аналогічно як і при активному напруженому стані.

Для адекватного аналізу поведінки СМ важливо дослідити можливі форми руху продукту у бункері. При завантаженні дозуючого матеріалу у бункер, до формування його усталеного руху, реалізовується вільне витікання СМ, що характеризується наявністю декількох зон, які відрізняються швидкостями руху потоку продукту [23]. Як результат такого руху СМ через деякий час над випускним отвором формується стійке склепіння, що перешкоджає подальшому витіканню продукту із бункера. Однак, важливо зазначити, що вільне витікання матеріалу реалізується лише у початковий момент часу – при завантаженні бункера.

Після формування усталеного руху дозуючого матеріалу у бункері виникає одна із двох типових форм витікання [23]: нормальна (рис. 1.12, а) або гідравлічна (рис. 1.12, б). Нормальна форма руху притаманна усім дрібнодисперсним СМ за умови відсутності додаткових впливів.

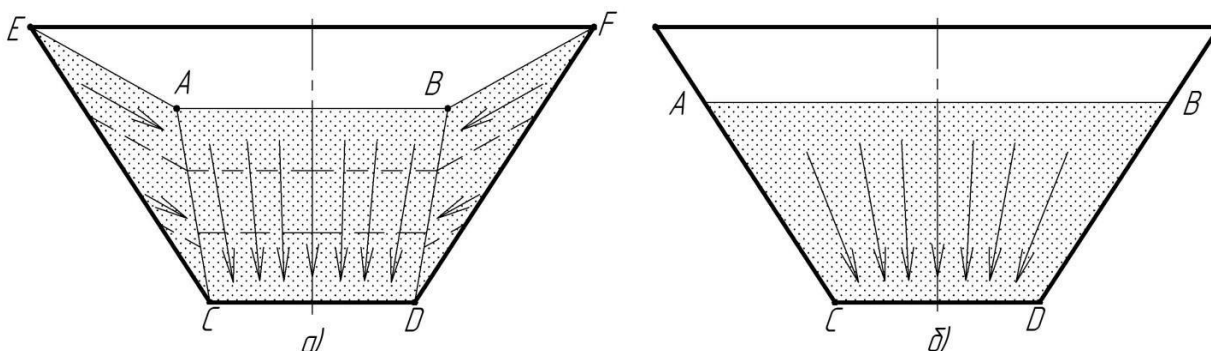


Рисунок 1.12. Типові форми руху сипкого матеріалу:

а) – нормальна; б) – гідравлічна

Типова схема нормальної форми руху СМ (рис. 1.12, а) складається із окремих областей, що відрізняються рухливістю частинок продукту. Із області ABCD, що характеризується найвищою швидкістю руху, СМ під дією гравітаційних сил рухається до випускного отвору. В свою чергу, продукт із областей EAC і BFD поступово переміщується до області ABCD. Найбільш

поширеними конструкціями бункерів, у яких виникає нормальна форма руху СМ, є бункери з нахиленими та вертикальними стінками.

Характерною ознакою гідравлічної форми руху СМ (рис. 1.12, б) є одночасне переміщення всього потоку продукту. Для реалізації такої форми руху необхідно підтримувати постійний рівень матеріалу у бункері та руйнувати зв'язки між частинками СМ, тим самим забезпечувати підвищену рухливість продукту.

Отже, напружений стан СМ залежить як від його фізико-механічних властивостей, так і конструкції бункера та умов технологічного процесу. Однак аналіз напруженого стану нерухомого шару СМ не дає можливості дослідити поведінку СМ під впливом динамічного навантаження.

Дослідженню впливу параметрів вібрації на напруження у бункері присвячено багато робіт зарубіжних вчених, зокрема праці Г. Кахе, Ю. Томаса, Т. Колльман [7, 42, 43]. Дані дослідження, в основному, ґрунтуються на емпіричних залежностях та не дозволяють аналітично визначити режими роботи вібраційного дозатора і геометрію лунки, що забезпечуватимуть рівномірний рух СМ. Розробки Д. Шульца [44, 45] присвячені дослідженню впливу коливань робочого органу дозатора на напруження СМ, а також аналізу причин нерівномірного витікання матеріалу із розвантажувальної лунки бункера. Однак у цих дослідженнях немає конкретних рекомендацій та методики розрахунку дозаторів для дрібнодисперсних СМ.

Другий тип моделей, який ґрунтується на визначені кінематичних і динамічних характеристик потоку СМ, дозволяє описувати рух продукту під дією вібрації. Усі моделі поведінки СМ під дією вібрації на сьогоднішній день умовно можна розділити на 3 групи [46]:

- моделі одиначної частинки;
- спеціальні моделі;
- моделі суцільного середовища.

Перша група моделей [21, 47, 48, 49, 50, 51, 52] ґрунтується на дослідженні поведінки однієї частинки матеріалу: розглядається її рух, після чого з певними припущеннями враховується, що весь продукт у бункері буде

поводитись аналогічно. Моделі одиничної частинки ефективно використовують для встановлення розміру випускного отвору бункера за умови дослідження продукту, що складається із частинок великого розміру [46]. Вагомим недоліком цих моделей є неврахування сил зчеплення між частинками матеріалу. Значний внесок у моделювання руху СМ із використанням моделей одиничної частинки зроблено Заїкою П. М. [49] та Василенком П. М. [53]. Фундаментальним дослідженням поведінки СМ на основі розроблення моделі одиничної частинки є монографія Блехмана І. І. і Джанелідзе Г. Ю. [53]. Також аналізу умов руху шару сипкого продукту по віброуючій поверхні посвячено ряд робіт Русанова С. А. та Луняки К. В. [54, 55, 56, 57].

Істотним недоліком математичних моделей даної групи є неврахування взаємодії між частинками середовища. Тому застосування моделей одиничної частинки виправдане лише у випадку, коли досліджується невеликий шар СМ, причому його товщина повинна не перевищувати 20-30- кратного середнього розміру частинок, що його утворюють [46]. Використання моделі одиничної частинки при дослідженні поведінки дрібнодисперсних СМ є неефективним, оскільки сипкий продукт під дією вібрації поводитьсь аналогічно рідині і рух однієї частинки значно відрізняється від поведінки усього потоку матеріалу.

Спеціальні моделі [58, 59, 60, 61, 62, 63] призначені для дослідження поведінки СМ у конкретних умовах, забезпечення яких можливе лише на тому виді обладнання, для якого вони розробляються. Використання моделей другої групи високоефективне, однак їх істотним недоліком є те, що при зміні технологічних умов чи обладнання спеціальні моделі неадекватно описують суть процесу дозування, оскільки в основу розробки цих моделей покладено взаємозв'язок складної системи «вібробудник – робочий орган – СМ».

Моделі третьої групи, що розглядають сипкий продукт як суцільне тіло (в'язку рідину чи ідеальний газ), використовують математичний апарат механіки суцільного середовища [64, 65, 66, 67]. Розв'язок цих задач зводиться до представлення процесу руху СМ у вигляді рівнянь

гідромеханіки [68, 69]. У наукових дослідженнях [70, 71], де вперше проведено аналогію між рухом в'язкої рідини і СМ, що знаходиться під дією вібрації, експериментально встановлено значення коефіцієнта кінематичної в'язкості сипкого продукту та використано цей показник для моделювання його руху. У роботі [8] досліджено, що дрібнодисперсний СМ під дією вібрації поводить як в'язка рідина. У статті Федоренка І. Я. та Пирожкова Д. Н. [72] встановлено критерії подібності гідродинамічних моделей віброкиплячого шару СМ.

Значний внесок у дослідження руху СМ як псевдорідини зроблено українськими дослідниками Тищенком Л. Н., Ольшанским В. П. та Ольшанским С. В. [68, 73, 74, 75]. Запропоновані ними наукові розробки дозволяють визначати швидкість переміщення частинок зернового матеріалу у процесі вібросепарації. Однак особливістю цих наукових пошуків є моделювання руху невеликого шару матеріалу, тому застосування цих розробок при проектуванні бункера чи дозатора, що містить значний об'єм матеріалу, є неможливим. У роботі [76] розглянуті питання, що пов'язані з теоретичними аспектами процесу віброкипіння СМ як двофазного середовища, наведені аналітичні залежності, що дозволяють більш повно проаналізувати поведінку дисперсних сипких продуктів в процесі віброкипіння та їх вплив на віброуючу поверхню. Однак дані дослідження не дають можливості підібрати оптимальні параметри дозуючого обладнання з метою підвищення точності об'ємних дозаторів.

Більшість теорій та найпоширеніші математичні моделі поведінки шару СМ під дією вібрації систематизовані у працях [77, 79]. Протодьяконов І. О. у своїх дослідженнях [77] зібрав математичні моделі руху СМ під дією вібрації розроблені вітчизняними і зарубіжними дослідниками, а також методи їх розв'язку. У свою чергу Членов В. А. та Михайлов Н. В. у праці [78] виклали теорію віброзрідження та віброкипіння СМ, а також методи експериментальної перевірки поведінки продукту під дією вібрації. Моделювання потоку СМ за допомогою моделі суцільного середовища успішно виконано у роботі [58]. Також ефективність моделей третьої групи

підтверджено дослідженнями російський вчених Федоренка І. Я. та Пирожкова Д. Н. [46, 79, 80].

Використання моделей суцільного середовища особливо ефективно при дослідженні поведінки дрібнодисперсних СМ, що знаходяться під дією вібрації, оскільки це дозволяє врахувати взаємодію частинок між собою, а також із середовищем, що їх оточує. Одним із способів дослідження руху дрібнодисперсних СМ під дією вібрації є використання системи рівнянь Нав'є-Стокса, що складається із двох рівнянь: рівняння руху і рівняння неперервності потоку.

Рівняння руху Нав'є-Стокса у векторній формі має вигляд [66]:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} = -(\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} + \nu \Delta \bar{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \bar{f}, \quad (1.1)$$

де V – векторне поле швидкостей; t – час; p – тиск; ∇ – оператор набла; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості матеріалу; Δ – векторний оператор Лапласа; \bar{f} – векторне поле сил, що діють на СМ під дією вібрації.

Рівняння неперервності Нав'є-Стокса записується у вигляді [66]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V}) = 0, \quad (1.2)$$

де ρ – насипна щільність СМ.

Ще одним типовим напрямком дослідження руху СМ, який зазвичай використовують у випадку високої імовірності виникнення зсувних деформацій у окремих областях продукту, є аналіз пульсуючого режиму витікання і його впливу на напруження та деформацію матеріалу.

Пульсуючий режим витікання СМ характерний при вільному витіканні матеріалу та нормальній формі руху продукту. Однак використання моделей цієї групи недоцільне у випадку дослідження поведінки продукту під дією вібрації, оскільки механічні коливання призводять до переходу від нормальної форми руху потоку матеріалу до гідравлічної, у якій весь потік сипкого продукту переміщується одночасно – аналогічно в'язкій рідині.

Тому, аналізуючи усі групи моделей, що дозволяють описувати рух сипкого продукту, можна зробити висновок, що, зважаючи на варіативність

фізико-механічних властивостей дрібнодисперсного СМ та здатність до текучості під дією вібрації, найефективнішим способом дослідження поведінки продукту є розробка математичної моделі його руху, в основі якої лежить модель суцільного середовища.

1.3. Вплив параметрів вібрації на поведінку сипких матеріалів

У пакувальній галузі для покращення показників текучості СМ ефективно і економічно доцільно використовувати дію вібрації. Конструкція вібраційних дозаторів проста і надійна, відрізняється невеликими габаритами і відсутністю обертових частин. У більшості випадків вібраційні пристрої мають малу інерційність і їх можна використовувати для дозування дрібнодисперсних СМ. Використання впливу вібрації на сипкі продукти реалізується у різних цілях:

- для розрихлення матеріалу;
- для зміни форми витікання матеріалу;
- для зміни фізико-механічних властивостей матеріалу.

Однак введення вібрації у СМ може привести і до негативних наслідків ущільнення продукту. Небезпека ущільнення зменшується при збільшенні амплітуди коливань і зменшенні частоти вібрації [7]. При цьому необхідно враховувати, що саме вертикальні коливання інтенсифікують процеси руйнування склепінь. Для ефективної роботи віброзбудника велике значення має його правильне розташування з урахуванням того, що дія вібрації повинна поширюватись на ділянку потенційного утворення склепіння. Місце встановлення вібраційного збудника найчастіше визначають дослідним шляхом.

На варіювання фізико-механічних властивостей СМ, що безпосередньо позначається на показниках текучості продукту, впливають наступні параметри вібрації:

- частота коливань;
- амплітуда коливань;

- напрям коливань;
- режим роботи дозатора.

В залежності від тривалості впливу вібрації на матеріал розрізняють такі режими роботи вібраційних дозаторів [7]:

- безперервна робота, що застосовується у випадку, коли мінімальний розмір випускного отвору розвантажувальної лунки дозатора, що дозволяє уникнути утворення склепіння, більший, ніж його дійсний випускний отвір;
- періодичний режим роботи, що може бути використаний, коли дія вібрації необхідна для інтенсифікації процесу витікання матеріалу;
- короткочасний пульсуючий режим роботи, який доцільно використовувати після тривалого зберігання або простою продукту.

Вибір параметрів вібрації значною мірою залежить від вимог технологічного процесу, а також фізико-механічних властивостей СМ. У залежності від необхідної частоти коливань робочого органу можна виділити три типові режими експлуатації вібраційних дозаторів [7]:

- низькочастотний рух стінки бункера;
- високочастотне збудження з резонансним підсиленням;
- імпульсне биття.

Низькочастотні рухи робочого органу дозатора (25-30 Гц) використовуються зазвичай для руйнування склепіння. Їхній недолік – висока імовірність виникнення втомних тріщин у стінках бункера [82]. При більш високих частотах (≥ 100 Гц) ризик виникнення втомних тріщин у стінках бункера зменшується, однак часто зустрічаються випадки ущільнення матеріалу [82].

Основним фактором, що визначає поведінку СМ під дією вібрації є продукту одна від одної, то вона практично не вплине на текучість матеріалу. Найбільше ущільнення досягається при амплітудних прискореннях коливань, близьких до прискорень вільного падіння. Тому дуже важливо для кожного СМ встановлювати амплітуду і частоту коливань, що відповідає порогу інтенсивності вібрації, вище якого відбувається порушення зв'язку між частинками сипкого середовища та їх циркуляція. Стан безперервної

циркуляції СМ прийнято називати віброкипінням [78]. Він характеризується розпушенням сипкого продукту, рівномірним та безперервним його витіканням. У дослідження Владімірова С. В. встановлено режими вібрації, що необхідні для виникнення віброкипіння у зерновому матеріалі. Однак дані дослідження обмежуються лише розглядом шару зернистого матеріалу товщиною до 15 мм. У роботі [54] узагальнені умови, при яких розпочинається та триває процес віброкипіння СМ у бункері, з метою максимального зменшення імовірності зависання чи утворення склепіння над випускним отвором розвантажувальної лунки. Проте дані дослідження також стосуються лише грубодисперсних СМ, які характеризуються відсутністю або незначними силами зчеплення між частинками.

У деяких випадках для реалізації віброкипіння необхідно додатково застосовувати продув сипкого середовища повітрям або газом. Для дрібнодисперсних СМ, схильних до злежування, комбіноване використання вібрації та продування газом дозволяє встановлювати з достатнім ступенем надійності необхідну структуру віброкиплячого шару продукту [51]. Однак використання газового потоку призводить до значного запилення приміщення та зростання вартості обладнання, тому використання такого методу для дозування дрібнодисперсних СМ не набуло значного поширення.

Стан віброкипіння супроводжується складними циркуляційними процесами у дисперсних середовищах. Характер цих рухів залежить від багатьох факторів, серед яких основними є режими вібрації та конфігурація бункера. Типові циркуляційні контури, що виникають у СМ під дією прямолінійних коливань робочого органу використовуються багатьма дослідниками при розробленні математичних моделей руху продукту під дією вібрації.

При дослідженні поведінки СМ у бункері, що здійснює горизонтальні коливання, встановлено, що при збільшенні інтенсивності вібрації у робочій камері починають формуватися певної геометрії циркуляційні потоки продукту (рис. 1.13) [16]. У односекційній робочій камері (рис. 1.13, а) СМ біля стінок починає рухатись вниз, а у центральній частині, навпаки,

підніматись вгору, при цьому вільна поверхня продукту набуває опуклої форми [16]. На дні робочої камери, зазвичай, формуються застійні зони, у яких швидкість частинок різко зменшується. Роль застійних зон полягає у організації потоку СМ та інтенсифікації процесів циркуляції [16]. Циркуляційні контури продукту проходять на деякій відстані від стінок робочої камери внаслідок сили зчеплення між ними і частинками матеріалу.

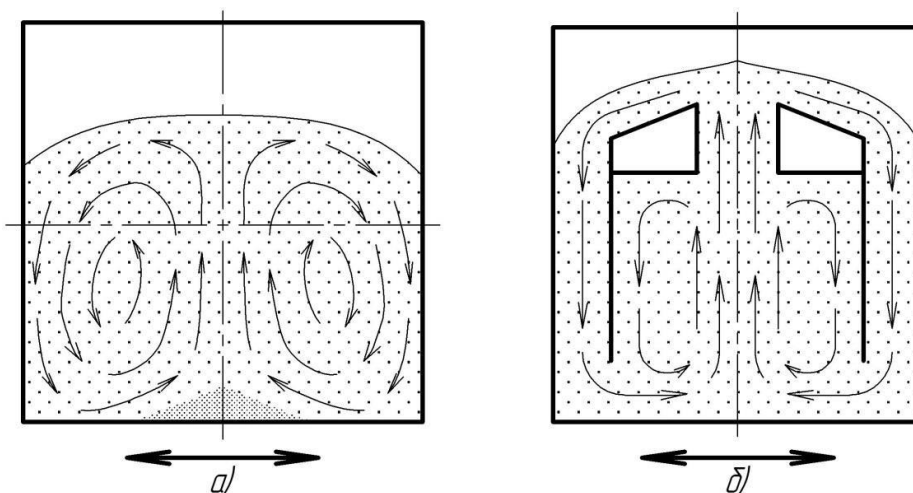


Рисунок 1.13. Циркуляційних рух СМ у бункері постійного перерізу при горизонтальних коливаннях: а) односекційна камера, б) трьохсекційна камера

Використання багатосекційних бункерів дозволяє змінювати конфігурацію циркуляційних контурів СМ. Наприклад, у трьохсекційному вібраційному бункері (рис. 1.13, б) у центральній широкій камері формується звичайна двоконтурна циркуляція продукту, в той час як у бічних камерах формується нисхідний потік матеріалу, що проходить нижче центральних контурів [16]. Отже, як показують дослідження, горизонтальні коливання бункера формують нисхідні потоки матеріалу біля стінок бункера, та висхідні у його центральній частині.

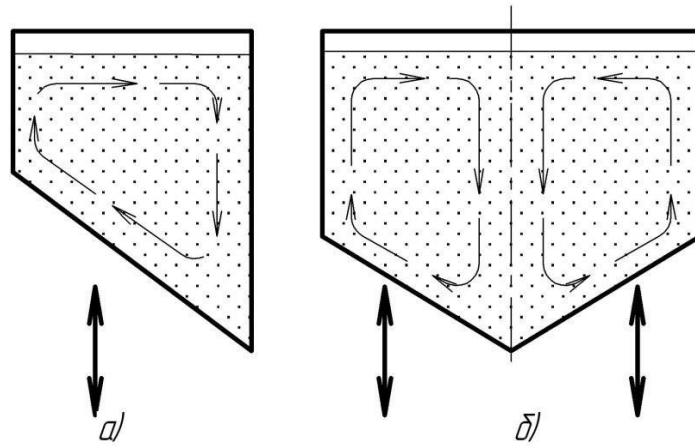


Рисунок 1.14. Циркуляційних рух СМ у бункері змінного перерізу при вертикальних коливаннях: а) асиметрична клиновидна лунка; б) симетрична клиновидна лунка

Істотно інший характер мають циркуляційні контури СМ при дії вертикальних коливань. Якщо надати вертикальні коливання бункеру із асиметричною клиновидною лункою (рис. 1.14, а) [16], то у ній встановиться одноконтурна циркуляція, що характеризується нисхідним потоком продукту вздовж довшої стінки і висхідним вздовж нахиленої – коротшої. Такий характер циркуляційного контуру матеріалу пояснюється тим, що вертикальні коливання нахиленої стінки перетворюються у напрямлені під кутом коливання середовища [16]. При дослідженні поведінки СМ під дією вертикальних коливань у бункері із симетричною клиновидною лункою (рис. 1.14, б) встановлено, що формуються два циркуляційні контури продукту: у центрі камери – нисхідні потоки, а біля стінок ємкості – висхідні [16].

Особливий характер мають циркуляційні контури СМ, сформовані у ємкості під дією напрямлених під кутом коливань (рис. 15) [16]. При куті вібрації близькому до 20° (рис. 1.15, а) у ємкості формується один циркуляційний контур матеріалу, що характеризується підйомом вільної поверхні продукту у напрямку дії вібрації. Також у масі СМ відбувається формування застійної зони у середині бункера, яка змінює свою форму і розміщення із збільшенням кута вібрації (рис. 1.15, а, б) [16]. Якщо робочу камеру розділити вертикальною стінкою на дві частини (рис. 16, в), то циркуляційний рух продукту забезпечить підйом СМ у секції меншого об'єму

[16].

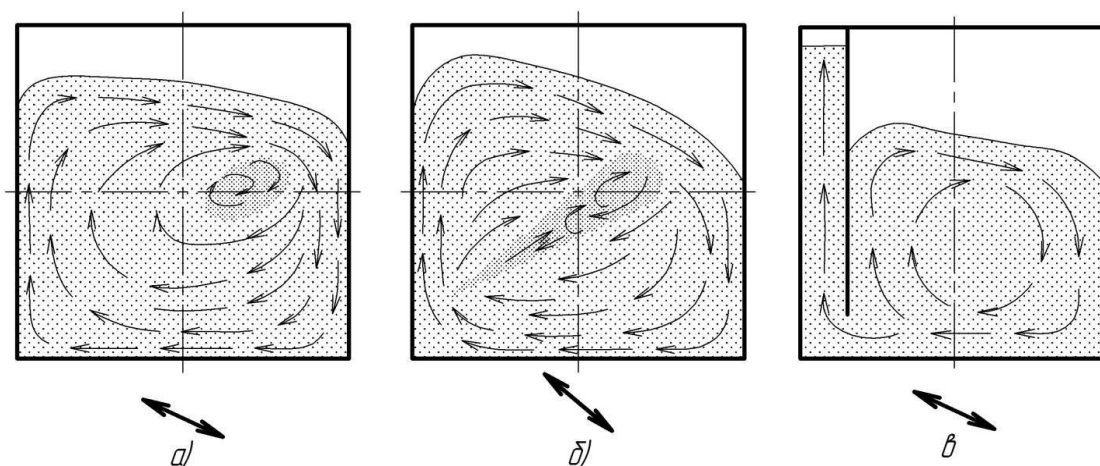


Рисунок 1.15. Циркуляційних рух СМ у бункері постійного перерізу при направлених коливаннях: а) кут вібрації 25° (односекційний бункер), б) кут вібрації 40° (односекційний бункер), в) кут вібрації 25° (двохсекційний бункер)

Отже, аналіз літературних джерел показав, що фізико-механічні властивості та поведінка дрібнодисперсних СМ значною мірою залежать як від умов навколишнього середовища, так і особливостей процесу дозування.

Проведений огляд існуючих видів вібраційних дозаторів дозволяє стверджувати, що під впливом коливань робочого органу дрібнодисперсний СМ може змінювати свої фізико-механічні властивості, текучість, реалізовувати рух у потрібному напрямі, а також здійснювати безперервну циркуляцію у бункері. Особливості поведінки продукту дозування під дією вібрації значною мірою залежать від геометрії розвантажувальної лунки бункера. Тому на сьогоднішній день актуальним залишається дослідження впливу параметрів вібрації та геометрії розвантажувальної лунки бункера на витікання дрібнодисперсних СМ з метою підвищення ефективності роботи об'ємних дозаторів.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИТІКАННЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ РОЗВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЛУНКИ ДОЗАТОРА

2.1. Обґрунтування геометричних параметрів розвантажувальної лунки дозатора при гравітаційному витіканні дрібнодисперсних СМ

Зважаючи на варіативність фізико-механічних властивостей дрібнодисперсних СМ у процесі дозування, важливим етапом проектування об'ємних дозаторів є дослідження їх впливу, а також конструктивних параметрів розвантажувальної лунки (розміру випускного отвору, кута нахилу стінок тощо) на поведінку продукту при витіканні з ємкостей [55]. Хаотичний і непрогнозований рух дрібнодисперсних СМ у дозаторі, а інколи і повна його відсутність, створюють неабиякі труднощі у процесі дозуванні [53]. Крім цього значні сили зчеплення призводять до налипання продукту на стінках бункера і розвантажувальної лунки, що негативно позначається на їх корисному об'ємі.

Важливим конструктивним параметром, що впливає на точність і продуктивність об'ємних дозаторів для дрібнодисперсних СМ, є розмір та форма розвантажувальної лунки. Тому важливим етапом проектування об'ємного дозатора для дрібнодисперсних сипких продуктів є дослідження впливу фізико-механічних властивостей СМ на геометричні параметри розвантажувальної лунки, а також взаємозв'язку між ними.

На практиці найчастіше використовують такі дві форми розвантажувальної лунки: конічна (рис. 2.1, а) і клиновидна (рис. 2.1, б, в) з випускним отвором прямокутного перерізу та із співвідношенням його розвантажувальних лунок: симетрична (рис. 2.1, б) та асиметрична (рис. 2.1, в). Частковим варіантом асиметричної клиновидної лунки є нижня частина

конічної лунки із конічним днищем в області випускного отвору.

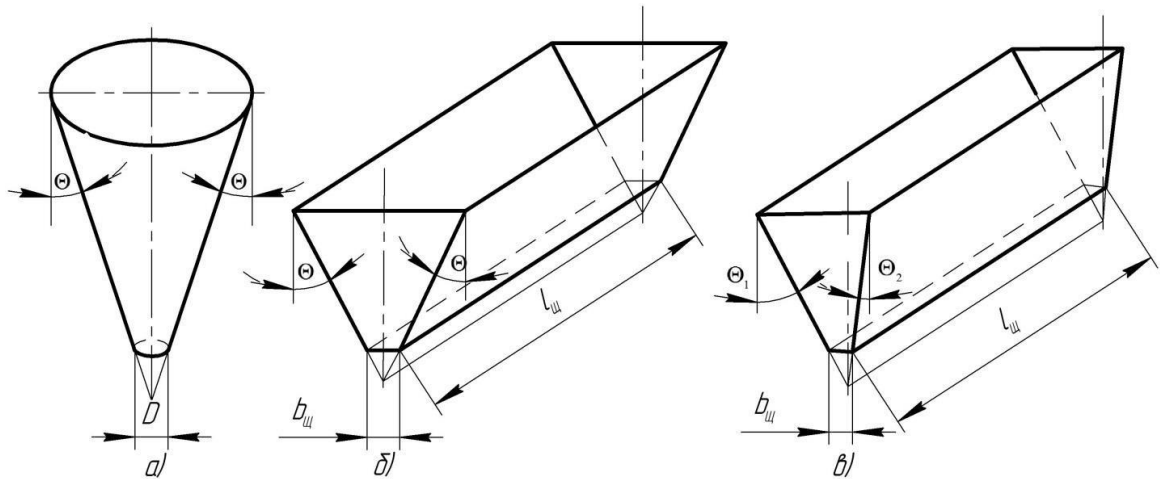


Рисунок 2.1. Типові форми розвантажувальних лунок дозатора: а) конічна; б) симетрична клиновидна; в) асиметрична клиновидна

З метою визначення геометричних параметрів розвантажувальної лунки дозатора розроблено математичну модель, що ґрунтується на аналізі поведінки СМ при його гравітаційному витіканні із ємкості, тобто при відсутності дії вібрації. Для моделювання гравітаційного витікання СМ із розвантажувальної лунки дозатора використано припущення:

- елементарний об'єм продукту, який розглядається при моделюванні, повинен бути значно більшим від розміру частинок, що його утворюють (лінійні розміри елементарного об'єму продукту мають бути щонайменше в 25 разів більші ніж розмір частинки СМ);
- взаємодія частинок продукту вважається абсолютно пружною (нехтується будь-яка деформація чи стирання останніх);
- між частинками матеріалу діє сила аутогезії, що характеризує зчеплення продукту.

Розроблення моделі поведінки дрібнодисперсного СМ у розвантажувальній лунці дозатора ґрунтується на дослідженні силових факторів, що призводять до формування стійкого склепіння над випускним отвором. На продукт, що знаходиться в елементарному об'ємі склепіння, діють відповідні прирости сил, значення яких визначаються формою та

розмірами розвантажувальної лунки [49]. Спочатку розглянуто гравітаційне витікання дрібнодисперсного СМ із конічної розвантажувальної лунки дозатора (рис. 2.2).

Використавши один із методів дослідження поведінки СМ, а саме аналіз напруженого стану нерухомого шару продукту, складено рівняння рівноваги сил, що діють на елементарний об'єм склепіння [2]. Для конічної розвантажувальної лунки дозатора (рис. 2.2) у проекції на вертикальну вісь воно має вигляд:

$$dF_{aym} + dF_c = dG, \quad (2.1)$$

де dF_{aym} – приріст сили аутогезії; dF_c – приріст сили протидії витікання; dG – приріст сили тяжіння.

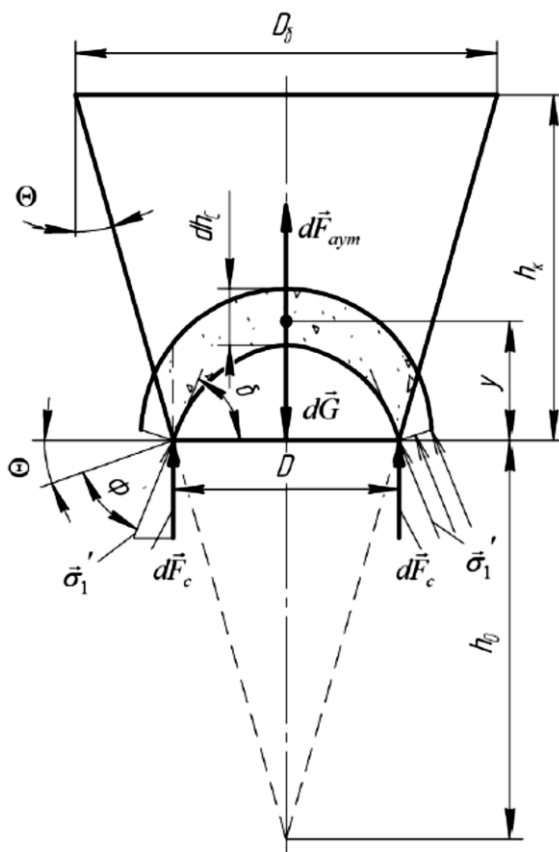


Рис. 2.2. Схема дії сил, що діють на елементарний об'єм склепіння, при гравітаційному витікання дрібнодисперсного СМ із конічної розвантажувальної лунки дозатора

Для моделювання поведінки СМ у конічній розвантажувальній лунці дозатора досліджено усі силові фактори, що діють на виділений елементарний об'єм склепіння висотою (рис. 2.2). Рушійним фактором вільного гравітаційного витікання є сила тяжіння, оскільки саме вона при відсутності додаткових збурень стимулює витікання продукту через випускний отвір. Приріст сили тяжіння визначено за залежністю [2]:

$$dG = \rho_0 \cdot g \cdot dh_c \cdot S_z, \quad (2.2)$$

де ρ_0 – насипна щільність дрібнодисперсного СМ; g – пришвидшення земного тяжіння; S_z – площа горизонтального перерізу елементарного об'єму склепіння у конічній розвантажувальній лунці дозатора.

Площу горизонтального перерізу елементарного об'єму склепіння у конічній розвантажувальній лунці дозатора (рис. 2.2) наближено визначено за залежністю:

$$S_z = \pi \cdot \frac{D^2}{4}, \quad (2.3)$$

де – D діаметр випускного отвору розвантажувальної лунки дозатора. D

Тоді рівняння (2.2) з урахуванням залежності (2.3) набуде вигляду:

$$dG = \frac{\rho_0 \cdot g \cdot dh_c \cdot \pi \cdot D^2}{4}. \quad (2.4)$$

Наявність вологи у дрібнодисперсному СМ впливає на його насипну щільність [17]:

$$\rho_0 = \frac{\rho_c \cdot (1 + W_{abs})}{1 + \frac{W_{abs} \cdot \rho_m}{3 \cdot \rho_p}}, \quad (2.5)$$

де ρ_c – насипна щільність сухого СМ; ρ_m – густина частинок СМ; ρ_p – густина води; W_{abs} – абсолютна вологість.

Істотне значення при витіканні дрібнодисперсного СМ з ємкостей має сила аутогезії, тобто зчеплення між частинками продукту [17]. Для забезпечення нормальної роботи дозатора ступінь ущільнення продукту не повинен перевищувати критичну величину. Зчеплення між частинками СМ,

що знаходиться в бункері, залежать від його розмірів і конфігурації, а також властивостей продукту дозування [4].

Приріст сили аутогезії визначено за залежністю [4]:

$$dF_{\text{аум}} = \frac{dF_{\tau_0}}{f}, \quad (2.6)$$

де $dF_{\tau_0} = \tau_0 \cdot S_{\epsilon}$ – приріст сили відриву; τ_0 – початковий опір зсуву СМ під дією дотичного навантаження; S_{ϵ} – площа вертикального перерізу елементарного об'єму склепіння; f – коефіцієнт внутрішнього тертя СМ.

Площу вертикального перерізу елементарного об'єму склепіння у конічній розвантажувальній лунці дозатора (рис. 2.2) визначено за залежністю:

$$S_{\epsilon} = dh_C \cdot l_{\text{ск}}, \quad (2.7)$$

Підставивши вираз (2.7) у рівняння (2.6) отримано значення приросту сили аутогезії для конічної розвантажувальної лунки дозатора:

$$dF_{\text{аум}} = \frac{\tau_0 \cdot dh_C \cdot \delta \cdot D}{f \cdot \sin(\delta)}. \quad (2.8)$$

Значний опір переміщенню частинок продукту у розвантажувальній лунці дозатора чинить сила протидії витікання, приріст якої визначено за формулою [7]:

$$dF_C = \sigma_1' \cdot \sin(\delta) \cdot dh_C \cdot \cos(\delta) \cdot P, \quad (2.9)$$

де σ_1 – напруження вільного витікання; P – периметр випускного отвору розвантажувальної лунки дозатора.

Для конічної розвантажувальної лунки з урахуванням приросту сили протидії витікання (2.9) знайдено за формулою: $P = \pi \cdot D$

$$dF_C = \sigma_1' \cdot \sin(\delta) \cdot dh_C \cdot \cos(\delta) \cdot \pi \cdot D. \quad (2.10)$$

Використавши вирази для визначення усіх приростів сил (2.4), (2.8), (2.10), що діють на елементарний об'єм склепіння у конічній розвантажувальній лунці дозатора, та підставивши їх у рівняння рівноваги

сил (2.1) отримано:

$$\frac{\tau_0 \cdot dh_C \cdot \delta \cdot D}{f \cdot \sin(\delta)} + \sigma_1' \cdot \sin(\delta) \cdot dh_C \cdot \cos(\delta) \cdot \pi \cdot D = \frac{\rho_0 \cdot g \cdot dh_C \cdot \pi \cdot D^2}{4}. \quad (2.11)$$

Із рівняння рівноваги сил (2.11) визначено граничний максимальний діаметр випускного отвору конічної розвантажувальної лунки дозатора, при якому реалізовується ефект «самозапирання» потоку продукту при відсутності дії вібрації:

$$D = \frac{4 \cdot (\tau_0 \cdot \delta + 0,5 \cdot \sigma_1' \cdot \sin(2\delta) \cdot \sin(\delta) \cdot \pi \cdot f)}{f \cdot \sin(\delta) \cdot \rho_0 \cdot g \cdot \pi}. \quad (2.12)$$

Аналогічно досліджено поведінку дрібнодисперсного СМ при гравітаційному витіканні із конічної розвантажувальної лунки із кільцевим випускним отвором, що утворений стінками лунки та конічним днищем (рис. 2.3) та визначено ширину кільцевого випускного отвору. Для моделювання використано рівняння рівноваги сил, що діють на СМ у елементарному об'ємі склепіння (рис. 2.3), у проекціях на вертикальну вісь:

$$dF_{aym} + dF_{C1} + dF_{C2} = dG. \quad (2.13)$$

Для встановлення приросту сили тяжіння за формулою (2.2) визначено наближене значення площі горизонтального перерізу елементарного об'єму склепіння (рис. 2.3):

$$S_e = b_o \cdot l_o, \quad (2.14)$$

$$dG = \rho_0 \cdot g \cdot dh_C \cdot b_o \cdot l_o. \quad (2.15)$$

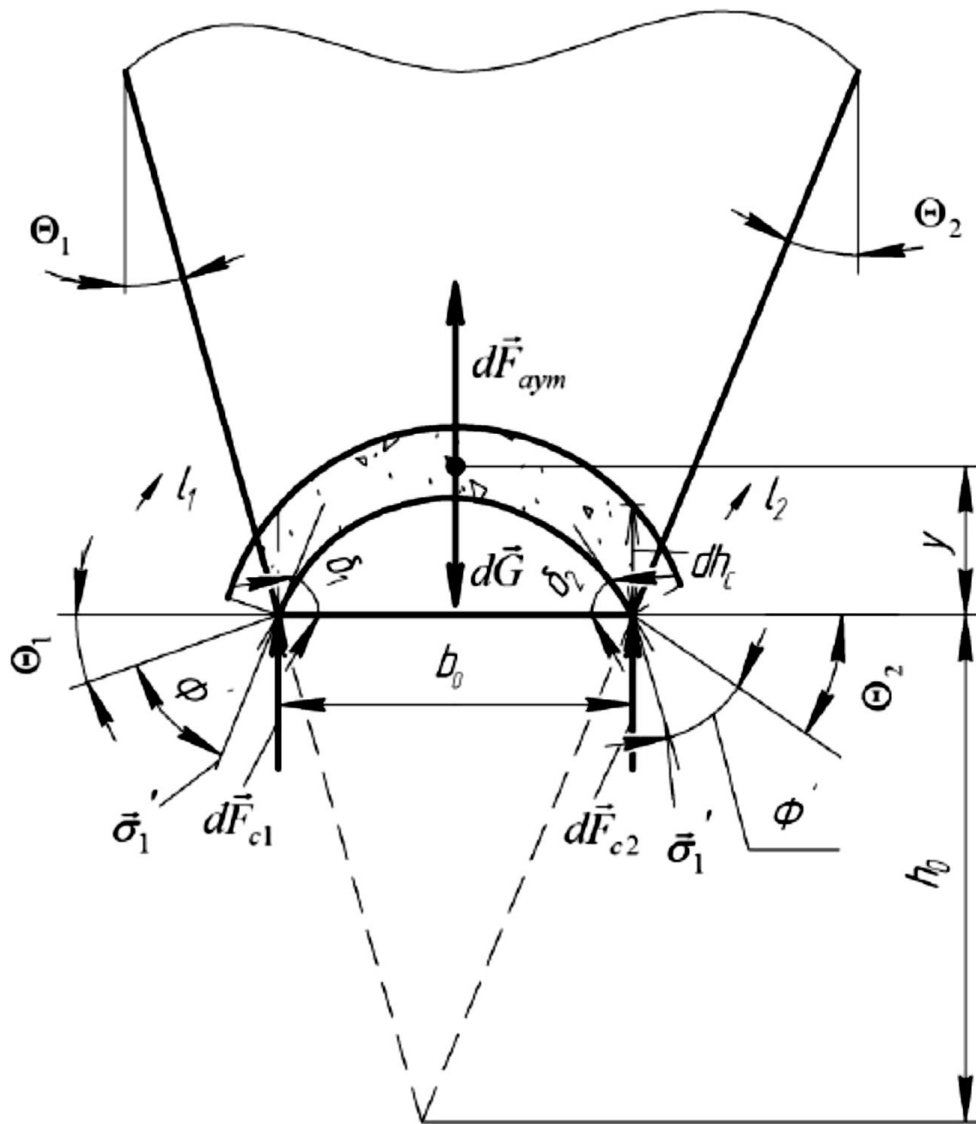


Рисунок 2.3. Схема дії сил, що діють на елементарний об'єм склепіння, при гравітаційному витіканні дрібнодисперсного СМ із конічної розвантажувальної лунки дозатора із кільцевим випускним отвором

Площа вертикального перерізу елементарного об'єму склепіння вздовж сторін l_1 , l_2 випускного отвору у розвантажувальній лунці дозатора (рис. 2.3) визначена за формулою:

$$S_e = dh_c \cdot l_o. \quad (2.16)$$

Використавши формули (2.6) та (2.16) приріст сили аутогезії для такого різновиду розвантажувальних лунок дозатора рівний:

$$dF_{aym} = \frac{\tau_0 \cdot dh_c \cdot l_o}{f}. \quad (2.17)$$

Використавши залежність (2.9), прирости сил протидії витікання визначено за формулами:

$$dF_{C1} = \sigma_1' \cdot \sin(\delta_1) \cdot dh_C \cdot \cos(\delta_1) \cdot l_1, \quad (2.18)$$

$$dF_{C2} = \sigma_1' \cdot \sin(\delta_2) \cdot dh_C \cdot \cos(\delta_2) \cdot l_2, \quad (2.19)$$

Підставивши вирази для визначення приростів сил, що діють на СМ у елементарному об'ємі склепіння у конічній розвантажувальній лунці із кільцевим випускним отвором (2.15), (2.17), (2.18), (2.19), у рівняння рівноваги сил (2.13), отримано:

$$\begin{aligned} \frac{\tau_0 \cdot dh_C \cdot l_o}{f} + \sigma_1' \cdot \sin(\delta_1) \cdot dh_C \cdot \cos(\delta_1) \cdot l_1 + \sigma_1' \cdot \sin(\delta_2) \cdot dh_C \cdot \cos(\delta_2) \cdot l_2 = \\ = \rho_0 \cdot g \cdot dh_C \cdot b_o \cdot l_o. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Із рівняння рівноваги сил (2.20) визначено граничне максимальне значення ширини кільцевого випускного отвору конічної розвантажувальної лунки дозатора, що забезпечує формування стійкого склепіння при гравітаційному витіканні матеріалу:

$$b_o = \frac{\tau_0 \cdot (l_1 + l_2) + \sigma_1' \cdot f \cdot (\sin(2\delta_1) \cdot l_1 + \sin(2\delta_2) \cdot l_2)}{f \cdot \rho_0 \cdot g \cdot (l_1 + l_2)}. \quad (2.21)$$

Для подальшого дослідження геометричних параметрів розвантажувальних лунок дозатора важливо встановити величину напруження вільного витікання СМ [42]:

$$\sigma_1' = \frac{\sigma_{h0}}{(m_\phi + 1) \cdot \frac{Y^* \cdot (1 + \sin(\Phi))}{2(X^* - 1) \cdot \sin(\Theta)} \cdot F^*}, \quad (2.22)$$

де σ_{h0} – осьове напруження СМ у розвантажувальній лунці; m_ϕ – коефіцієнт форми ($m = 1$ – для конічної лунки; $m = 0$ – для клиновидної лунки (або конічної із кільцевим випускним отвором) [42]); X, Y, F – коефіцієнти. Коефіцієнти визначені за відповідними залежностями [42].

$$\begin{aligned}
X^* &= \frac{2^{m_\Phi} \cdot \sin(\Phi)}{1 - \sin(\Phi)} \cdot \left(\frac{\sin(2\beta^* + \Theta)}{\sin(\Theta)} + 1 \right), \\
Y^* &= \frac{\left(2 \cdot (1 - \cos(\beta^* + \Theta)) \right)^{m_\Phi} \cdot (\beta^* + \Theta)^{1-m_\Phi} \sin(\Theta) + \sin(\beta^*) \cdot (\sin(\beta^* + \Theta))^{1+m_\Phi}}{(1 - \sin(\Phi)) \cdot (\sin(\beta^* + \Theta))^{2+m_\Phi}}, \\
F^* &= \left(\frac{130^\circ}{130^\circ + \Theta} \right)^{m_\Phi} \cdot \left(\frac{200^\circ}{200^\circ + \Theta} \right)^{1-m_\Phi}, \\
\beta^* &= \frac{1}{2} \left(\Phi' + a \sin \left(\frac{\sin(\Phi')}{\sin(\Phi)} \right) \right).
\end{aligned} \tag{2.23}$$

Використавши гіпотезу про граничну рівновагу продукту у виділеному елементарному об'ємі висотою cdh , осьове напруження СМ записано у вигляді [2]:

$$\sigma_{h_0} = \sigma_{l_0} \cdot \left(1 + 2f^2 - \sqrt{(1 + 2f^2)^2 - 1 - 4f_w^2 \cdot (1 + f^2)} \right), \tag{2.24}$$

де σ – радіальне напруження СМ при його пасивному напруженому стані; f – коефіцієнт тертя СМ до стінки розвантажувальної лунки дозатора.

Радіальне напруження СМ при його пасивному напруженому стані визначено за залежністю [2]:

$$\sigma_{l_0} = \frac{\rho_0 g (h_0 + y)}{C_n (a_n - 1)} \left(1 - \left(\frac{h_0 + y}{h_0 + h_k} \right)^{a_n - 1} \right) + \sigma_{l_0}^H \cdot \left(\frac{h_0 + y}{h_0 + h_k} \right)^{a_n}, \tag{2.25}$$

де h_0 – відстань від випускного отвору розвантажувальної лунки дозатора до уявної вершини конуса (рис. 2.2, 2.3); y – поточна вертикальна координата місця утворення стійкого склепіння; h_k – висота розвантажувальної лунки дозатора; C_n , a_n – коефіцієнти.

Коефіцієнти C_n та a_n для пасивного напруженого стану СМ, що характерний при утворенні склепіння, мають вигляд [2]:

$$\begin{aligned}
C_n &= 1 + 2f^2 - \frac{\sqrt{\left[(1 + 2f^2)^2 - 1 \right]^3} - \sqrt{\left[(1 + 2f^2)^2 - 1 - 4f_w^2 (1 + f^2) \right]^3}}{6f_w (1 + f^2)}, \\
a_n &= \frac{2 \cos(\Theta) (f_w + \sin(\Theta))}{C_n \cdot \tan(\Theta)}.
\end{aligned} \tag{2.26}$$

2.2. Моделювання процесу витікання сипкого матеріалу з конічної лунки дозатора під дією вібрації

Дозування дрібнодисперсних СМ характеризується значними труднощами, пов'язаними із утворенням грудок, нестабільною насипною щільністю, нерівномірністю витікання тощо. Одним із способів покращення текучості матеріалу є застосування вібрації, зокрема, доведення СМ до стану віброкипіння [46]. Тому підвищення ефективності об'ємних дозаторів шляхом використання вібрації є актуальним завданням.

Особливо важливо дослідити рух дрібнодисперсного СМ у розвантажувальній лунці дозатора, оскільки у ній спостерігається ущільнення продукту дозування та погіршення умов його витікання [5]. Для дослідження поведінки дрібнодисперсних СМ під дією вібрації у розвантажувальній лунці дозатора використано модель суцільного середовища, що найбільш адекватно відображає суть процесу витікання продукту [57]. Модель Лоренца дозволяє описувати три можливі стани дрібнодисперсного СМ під дією вібрації, а саме: попереднє ущільнення, циркуляційні і хаотичні рухи продукту [6]. Оскільки дрібнодисперсний СМ під дією механічних коливань поводить себе аналогічно рідині, то найефективнішим способом одержання моделі Лоренца є використання рівнянь Нав'є-Стокса [46].

При моделюванні поведінки дрібнодисперсного СМ під дією вібрації у розвантажувальній лунці дозатора використано наступні припущення [4]:

- вібрація передається сипкому матеріалу через віброднище (стілки розвантажувальної лунки не коливаються);
- матеріал під дією вібрації здійснює симетричний відносно вертикальної осі рух;
- вібраційному впливу піддається лише шар матеріалу, що знаходиться у конічній розвантажувальній лунці дозатора;
- циркуляція частинок під дією вібрації відбувається по контурах, аналогічних коміркам Бенара з урахуванням конфігурації розвантажувальної лунки [16];

- між частинками матеріалу діють сили зчеплення;
- під дією вібрації матеріал поводить себе аналогічно рідині, яка не стискається;
- тиск СМ на нижче лежачі шари продукту у розвантажувальній лунці дозатора змінюється лише з висотою шару матеріалу.

2.3. Дослідження впливу параметрів коливань віброуючого конічного днища на ефективність роботи вібраційного об'ємного дозатора

Модель Лоренца – це тривимірна динамічна система, миттєвий стан якої визначається значеннями трьох змінних x_1, y_1, z_1 якої визначається значеннями трьох змінних x_l, y_l, z_l . У роботі [46] встановлено фізичну суть змінних x_l, y_l, z_l що входять у модель Лоренца

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{\gamma_n (\alpha^{*2} + \beta^{*2})}{\alpha^* \beta^*}, \\ B = \frac{\nu \gamma_n (\alpha^{*2} + \beta^{*2})^3}{\alpha^{*2} \beta^* \eta g \left(\frac{\rho_0}{\rho_\psi} + C(y) + \frac{dC(y)}{dy} y \right)}, \\ C = \frac{\nu \gamma_n (\alpha^{*2} + \beta^{*2})^3}{2\alpha^2 \beta^* \eta g \cdot \left(\frac{\rho_0}{\rho_\psi} + C(y) + \frac{dC(y)}{dy} y \right)}, \\ S = \frac{1}{\gamma_n (\alpha^{*2} + \beta^{*2})}. \end{array} \right. \quad (2.27)$$

Модель Лоренца набуде вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = \sigma(y_1 - x_1), \\ \dot{y}_1 = r \cdot x_1 - y_1 - x_1 \cdot z_1, \\ \dot{z}_1 = x_1 \cdot y_1 - b \cdot z_1. \end{array} \right. \quad (2.28)$$

Змінна x_1 описує швидкість циркуляції віброкиплячого матеріалу у псевдокомірці Бенара [46]; змінна y_1 характеризує зміну швидкості повітряного потоку по висоті шару СМ h [46]; змінна z_1 вертикального профілю швидкості повітряного потоку від лінійної залежності [46]. Абсолютну швидкість

повітряного потоку можна отримати, враховуючи одночасно усі три змінні. Значний вплив на рух СМ під дією вібрації має його вологість [109], особливо у випадку дозування дрібнодисперсних продуктів.

Для дослідження руху матеріалу обрано конічну розвантажувальну лунку із геометричними параметрами: $R_0 = 0,08$ м, $\Theta = 25^\circ$, $h = 0,3$ м. У якості дослідного продукту обрано дрібнодисперсний СМ із фізико-механічними властивостями: $\rho_0 = 0,6 \cdot 10^3$ кг/м³; $\rho_c = 0,8 \cdot 10^3$ кг/м³. Результатом моделювання стали графічні залежності (рис. 2.15, 2.16, 2.17), які вказують на три можливі стани продукту під дією вібрації.

Для моделювання ущільнення дрібнодисперсного СМ (рис. 2.15) використано такі режими вібрації: $\nu = 20$ Гц; $a = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м та прийнято наступне значення коефіцієнта кінематичної в'язкості $\nu = 0,05$ м²/с.

Характерним показником вібрації у моделі Лоренца (2.28), що визначає ефективність роботи дозатора, є параметр r . Для дрібнодисперсних СМ при $r < r^*$ спостерігається ущільнення матеріалу (рис. 2.15).

На графіку цей стан відповідає довільній кривій у фазовому просторі координат x_l , y_l , z_l . Значення r залежить від геометрії лунки, а також властивостей дрібнодисперсного СМ. Тому для конкретного дрібнодисперсного СМ, з метою уніфікації параметра r^* , необхідно попередньо експериментально дослідити вплив режимів роботи дозатора ν , a та висоти шару матеріалу h на коефіцієнт кінематичної в'язкості ν продукту.

При зростанні параметра r вище r^* у розвантажувальній лунці дозатора спостерігається впорядкований рух СМ у вигляді циркуляційних потоків, що відображається у фазовому просторі координат x_l , y_l , z_l кривою у вигляді спіралі (рис. 2.16). Моделювання циркуляційних рухів СМ (рис. 2.16) реалізовувалось при $\nu = 20$ Гц, $a = 3 \cdot 10^{-3}$ м та $\nu = 0,04$ м²/с.

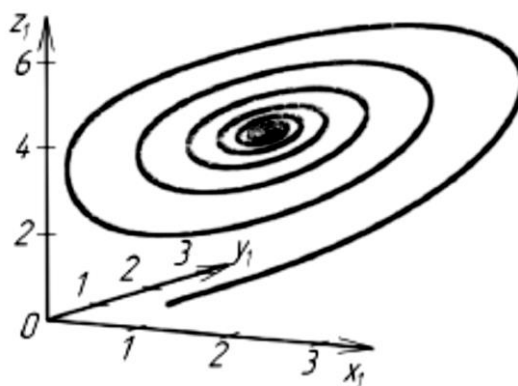


Рис. 2.16. Крива у вигляді спіралі – ознака циркуляційного руху СМ

При значному збільшенні параметра r моделі Лоренца $r \geq r^{**}$ циркуляційні рухи переходять у хаос, що графічно відображається у вигляді дивного атратора (замкнутої петлі) (рис. 2.17).

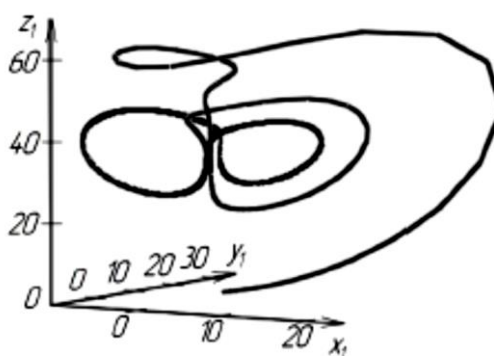


Рис. 2.17. Крива у вигляді атратора – ознака хаотичного руху СМ

Для моделювання хаотичних рухів дрібнодисперсного СМ (рис. 2.17) у розвантажувальній лунці дозатора прийнято такі режими вібрації: $\nu = 40$ Гц; $a = 5 \cdot 10^{-3}$ м, та використано наступне значення коефіцієнта кінематичної в'язкості $\nu = 0,03$ м²/с.

Аналіз графіків (рис. 2.15, 2.16, 2.17) дозволяє візуально встановити режим руху матеріалу у розвантажувальній лунці дозатора в залежності від типу кривої. Графік з нерухомою точкою чи граничним циклом із короткою траєкторією (рис. 2.15) відповідає ущільненню дрібнодисперсного СМ. Такий стан продукту дозування під дією вібрації впливає на зниження точності об'ємного дозатора. Спіралеподібна крива (рис. 2.16), відповідає граничному

циклу із довгою траєкторією, і, відповідно, циркуляційним рухам матеріалу; дивний атрактор (рис. 2.17) – хаотичним рухам матеріалу у бункері. Ефективна робота дозатора реалізовується при циркуляційних або хаотичних рухах СМ у розвантажувальній лунці.

Значний вплив на точність сформованої дози та продуктивність Q дозатора мають його режими роботи a , ν . Використавши формулу (2.81), у програмному середовищі MathCAD встановлено вплив режимів роботи a , ν на продуктивність Q вібраційного дозатора (рис. 2.18). Для моделювання використано наступні значення вхідних параметрів: $\rho_0 = 450 \text{ кг/м}^3$; $Re = 50$ [109]; $Z_k = 0,2$ [86]; $l_0 = 0,5 \text{ м}$; $b_0 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Аналіз графічних залежностей (рис. 2.18) дозволяє стверджувати, що чим більша амплітуда a та частота ν коливань днища розвантажувальної лунки дозатора, тим кращі показники текучості дрібнодисперсного СМ, і, відповідно, його продуктивність Q . При збільшенні частоти коливань ν від 15 Гц до 30 Гц продуктивність Q дозатора зростає приблизно у два рази.

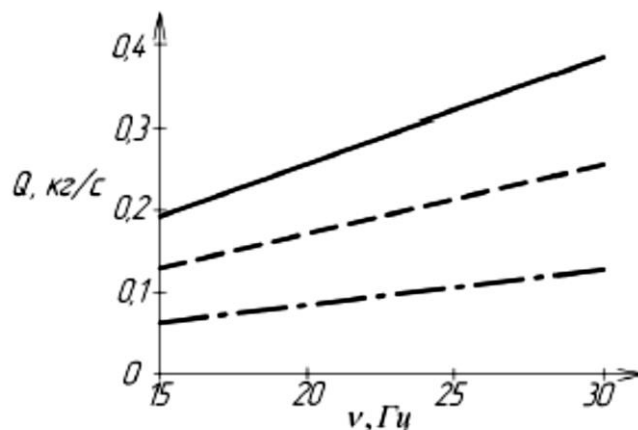


Рисунок 2.18. Залежність продуктивності дозатора від частоти коливань (— для $a = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, — - — для $a = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, - - - для $a = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$)

При експлуатації вібраційного дозатора на високих частотах ν можна істотно підвищити його продуктивність Q , і, тим самим, ефективність роботи. Однак при цьому суттєво зростають динамічні навантаження на

робочі елементи конструкції. Підвищення амплітуди коливань a також призводить також до зростання продуктивності Q дозатора. Таким чином, підбором оптимальних режимів коливань a та ν робочого органу дозатора можливо регулювати його продуктивність Q .

Отже, використання моделі Лоренца (2.28) дозволяє прогнозувати рух продукту в залежності від обраного режиму вібрації. Основним показником у моделі Лоренца, за яким визначається ефективність роботи дозатора, є параметр r , що характеризує стан у якому знаходиться СМ під впливом вібрації: ущільнення, циркуляційні рухи, хаотичні рухи. Тому, проектування вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ за допомогою параметрів моделі Лоренца дозволяє підібрати режими вібрації та геометрію лунки, що зможуть забезпечити наперед задані параметри технологічного процесу. Використання результатів досліджень дає можливість підвищувати продуктивність та точність вібраційних об'ємних дозаторів для дрібнодисперсних СМ.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ВІБРАЦІЙНОГО ОБ'ЄМНОГО ДОЗАТОРА

3.1. Методика планування та проведення експериментальних досліджень

Основною метою проведення експерименту є встановлення режимів роботи та геометричних параметрів розвантажувальної лунки дозатора, що забезпечуватимуть його високу продуктивність та точність. Основним завданням, що ставилось при плануванні експерименту, було забезпечення виконання таких умов:

- висока надійність та чіткість інтерпретації результатів досліджень;
- логічний, чіткий і послідовний план дослідження;
- максимальна формалізація процесу проведення експерименту і оброблення експериментальних даних з використанням комп'ютерних програм.

З метою забезпечення методичності проведення експерименту використано програму експериментальних досліджень, що включає три основні етапи:

- перший етап – це, безпосередньо, розробка програм та методики, що забезпечать проведення експериментальних досліджень з мінімальними затратами ресурсів; вибір вхідних параметрів, які необхідно дослідити; визначення технічних засобів для ефективного опрацювання експериментальних даних;
- другий етап – це підготовка експериментальної установки та вимірювальної апаратури, градація необхідних допоміжних конструктивних елементів; проведення експерименту та обробка отриманих даних; узгодження отриманих експериментальних даних із припущеннями, прийнятими на основі розробленої математичної моделі;

- третій етап – це узагальнення двох попередніх етапів у вигляді рекомендацій; впровадження результатів експериментальних досліджень у виробництво.

Проведення експериментальних досліджень виконувалось у наступній послідовності: встановлення входних факторів, що найбільше впливають на процес дозування; дослідження впливу цих факторів на ефективну в'язкість СМ; дослідження впливу геометрії розвантажувальної лунки та режимів роботи дозатора на його продуктивність.

Процес дозування характеризується значним числом різноманітних факторів, що впливають на поведінку дрібнодисперсного СМ під час його руху. Схематично процес дозування матеріалу можна представити у вигляді «чорного ящика» (рис. 3.1), де через дію входних параметрів (факторів) формується вектор відгуку Y . Умовно усі входні фактори можна розбити на три групи:

- керовані X ;
- контрольовані але некеровані W ;
- неконтрольовані та некеровані Z .

Перша група факторів становить k -мірний вектор X керованих параметрів, тобто таких, що можна змінювати у процесі проведення експерименту. До керованих параметрів належать: амплітуда $x_1 = a$, частота коливань $x_2 = \nu$, ширина випускного отвору розвантажувальної лунки дозатора $x_3 = b_0$. Область можливих значень параметрів $x_1 \dots x_k$ формує факторний простір.

Друга група параметрів формує вектор W до якого належать фактори, значення яких можна встановити, однак не можливо регулювати у процесі проведення експерименту. До контрольованих але некерованих параметрів належать: кут нахилу стінок розвантажувальної лунки дозатора $w_1 = \Theta_1$ висота шару СМ $w_2 = h$. Фактори цієї групи є незмінними під час проведення експериментальних досліджень.

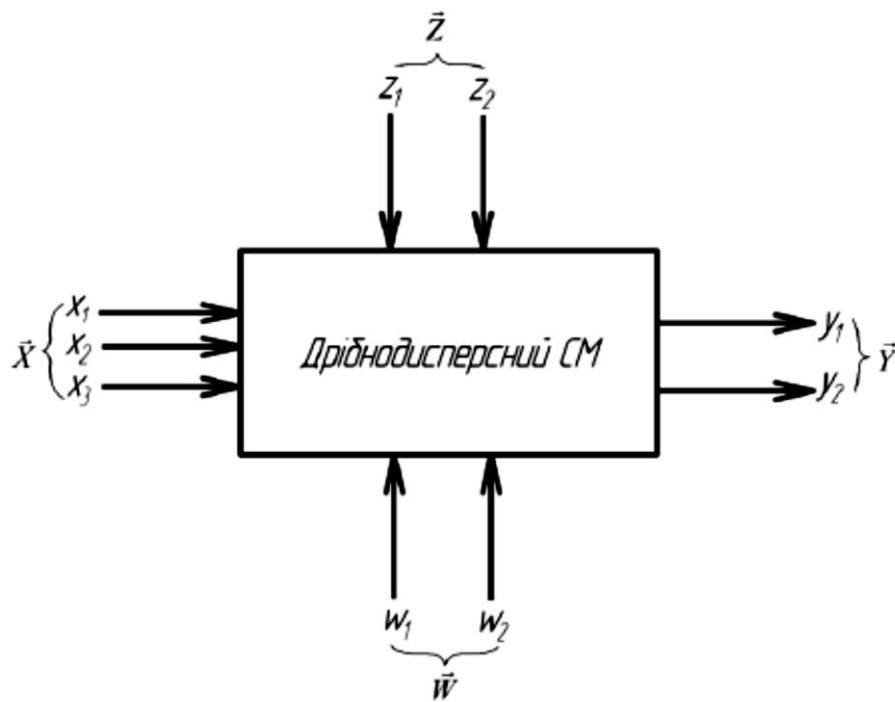


Рисунок 3.1. Схематичне зображення впливу факторів на поведінку віброкиплячого дрібнодисперсного СМ

До третьої групи вхідних параметрів належать фактори, що часто мають випадковий характер. Ця група формує вектор Z . Сюди належать: насипна щільність матеріалу $z_1 = \rho$, зчеплення між частинками $z_2 = \tau_0$. До цієї групи належать параметри, які важко контролювати у процесі проведення експерименту.

Вектор відгуку Y , що являється функцією вхідних факторів, залежить від мети та поставленого завдання. Для перевірки розробленої математичної моделі було експериментально проаналізовано такі вектори відгуку: коефіцієнт ефективної в'язкості $y_1 = \mu$ та продуктивність $y_2 = Q$.

Для експериментального доповнення та підтвердження розробленої математичної моделі досліджувались фактори першої групи, однак при інтерпретації результатів враховувався вплив і інших параметрів. В залежності від того, який вектор відгуку досліджувався, на проведення експерименту впливали ті чи інші вхідні фактори.

Одним із найважливіших завдань другого етапу програми експериментальних досліджень є дослідження експериментальної установки.

До неї були поставлені наступні вимоги:

- простота конструкції та можливість швидкого переналагодження;
- стійкість режимів роботи;
- легке регулювання вхідних параметрів у необхідних межах.

Розроблений експериментальний зразок вібраційного об'ємного дозатора (рис. 3.2) із технічними характеристиками (табл. 3.1) складається із конічної розвантажувальної лунки 1, на дні якої розміщене коливне конічне днище 2. Останнє приводиться у дію ексцентриковим віброприводом 3 через кривошипно-шатунний механізм 4.



Рисунок 3.2. Експериментальна установка вібраційного об'ємного дозатора

Зміна амплітуди коливань $0,5 \cdot 10^{-3} \leq a \leq 4 \cdot 10^{-3}$ м здійснювалась шляхом розведення двох півмуфт виконаних із пазами. Регулювання частоти коливань $10 < \nu < 30$ Гц відбувалось за допомогою перетворювача частоти. В залежності від досліджуваного фактору відгуку експериментальний зразок вібраційного об'ємного дозатора (рис. 3.2) укомплектовувався додатковими пристроями та приспособленнями.

Таблиця 3.1. Технічна характеристика експериментального зразка вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ

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, м	0,5
ширина, м	0,5
висота, м	0,95

Для проведення експерименту використовувались такі дрібнодисперсні СМ як пшеничне борошно та цемент, що характеризуються властивостями (табл. 3.2).

Таблиця 3.2. Фізико-механічні властивості сипких матеріалів, що використовувались при проведенні експерименту

Фізико-механічні властивості СМ	Борошно	Цемент
Усереднений діаметр, мкм	30-50	20-40
Насипна щільність, кг/м ³	450-700	960-1600
Коефіцієнт внутрішнього тертя	0,57-1,16	0,61
Коефіцієнт зовнішнього тертя:		
По сталі	0,49-0,65	0,3-0,6
По резині	0,85-0,95	0,9-0,98
Початковий опір зсуву, Па	50	150
Коефіцієнт динамічного ущільнення	1,08-1,13	1,15-1,19
Вологість, %	10	5-7

При проведенні експериментальних досліджень використовувалась конічна розвантажувальна лунка із фіксованими геометричними розмірами (рис. 3.3).

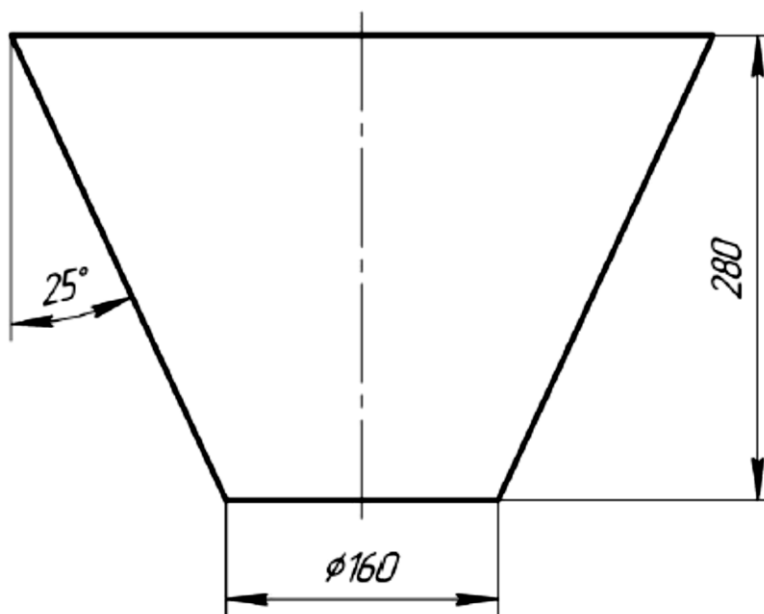


Рисунок 3.3. Конструкція розвантажувальної лунки дозатора

3.2 Експериментальне дослідження впливу параметрів вібрації робочого органу дозатора та висоти шару дрібнодисперсного сипкого матеріалу на його ефективну в'язкість

Першим етапом проведення експериментальних досліджень було визначення впливу режимів роботи дозатора a , v та висоти шару h дрібнодисперсного СМ на коефіцієнт ефективної в'язкості μ продукту. Принципова схема експериментальної установки вібраційного об'ємного дозатора зображена на рис. 3.4. 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. Напрявні 6 були

встановлені вище вершини внутрішнього конуса 2. З 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.

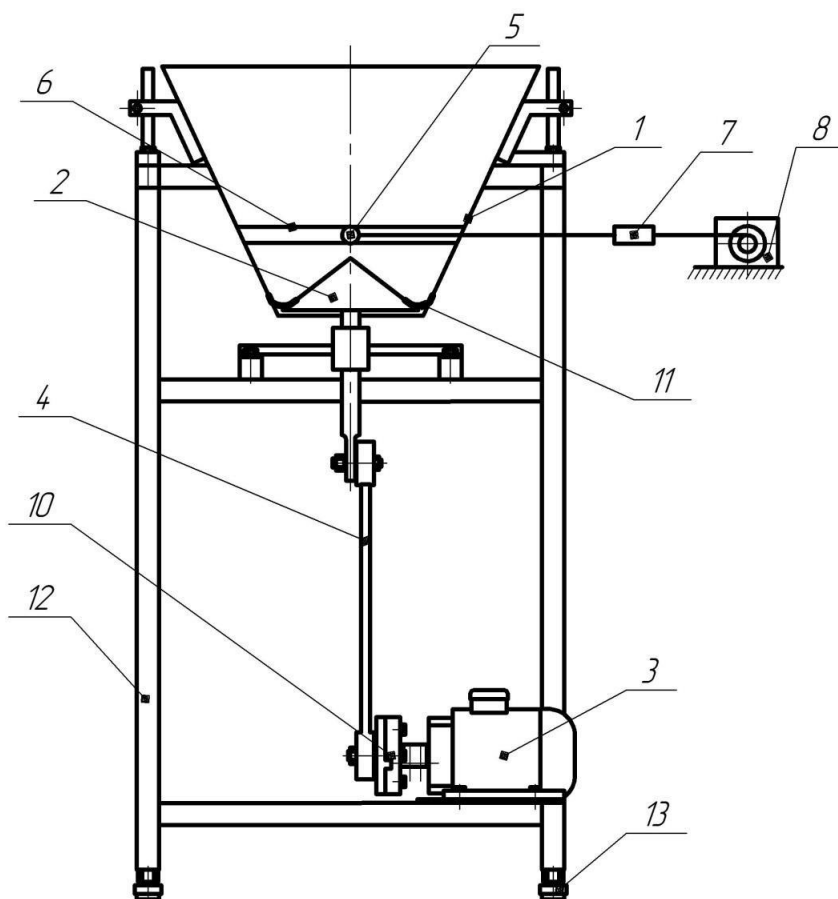


Рис. 3.4. Експериментальний зразок вібраційного об'ємного дозатора, укомплектований для визначення коефіцієнта ефективної в'язкості дрібнодисперсних СМ

Експериментальні дослідження коефіцієнта ефективної в'язкості дрібнодисперсних СМ проводились при різних значеннях амплітуди a , частоти коливань ν 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^{-2} м.

Значення коефіцієнта ефективної в'язкості визначено за формулою [4]:

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

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

Із зростанням сил зчеплення у дрібнодисперсному СМ збільшується значення параметру r^* моделі Лоренца, що безпосередньо впливає на зростання інтенсивності вібрації робочого органу дозатора, що необхідна для реалізації високої точності дозування продукту.

Отже, для забезпечення ефективної роботи вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ важливим етапом є встановлення значення параметра r^* . Для цього необхідне експериментальне визначення впливу режимів роботи дозатора a , v та висоти шару h дрібнодисперсного СМ на значення коефіцієнта ефективної в'язкості μ даного продукту.

3.2. Дослідження впливу параметрів вібрації конічного днища на продуктивність об'ємного дозатора для дрібнодисперсних сипких матеріалів

Дослідження продуктивності вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ проводилось на розробленому експериментальному зразку (рис. 3.2). Принципова схема експериментальної установки зображена на рис. 3.5.

Експериментальне дослідження продуктивності витікання пшеничного борошна та цементу здійснювалось наступним чином. У конічну лунку 1 завантажувалась дрібнодисперсний СМ. За допомогою кнопки пуск вмикався

двигун 3, що приводив у обертання муфту 7. Завдяки коливанням конічного днища 2 відбувалось витікання продукту через щілину, утворену стінкою розвантажувальної лунки дозатора 1 та конічним днищем 2.

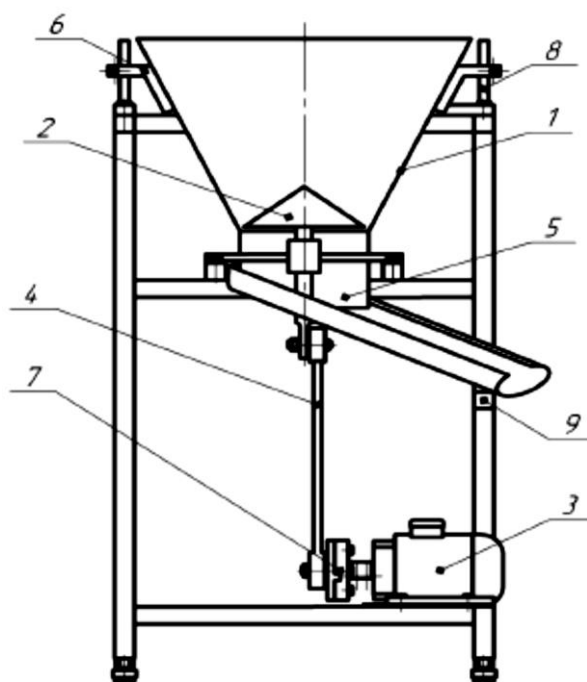


Рисунок 3.5. Експериментальний зразок вібраційного об'ємного дозатора для визначення продуктивності

Дрібнодисперсний СМ, пройшовши через випускний отвір розвантажувальної лунки дозатора 1, потрапляв у патрубок 5, звідки витікав до приймальної ємкості. Патрубок 5 фіксувався на рамі 9 планкою. Продуктивність роботи дозатора визначалась шляхом вимірювання часу витікання заданої ваги СМ. Для дослідження продуктивності витікання пшеничного борошна було виміряно час витікання матеріалу, масою $m_{\sigma} = 3$ кг. Продуктивність витікання пшеничного борошна визначалась:

$$Q_i = \frac{m_{\sigma}}{t_i}, \quad (3.2)$$

де t_i – час витікання борошна при проведенні i -того експерименту.

На основі експериментальних даних встановлено вплив частоти коливань ν конічного днища на продуктивність Q об'ємного дозатора для борошна при різних амплітудах коливань: 1 – $a = 0,0005$ м, 2 – $a = 0,0001$ м, 3

– $a = 0,0002$ м, 4 – $a = 0,0003$ м для розмірів кільцевого випускного отвору $b_0 = 0,008$ м (рис. 3.6), $b_0 = 0,006$ м (рис. 3.7), $b_0 = 0,004$ м (рис. 3.8).

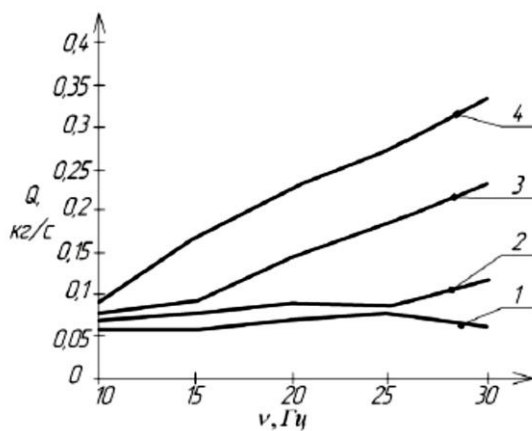


Рисунок 3.6. Залежність продуктивності дозатора для борошна від частоти коливань ($b_0 = 0,008$ м)

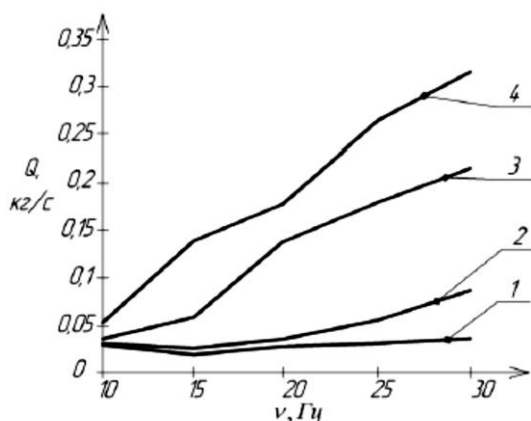


Рисунок 3.7. Залежність продуктивності дозатора для борошна від частоти коливань ($b_0 = 0,006$ м)

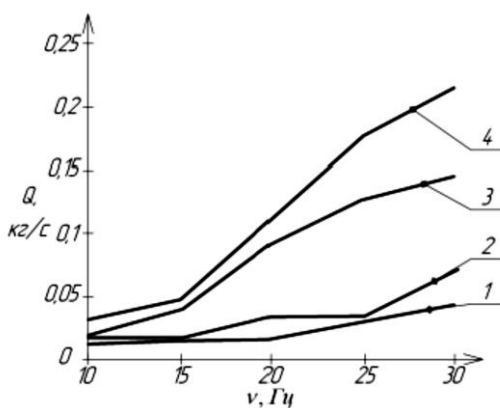


Рисунок 3.8. Залежність продуктивності дозатора для борошна від частоти коливань ($b_0 = 0,004$ м)

Аналіз графічних залежностей (рис. 3.6), (рис. 3.7), (рис. 3.8) дозволяє стверджувати, що продуктивність Q дозатора зростає із збільшенням частоти ν та амплітуди a коливань конічного днища. Збільшення розміру кільцевого випускного отвору від $b_o = 0,004$ м до $b_o = 0,008$ м призводить до зростання продуктивності Q дозатора для борошна більше ніж на 50%, оскільки збільшується кількість матеріалу, що проходить крізь випускний отвір за однаковий проміжок часу.

Відносна похибка вимірювань продуктивності вібраційного дозатора для дрібнодисперсних СМ визначалась за залежністю [4]:

$$\delta_Q = \frac{\Delta Q}{Q}, \quad (3.3)$$

де ΔQ – абсолютна похибка вимірювань продуктивності визначена за формулою розподілу Стьюдента:

$$\Delta Q = t_{кр} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta Q_i)^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (3.4)$$

де $t_{кр}$ – коефіцієнт Стьюдента: при коефіцієнті ризику $\beta_2 = 0,05$ і $n \cdot N = 25$ – $t_{кр} = 2,06$.

РОЗДІЛ 4

МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ВІБРАЦІЙНИХ ОБ'ЄМНИХ ДОЗАТОРІВ ДЛЯ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1. Будова та принцип роботи вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних сипких матеріалів

На основі проведених досліджень запропонована принципова схема вібраційного об'ємного дозатора (рис. 4.1) для СМ [114], що дає можливість дозувати дрібнодисперсний продукт, який схильний до злежування і утворення грудок. Для полегшення умов експлуатації у дозаторі реалізовано автоматичну подачу матеріалу із завантажувального бункера у чашу дозатора за рахунок перемикання контактів, що розміщені на регуляторі рівня матеріалу у чаші дозатора. Положення контактів керує роботою віброзбудника, який здійснює подачу матеріалу із завантажувального бункера, конструкція та режими роботи якого підібрані на основі розробленої математичної моделі.

Дозатор для дрібнодисперсних СМ (рис. 4.1) складається із завантажувального бункера 1, що з'єднаний через перехідну лунку 21 із чашею дозатора 2, яка виконана у вигляді циліндричної ємкості. Перехідна лунка 21 з'єднана з кришкою чаші дозатора 4 за допомогою гофрованого рукава 22. До стінок лунки 21, через гумові амортизатори, прикріплений віброзбудник 19, що надає коливання конічному днищу 18 завантажувального бункера 1. До кришки 4 чаші дозатора 2 кріпиться конусне сито 16 для просівання грудок. Грудки матеріалу через вікно 17 потрапляють у камеру 31 і видаляються із дозатора через патрубок 26. В чаші дозатора 2 жорстко змонтоване конічне днище 3, на яке потрапляє СМ при завантаженні дозатора. Дозувальна камера 14 з транспортними доріжками 12 з'єднується з основною масою СМ за допомогою завантажувального вікна

15. Кожна транспортна доріжка 12 має розвантажувальні отвори, які, як і випускний отвір 13 днища 3, розташовані над мірником 7. До основного днища чаші дозатора під мірником 7 встановлений розвантажувальний патрубок 25.

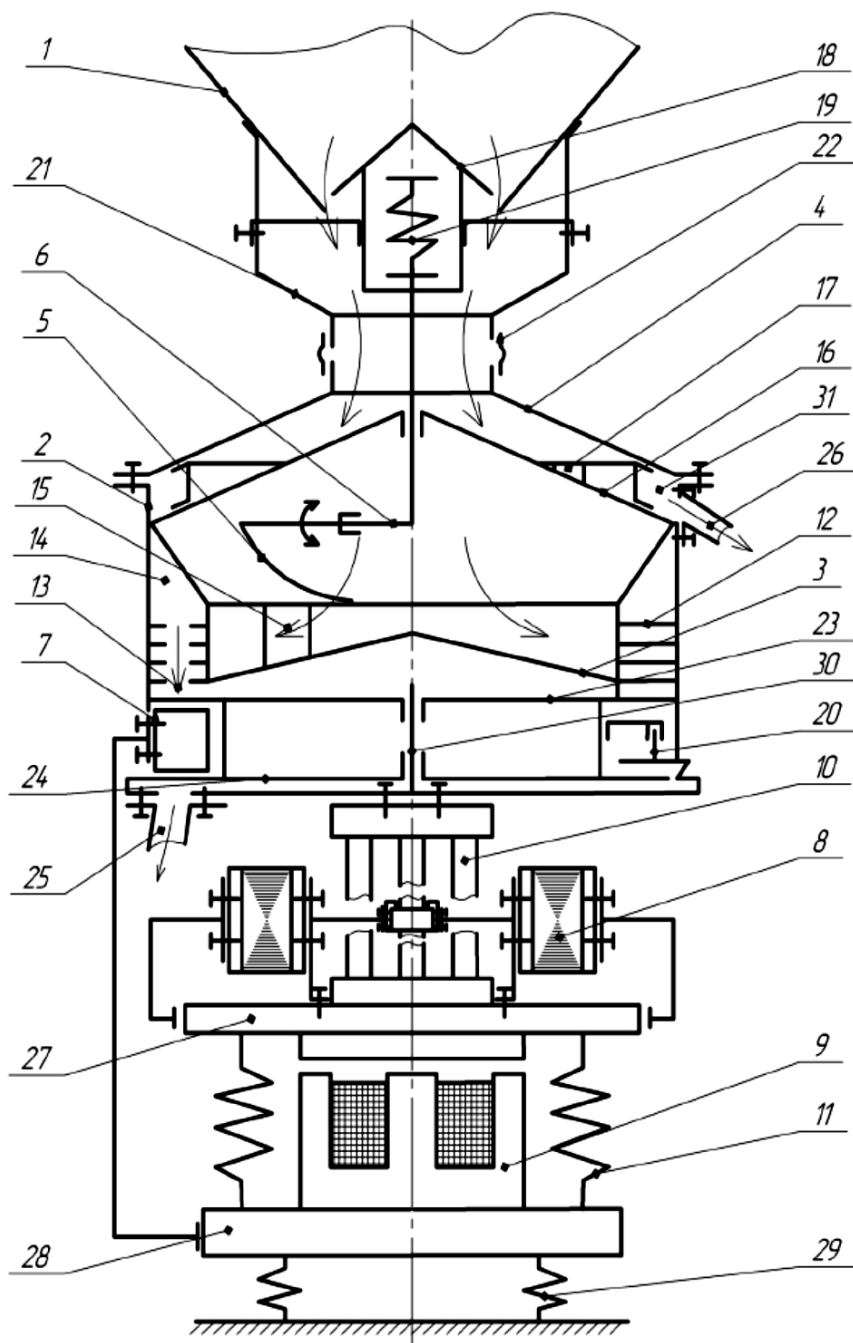


Рисунок 4.1. Принципова схема вібраційного об'ємного дозатора для дрібнодисперсних СМ

Механізм регулювання рівня сипкого матеріалу у чаші дозатора 2 складається із прапорця 5 і шарнірного механізму 6, що з'єднаний із вібробудником 19. Прапорець 5 повертається в залежності від підніманні чи опускання рівня дрібнодисперсного СМ у чаші дозатора 2.

Відсікаючі диски 23 і 24 з отворами, які розміщені на обох дисках в шаховому порядку, встановлені на валу 30 і приводяться у рух з допомогою фрикційного механізму 20 (рис. 4.2).

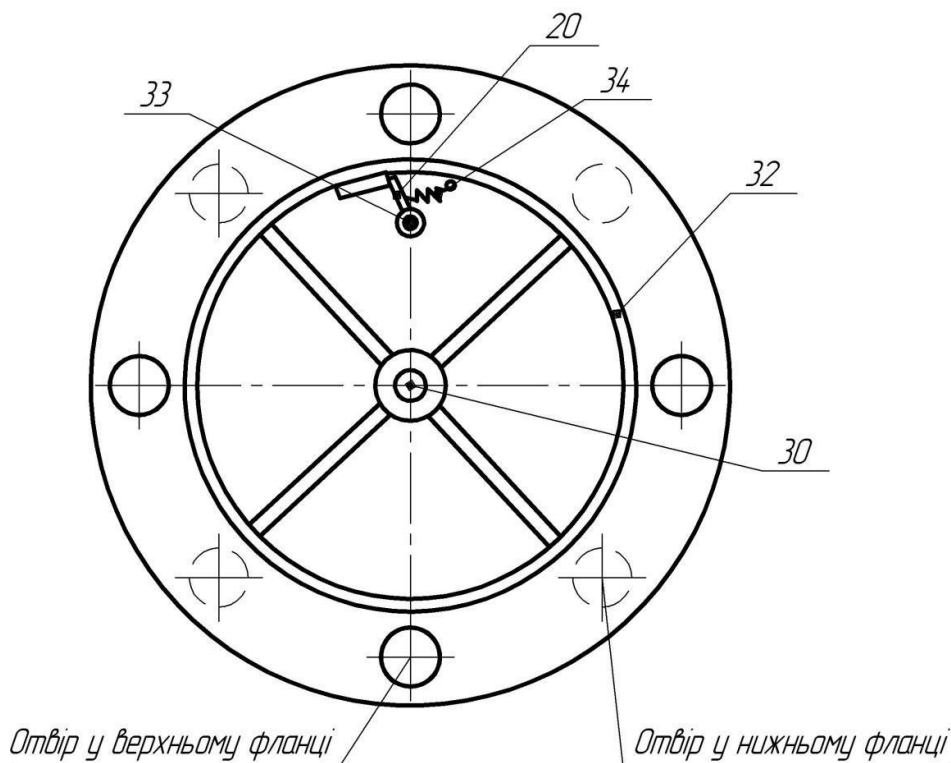


Рисунок 4.2. Схема фрикційного механізму

Фрикційний механізм 20 (рис. 4.2) змонтований на осі 33 з можливістю вільного прокручування та підтискається пружиною 34 до обойми 32, на якій змонтовані відсікаючі диски. Передача руху від фрикційного механізму до блоку відсікаючих дисків здійснюється через циліндричну прогумовану поверхню обойми. Між дисками 23 і 24 встановлений корпус дозувального мірника 7, який за допомогою кронштейна з'єднаний з другою реактивною масою дозатора 28, на якій встановлено електромагніт вертикальних коливань 9 (рис. 4.1).

Чаша дозатора 2 з'єднана через комбіновану пружну систему 10 з проміжною реактивною масою 27, на якій встановлені електромагніти

кругових коливань 8 та якір електромагніту вертикальних коливань 9 з плоскою пружною системою 11 для реалізації вертикальних коливань. Для забезпечення віброізоляції дозатор встановлено на амортизатори 29.

Дозатор працює наступним чином [10]. При ввімкненому віброзбуднику 19 дрібнодисперсний СМ через випускний отвір у завантажувальному бункері 1, що утворений стінкою його конічної лунки і днищем 18 потрапляє до чаші дозатора 2 на сито 16. На ситі 16 відбувається просіювання матеріалу і ущільненні грудки продукту, що не пройшли крізь сито, під дією процесу вібротранспортування потрапляють через вікно 17 у камеру 31 звідти транспортуються до випускного патрубку 26 для подальшого видалення із дозатора. Просіяний матеріал, потрапляючи на поверхню конічного днища 3 чаші дозатора 2, переміщається під дією вібрації по поверхні конуса 3 і через вікно 15 потрапляє на транспортні доріжки 12. Прапорець 5 вільним кінцем дотикається до поверхні матеріалу у чаші дозатора 2. При зростанні рівня продукту в чаші дозатора прапорець піднімається і у верхньому крайньому положенні розмикає контакт, що відповідає за включення віброзбудника 19. При виключенні вібратора 19 днища 18 лунки завантажувального бункера 1 матеріал над вихідним отвором зависає, що призводить до припинення його подачі у чашу дозатора 2. При споживанні матеріалу дозатором рівень останнього в чаші 2 знижується. Це призводить до опускання прапорця 5 до нижнього рівня, при якому включається віброзбудник 19, приводячи у колильний рух конічне днище 18 і відновлюючи подачу матеріалу із завантажувального бункера 1 в чашу дозатора 2. Матеріал із чаші дозатора 2 крізь завантажувальний отвір 15 потрапляє на транспортні доріжки 12 дозувальної камери, де під дією процесу вібротранспортування переміщується на позицію завантаження мірника 7, який за допомогою кронштейна з'єднаний другою реактивною масою 27, що реалізує вертикальні коливання. Це дозволяє забезпечити повне випорожнення мірника та підвищує точність дозування. Формування дози в мірнику відбувається за допомогою двох відсікаючих дисків 23 та 24 між якими розташований мірник 7. Диски 23, 24 встановлені на вертикальній

осі 30 і здійснюють обертовий рух за допомогою фрикційного механізму 20, який перетворює кутові коливання чаші дозатора у плавний обертовий рух дисків. При співпадінні мірника 7 із отвором у верхньому диску 23 відбувається його наповнення, а при співпадінні із отвором у нижньому диску 24 – випорожнення. Завдяки розвантажувальному патрубку 25 сформована доза сипкого матеріалу направляється в майбутню упаковку або в окрему ємкість.

4.2. Вибір оптимальних режимів вібраційного транспортування дрібнодисперсного СМ в чаші дозатора

Завдяки мінімальній кількості пар тертя та передавальних механізмів, простоті та надійності конструкцій робочих органів процес вібраційного переміщення набув широкого застосування при дозуванні дрібнодисперсних СМ. Використання явища резонансу в вібраційних транспортерах дає можливість створювати економічні конструкції, оскільки при роботі в білярезонансних режимах потрібні мінімальні вимушуючі зусилля для отримання необхідних робочих амплітуд, а це дозволяє зменшити розміри віброзбудника та збільшити його ККД [10].

Якщо при вібраційному транспортуванні СМ з хорошою сипучістю не виникає жодних проблем, то при переміщенні дрібнодисперсних СМ не завжди можна отримати належну швидкість руху продукту, а, відповідно, і продуктивність процесу дозування. Однак шляхом встановлення оптимальних режимів коливань робочої поверхні дозатора можливо підвищити ефективність процесу вібраційного транспортування дрібнодисперсних СМ. Для реалізації цього завдання важливим є встановлення залежності швидкості транспортування продукту від режимів коливань робочої поверхні: форми траєкторії коливань, частоти ν , амплітуди a , кута зсуву фаз між складовими амплітуди коливань ε , кута вібрації γ та кута нахилу робочої поверхні β . Також важливе значення має визначення впливу фізико-механічних властивостей дрібнодисперсних СМ, товщини шару δ та умов експлуатації на перераховані параметри процесу вібраційного

транспортування продукту.

Для встановлення оптимальних режимів вібротранспортування дрібнодисперсних СМ розглянуто напрямлені та еліптичні коливання робочих поверхонь, оскільки вони найчастіше використовуються в конструкціях вібраційних дозаторів [18]. Спочатку розглянуто вібротранспортування СМ під дією напрямлених коливань робочого органу. Зроблено припущення, що робочий орган вібраційного транспортера здійснює прямолінійні гармонійні коливання, направлені під кутом γ до його поздовжньої осі, з амплітудою a та частотою ν за законом:

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

де ω – кругова частота коливань робочого органу дозатора.

Вібруюча поверхня здійснює напрямлені коливання, які можна розкласти на дві складові: поздовжню та поперечну. Функції цих переміщень у процесі вібротранспортування СМ різні: поздовжня складова забезпечує необхідну швидкість переміщення продукту, нормальна – режим транспортування. Процес переміщення матеріалу є результатом сумарної дії на нього сили інерції та сил тертя.

Експериментально встановлено залежність швидкості вібраційного транспортування дрібнодисперсного СМ від товщини шару продукту, що переміщається [17]. В якості дрібнодисперсного продукту було обране пшеничне борошно вологістю 10 %. Експеримент проводився для моношарів різних товщин $1 - \delta = 0,0005$ м, $1 - \delta = 0,002$ м, $2 - \delta = 0,005$ м, $3 - \delta = 0,007$ м, $4 - \delta = 0,01$ м, $5 - \delta = 0,015$ м, $6 - \delta = 0,02$ м, $7 - \delta = 0,03$ м, $8 - \delta = 0,04$ м, $9 - \delta = 0,05$ м. Результатом дослідження стали графічні залежності коефіцієнту швидкості від параметру перевантаження $K_u (\zeta)$ (рис. 4.3).

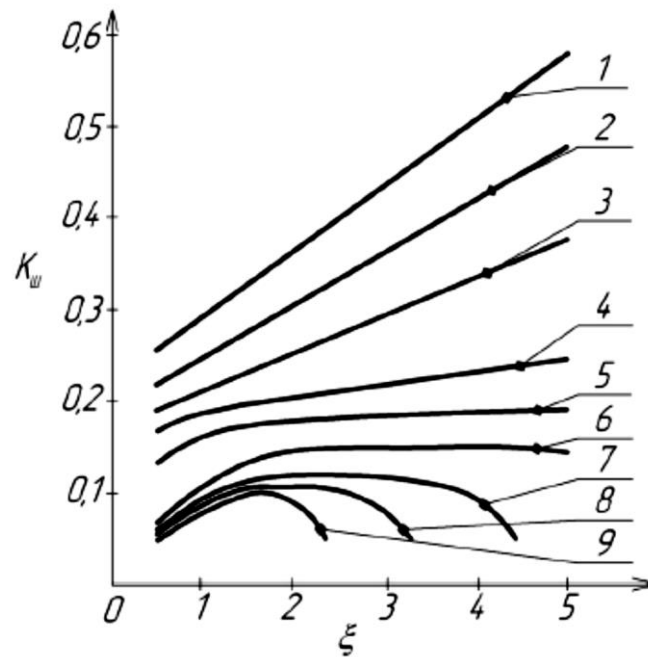


Рисунок 4.3. Залежність коефіцієнта швидкості від режиму вібро-транспортування при прямолінійних коливаннях

Аналіз експериментальних даних дозволяє стверджувати, що збільшення товщини шару СМ δ призводить до зменшення швидкості вібраційного транспортування $K_{ш}$. Аналізуючи графічні залежності $K_{ш} = f(\xi)$ (рис. 4.3) досліджено, що швидкість вібротранспортування ∂V для будь-якого шару транспортуючого матеріалу зростає у безвідривному режимі вібротранспортування $\xi \leq 1$. Однак у відривному режимі вібротранспортування $\xi > 1$ характер зміни кривої коефіцієнта швидкості $K_{ш}$ визначається товщиною шару продукту δ .

При переході на інтенсивні режими роботи установки, зростання швидкості продовжувалось лише для шарів товщиною $0,002 \leq \delta \leq 0,02$ м, а для шарів $\delta > 0,02$ м спостерігалось зниження швидкості і при певних значеннях ξ процес вібротранспортування набував нестійкого характеру, а згодом повністю припинявся, що обумовлено різними причинами, пов'язаними з порушення умов передачі енергії від віброуючої поверхні до середовища, яке переміщувалось по ній.

Таким чином борошно товщиною $\delta < 0,02$ м ефективно транспортувати у відривних режимах, а при $0,02 < \delta < 0,05$ м – у безвідривних [17].

Встановлено, що при еліптичних коливаннях на швидкість вібротранспортування продукту в основному впливають форма траєкторії коливань віброуючої поверхні, яка визначається співвідношенням амплітуд складових та кутом зсуву фаз між ними, кутом нахилу великої осі еліпса до горизонту, частотою та амплітудою коливань, а також напрямом обігання траєкторії [18]. Крім перерахованих факторів при вібропереміщенні СМ на його швидкість впливають параметри та стан шару продукту, пов'язані із його особливими фізико-механічними характеристиками. Експериментальні дослідження різних факторів, що впливають на швидкість вібротранспортування дрібнодисперсного СМ [17], дозволяє встановити оптимальні режими коливань транспортних доріжок. Експериментальні дослідження [17] реалізовувались на установці, яка здійснює еліптичні коливання на частоті 50 Гц. Досліди проводились при сталій горизонтальній складовій амплітуди коливань $a_z = 0,0015$ м, змінних – нормальній a_n та куті зсуву фаз ε . В процесі проведення експерименту вимірювалась швидкість вібротранспортування борошна вологістю $W=10\%$ для товщини шарів $0,005 \leq \delta \leq 0,05$ м. На основі проведених досліджень було отримано ряд графічних залежностей коефіцієнта швидкості K_w від параметра перевантаження ξ для шарів продукту різних товщин δ та кутів зсуву фаз ε :

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

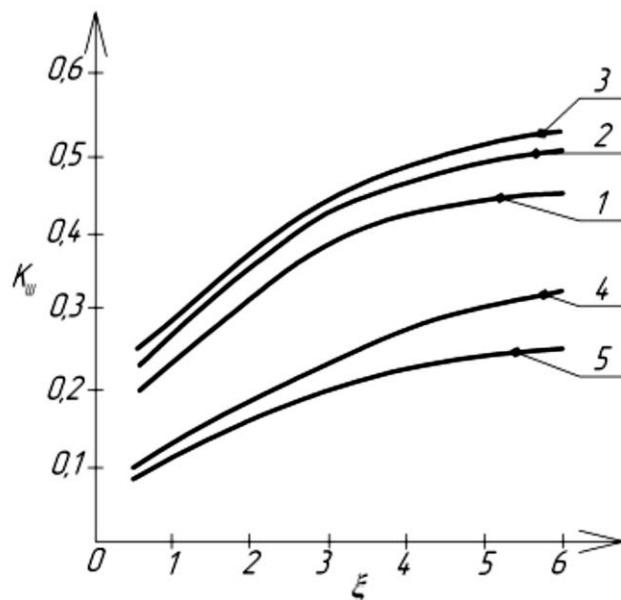


Рисунок 4.4. Залежність коефіцієнта швидкості від режиму вібротранспортування при еліптичних коливаннях ($\delta = 0,005 \text{ м}$)

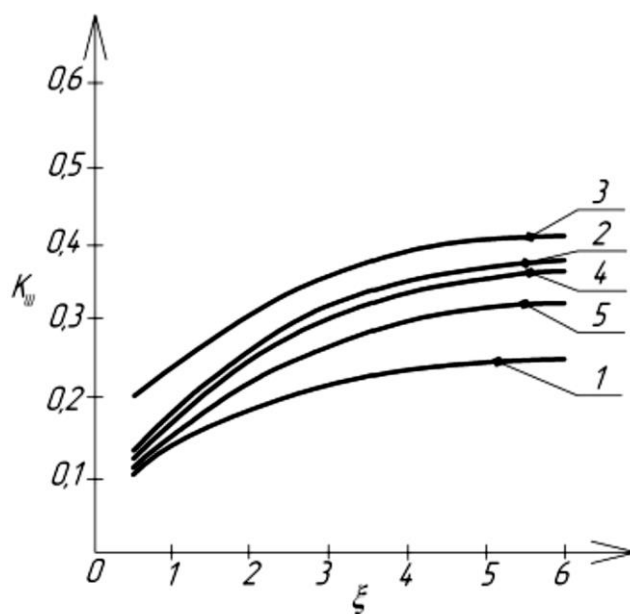


Рисунок 4.5. Залежність коефіцієнта швидкості від режиму вібротранспортування при еліптичних коливаннях ($\delta = 0,01 \text{ м}$)

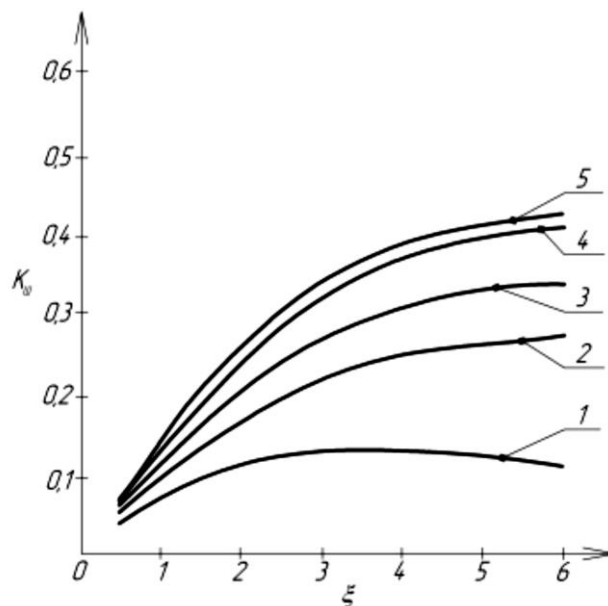


Рисунок 4.6. Залежність коефіцієнта швидкості від режиму вібротранспортування при еліптичних коливаннях ($\delta = 0,02$ м)

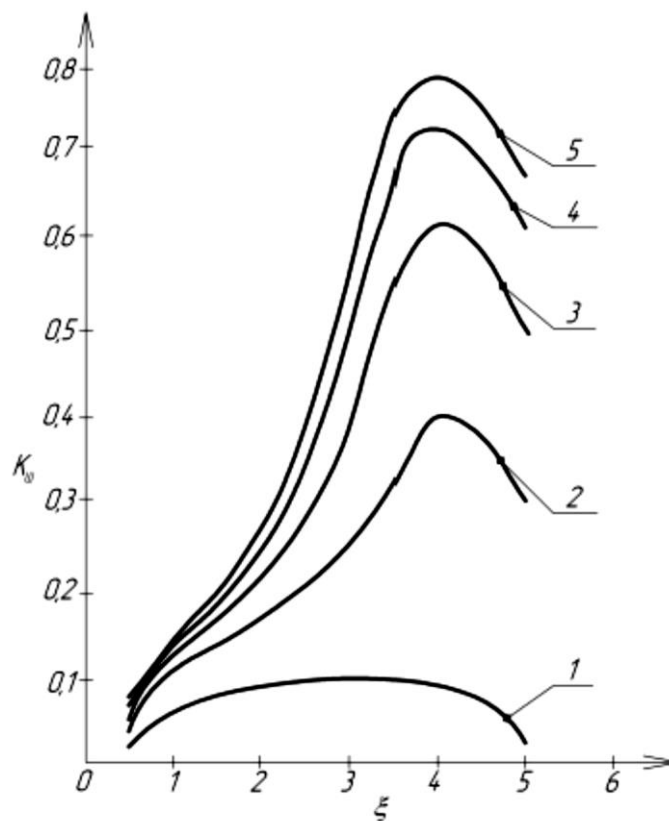


Рисунок 4.7. Залежність коефіцієнта швидкості від режиму вібротранспортування при еліптичних коливаннях ($\delta = 0,04$ м)

Аналіз графічних залежностей (рис. 4.4-4.7) показує, що зростання коефіцієнта швидкості K_w відбувається при збільшенні ξ незалежно від товщини шару борошна. Однак для шару продукту $\delta = 0,04$ м (рис. 4.7) характер кривих $K_w(\xi)$ дещо відмінний від попередніх (рис. 4.4-4.6) та характеризується різким зростанням швидкості при $\xi \leq 4$, що супроводжується появою віброкипіння. Подальше збільшення ξ (рис. 4.7) призводить до різкого зниження швидкості руху СМ, а згодом і до повної його зупинки.

Зміна товщини шару продукту δ суттєво не відображається на зміні швидкості, але впливає на вибір оптимального кута зсуву фаз ε . На рис. 4.8-4.9 представлені залежності $K_w(\varepsilon)$ для різних значень параметра перевантаження ξ : 1 – $\xi = 1$; 2 – $\xi = 2$; 3 – $\xi = 3$; 4 – $\xi = 4$; 5 – $\xi = 5$. Аналіз графіків дозволяє стверджувати, що збільшення товщини шару δ СМ змінює оптимальний кут зсуву фаз $\varepsilon_{\text{опт}}$, який для шару $\delta = 0,005$ м становить $\varepsilon_{\text{опт}} = 50 \dots 60$ (рис. 4.8), а для шару $\delta = 0,04$ м становить $\varepsilon_{\text{опт}} = 120 \dots 130$ (рис. 4.9).

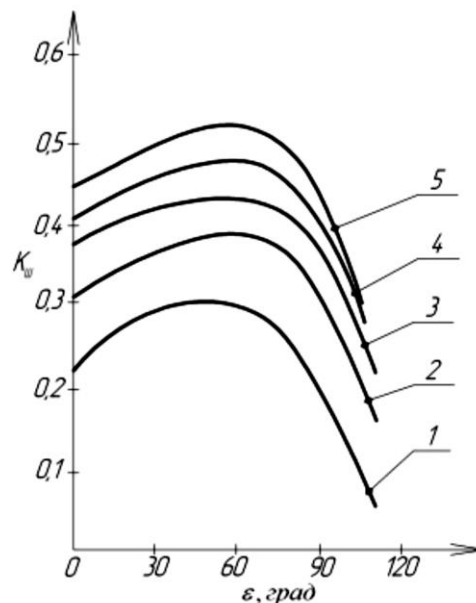


Рисунок 4.8. Залежність коефіцієнта швидкості СМ від кута зсуву фаз при еліптичних коливаннях ($\delta = 0,005$ м)

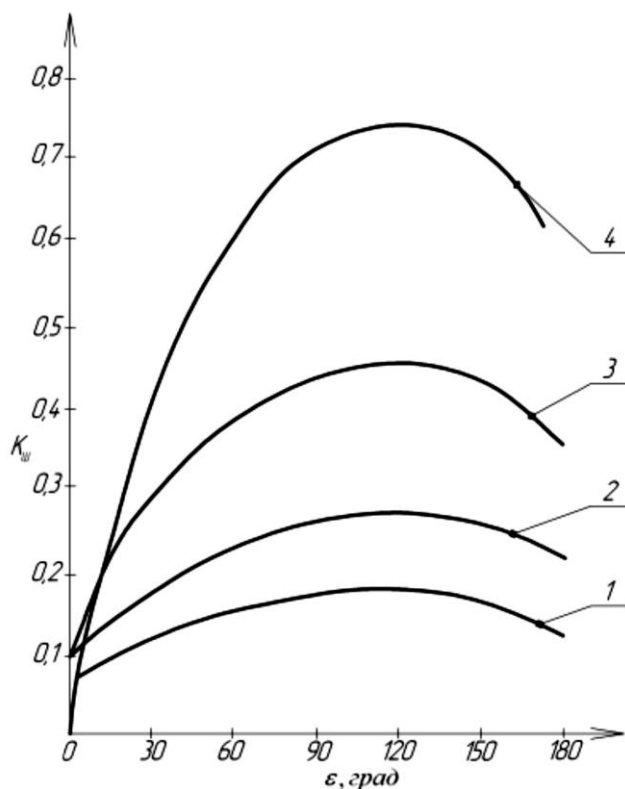


Рисунок 4.9. Залежність коефіцієнта швидкості від кута зсуву фаз при еліптичних коливаннях ($\delta = 0,04$ м)

При вібротранспортуванні СМ по похилій поверхні вгору ($\beta > 0^\circ$) спостерігається падіння швидкості вібротранспортування, що підтверджено експериментальними дослідженнями (рис. 4.10-4.11) [17]. Встановлено вплив кута нахилу робочої поверхні β на швидкість вібротранспортування СМ шаром $\delta = 0,005$ м при різній інтенсивності вібрації: 1 – $\xi = 1$; 2 – $\xi = 2$; 3 – $\xi = 3$; 4 – $\xi = 4$; 5 – $\xi = 5$ (рис. 4.10). Графічні залежності вказують на негативний вплив зростання кута β на швидкість переміщення пшеничного борошна. Зростання коефіцієнтів перевантаження ξ покращує ефективність вібропереміщення СМ під кутом β до горизонту.

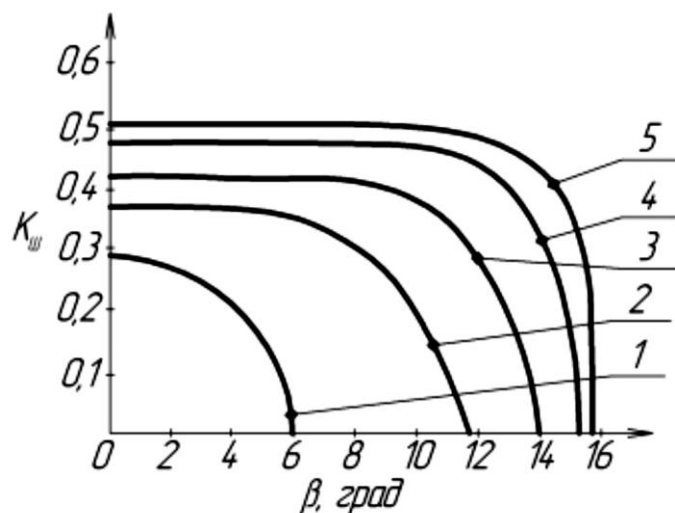


Рисунок 4.10. Залежність коефіцієнта швидкості СМ від кута нахилу робочої поверхні

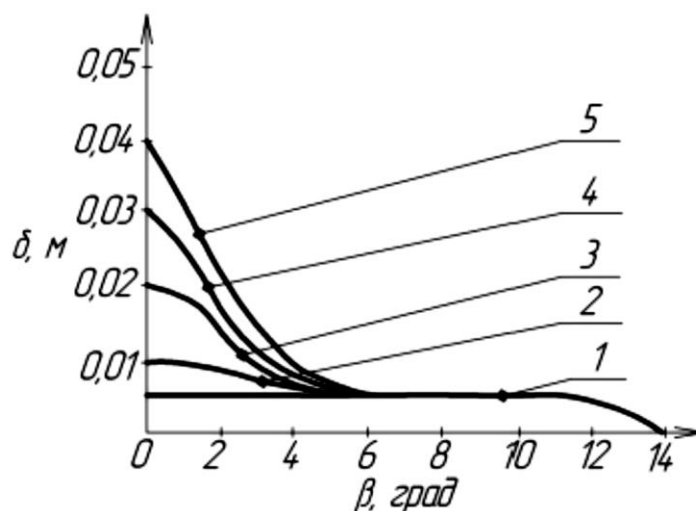


Рисунок 4.11. Залежність товщини шару СМ при вібротранспортуванні від кута нахилу поверхні

Значний інтерес становить дослідження процесу вібропереміщення шарів дрібнодисперсного СМ різної товщини по похилій поверхні (рис. 4.11) Дослідження вібраційного транспортування пшеничного борошна по похилій поверхні шарами товщиною $\delta > 0,005\text{м}$ не дали позитивного результату (рис. 4.11, крива 2-5). При інтенсивності вібрації $2 > \xi$ зростання кута нахилу робочої поверхні β спричиняло руйнування шару продукту. Для $\beta \approx 4^\circ$ шари

СМ товщиною $\delta > 0,005$ м, розтікаючись по вібруючій поверхні, досягали товщини $\delta \approx 0,005$ м і далі поводились як шар аналогічної товщини.

Отже, проаналізувавши графічні залежності (рис. 4.3 – 4.11) можна стверджувати:

1. Швидкість вібраційного транспортування пшеничного борошна товщиною шару $\delta > 0,01$ м при прямолінійних коливаннях та еліптичних коливаннях практично однакова, однак для $0,01 < \delta < 0,04$ м швидкість в режимі еліптичних коливань майже на порядок перевищує цей показник при прямолінійних коливаннях.

2. При зростанні товщини шару δ СМ швидкість його вібротранспортування при еліптичних коливаннях падає, а при $\delta > 0,04$ м – близька до нуля. Максимальна швидкість вібропереміщення дрібнодисперсних СМ при еліптичних коливаннях була досягнута при формі траєкторії у вигляді витягнутого еліпса із співвідношенням малої та великої осей рівним 1:2...1:5. При горизонтальному положенні великої осі еліпса зміна характеру обігання траєкторії викликає зміну напрямку руху дрібнодисперсних СМ.

3. Для кожної товщини шару борошна існують оптимальні кути зсуву фаз $\varepsilon_{\text{опт}}$ між горизонтальною і вертикальною складовими коливань, при яких процес транспортування найбільш продуктивний.

4. Ефективно вібротранспортувати дрібнодисперсний СМ по похилій поверхні можна при $\beta \leq 4^\circ$, оскільки більші кути нахилу поверхні доцільновикористовувати лише для дрібнодисперсного СМ шаром $\delta \leq 0,005$ м.

Отже, використання еліптичних коливань робочого органу дозатора дає можливість забезпечити оптимальні його режими роботи для широкого діапазону змін фізико-механічних властивостей дрібнодисперсного СМ.

ВИСНОВКИ

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Аналіз літературних джерел засвідчив відсутність методики розрахунку та проектування об'ємних дозаторів для дрібнодисперсних СМ, що ускладнює процес їх створення.

2. Досліджено математичну модель витікання дрібнодисперсних СМ із розвантажувальної лунки дозатора при гравітаційному витіканні, що дозволяє встановити розмір випускного отвору, при якому формується стійке склепіння продукту при відсутності дії вібрації, в залежності від фізико-механічних властивостей СМ, кута нахилу стінок та висоти розвантажувальної лунки.

3. Досліджено математичну модель витікання дрібнодисперсних СМ із розвантажувальної лунки дозатора при вібраційному збуренні потоку (модель Лоренца), що дозволяє прогнозувати поведінку дрібнодисперсного СМ (ущільнення, циркуляційні рухи, хаотичні рухи продукту) в залежності від амплітуди та частоти коливань робочого органу, а також геометрії розвантажувальної лунки дозатора.

4. Експериментально досліджено продуктивність роботи вібраційного об'ємного дозатора та точність процесу дозування. Зокрема при ширині кільцевого випускного отвору $b_0=0,006\text{м}$ та амплітуді коливань $a=0,003\text{м}$ продуктивність витікання борошна при зростанні частоти коливань кінцевого днища від 20 до 30 Гц збільшується.

Зростання амплітуди коливань кінцевого днища також призводить до збільшення продуктивності дозатора. Таким чином експериментальні дослідження підтвердили можливість регулювання продуктивності дозатора зміною його режимів роботи.

Встановлено основні параметри фрикційного механізму, який приводить в рух відсікаючі диски дозатора, що забезпечують формування дози продукту: довжину його робочої частини та кругову частоту обертання дисків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Квапилл. Р. К. Движение сыпучих материалов у бункерах / Р. К. Квапилл. – М. : Госгортехиздат, 1961. – 80 с.
2. Каталымов А. В. Дозирование сыпучих и вязких материалов / А. В. Каталымов, В. А. Любартович ; за ред. Ю. К. Кузнецов. – Л. : Химия, 1990. – 240 с.
3. Лукьянов П. И. Аппараты с движущимся зернистым слоем / П. И. Лукьянов. – М. : Машиностроение, 1974. – 182 с.
4. Квапилл. Р. К. Движение сыпучих материалов у бункерах / Р. К. Квапилл. – М. : Госгортехиздат, 1961. – 80 с.
5. Комченко Е. В. Совершенствование процесса истечения мелких сыпучих материалов из бункеров сельскохозяйственного назначения : автореф. дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук : 05.20.01. / Е. В. Комченко – Ростов-на-Дону : РГАСХМ, 2004. – 22 с.
6. Табунщиков В. Г. Дослідження циркуляції дрібнодисперсного матеріалу в вібраційному апараті з горизонтальною робочою камерою / В. Г. Табунщиков, М. В. Глущенко // Технологія – 2013 : матеріали міжнар. наук.-техн. конф., 26-27 квітня 2013 р., Сєверодонецьк / Техн. ін.-т СНУ ім. В. Даля, Білоруський держ. технол. ун-т, Півд.-рос. держ. техн. ун-т, ПрАТ „Сєверодонецьке об’єд. Азот”. – Сєверодонецьк, 2013. – Ч. 2. – С. 11 – 12.
7. Kache G. Verbesserung des Schwerkraftflusses kohäsiver Pulver durch Schwingungseintrag : Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieur : Promotionskolloquium / G. Kache. – Magdeburg : Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2009. – 223 s.
8. Урьев Н. Б. Исследование реологических свойств высокодисперсных порошков в процессе вибраций / Н. Б. Урьев, Н. В. Михайлов, П. А. Ребиндер // Доклады АН СССР. – 1969. – Т.184. – №2. – С. 387 – 390.
9. 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.

10. Орлов С. П. Дозирующие устройства / С. П. Орлов. Из. 3-е (перераб. и доп.). – М. : Машиностроение, 1965. – 146 с.

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

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. Гончаревич И. Ф. Вибрация – нестандартный путь / И. Ф. Гончаревич. – М. : Наука, – 1986. – 209 с.

17. Повідайло В. О. Вібраційні процеси та обладнання: навч. посіб./ В. О. Повідайло. – Львів : Видавництво Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2004. – 248 с.

18. Потураев В. Н. Вибрационные транспортирующие машины / В. Н. Потураев, В. П. Франчук, А. Г. Червоненко. – М. : Машиностроение, 1964. – 271 с.

19. Шевчук Э. Г. Исследование фигуры выпуска сыпучих материалов под действием вибрации / Э. Г. Шевчук // Горный информационно-

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2002. – №9.

20. Бондарчук Д. В. Підвищення точності роботи об'ємних дозаторів сипких речовин / Д. В. Бондарчук // Технологічні комплекси. – 2010. – № 1. – С. 99 – 103.

21. Булгаков В.М. Плоскі вертикальні криві, що забезпечують постійні тиск і швидкість руху матеріальної точки. / Булгаков В.М., Пилипака С.Ф., **Яропуд В.М.**, Захарова Т.Н, **Калетнік Г.М.** / Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях». ВНАУ. 2014 р. –Вип. 1 (73).

22. Патент № 210672 RU Российской Федерации, В65G67/06, В65G3/07, В65D88/28, В65В1/08. Бункер для сыпучих материалов / Максимов В. А., Москвичев В. Д., Киричук В. Ф., Плотников А. Д., Козлов Е. И. – № 2016129/11 ; Заявл. 17.04.1974 ; Оpubл. 05.11.1976 ; Бюл. № 41. – 3 с.

23. Рогинский Г. А. Дозирование сыпучих материалов / Г. А. Рогинский; под ред. Б. И. Мордковича. – М. : Химия, 1978. – 176 с.

24. Булгаков В.М. Теоретична механіка. Посібник для практичних занять. (Під редакцією проф. С.І.Кучеренка). / В.М. Булгаков, В.В. Бурлака, **Г.М. Калетнік**, І.Є. Кравченко, С.І. Кучеренко, Д.І. Мазоренко, Л.М. Тіщенко, М.Г. Березовий. –Вінниця: Нова книга, 2010. –667 с.

25. Патент № 2176381 С1 Российской Федерации, G01F11/18, В65G1/08, В65G27/00. Вибрационный дозатор сыпучих материалов / Журавлев А.В., Каширин А. И. – № 2000101597/28 ; Заявл. 26.01.2000 ; Оpubл. 27.11.2001; Бюл. № 33. – 3 с.

26. Сивак Р.І.Короткий курс теоретичної механіки / **Р.І. Сивак, І.А.Деревенько.** –Вінниця: ТОВ «Вінницька міська друкарня», 2016. –200 с.

27. Патент № 56020 U України, G01F11/00. Дозатор важкосипких матеріалів / Плавинський В. І., Плавинська С. В., Плавинський Р. В. – № 201005012 ; Заявл. 26.04.2010 ; Оpubл. 27.12.2010 ; Бюл. № 24. – 2 с.

28. Патент № 82116 С2 України, В65G65/34. Вібраційний дозатор

сипких матеріалів / Лісовенко О. Т., Лісовенко І. О., Васильченко М. О.
– № 2219119 ; Заявл. 21.03.2006 ; Опубл. 11.03.2008 ; Бюл. № 13. – 2 с.

29. Патент № 6433 У України, В65G33/16. Гвинтовий вібраційний конвеєр / Гевко І. Б., Лящук О. Л. – № 20040806708 ; Заявл. 10.08.2004; Опубл. 16.05.2005 ; Бюл. № 5. – 2 с.

30. Патент № 91402 У 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.

31. Патент № 95528 У України, В65G27/08. Вібраційний живильник / Булат А. Ф., Дирда В. І., Пугач А. М., Пухальський В. М., Лисиця М. І. – № 201407942 ; Заявл. 14.07.2014 ; Опубл. 25.12.2014 ; Бюл. № 24. – 4 с.

32. Патент № 40430 У України, В07В1/12. Вібраційний конвеєр-класифікатор / Коваленко А. В., Фалько О. Л., Заплетніков І. М. – № 200812452 ; Заявл. 23.10.2008 ; Опубл. 10.04.2009 ; Бюл. № 7. – 2 с.

33. Патент № 68354 У України, E21F13/08, В65G27/32. Вібраційний секціонований живильник з бічним розвантаженням / Монастирський В. Ф., Виноградов В. В., Максютенко В. Ю., Лисиця М. І., Кірія Р. В., Брагінець Д. Д., Мостовий Б. І. – № 201109861 ; Заявл. 08.08.2011 ; Опубл. 26.03.2012 ; Бюл. № 6. – 4 с.

34. Патент № 41216 А України, В65G27/00. Вібраційний транспортер / Гаврильченко О. В., Понятовський В. В., Кулібаба О. В. – № 2001042358; Заявл. 09.04.2001 ; Опубл. 15.08.2001 ; Бюл. № 7. – 3 с.

35. 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.

36. Шушпанников А. Б. Обоснование выбора вибропривода для винтовых смесителей / А. Б. Шушпанников // Техника и технология пищевых производств. – 2011. – №1 (20). – С. 1 – 6.

37. Банніков Д. О. Сипучий матеріал в ємнісній конструкції / Д. О. Банніков. – Дніпропетровськ : Нова ідеологія, 2009. – 171 с.
38. Гячев Л. В. Основы теории бункеров и силосов : уч. пособ. / Л. В. Гячев. – Барнаул : АлтПИ, 1986. – 84 с.
39. Зенков Р. Л. Механика насыпных грузов / Р. Л. Зенков. – М. : Машиностроение, 1964. – 215 с.
40. Зенков Р. Л. Бункерные устройства / Л. В. Гячев, Г. П. Гриневич, В. С. Исаев. – М : Машиностроение, 1977. – 221 с.
41. Алферов К. В. Бункерные установки. Проектирование, расчет и эксплуатация / К. В. Алферов, Р. Л. Зенков. – М. : Машгиз, 1955. – 305 с.
42. Kache G. Ausfliessen eines kohäsiven, hochdispersen Pulvers / G. Kache, J. Tomas // Süttgut. – 2010. – №6. – S. 246–252.
43. Kupchuk I.M. Verification of the mathematical model of the energy consumption drive for vibrating disc crusher / **I.M. Kupchuk, O.V.Solona, I. A. Derevenko, I.V.Tverdokhlib** // INMATEH – Agricultural Engineering. – 2018. – Vol. 55, No. 2 – P. 113 – 120.
44. Schulze D. Pulver und Schüttgüter: Fließeigenschaften und Handhabung / D. Schulze. – Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag, 2006. – 513 s.
45. Schulze D. Fließeigenschaften von Schüttgütern und verfahrenstechnische Siloauslegung / D. Schulze // Chweddes + Schulze Schüttguttechnik. – 2005.
46. Пирожков Д. Н. Механико-технологические основы создания кормоприготовительных машин с вибрируемым зернистым слоем : автореф. дисс. д-ра техн. наук : 05.20.01 / Д. Н. Пирожков. – Барнаул : Алтайс. гос. аграр. ун-т., 2012. – 34 с.
47. Кривотулов А. В. Движение материальной частицы по вибрирующей шероховатой поверхности / А. В. Кривотулов, Г. С. Корнеева, М. С. Попов, А. А. Пасько // Труды ТГТУ. – 2009. – Вып. 22. – С. 63 – 67.
48. Ловейкін В. С. Віброреологічні характеристики твердих мінеральних добрив при їх вібраційному переміщенні у конусних бункерах / В. С.

Ловейкін, Ю. В. Човнюк, А. І. Дитюк // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – №3. – С. 110 – 113.

49. Заика П. М. Вибрационное перемещение твёрдых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах / П. М. Заика. – Киев : Изд-во УСХА, 1998. – 626 с.

50. Федоренко И. Я. Численное моделирование процесса безотрывного виброперемещения частицы / И. Я. Федоренко, А. С. Федоренко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – №7. – С. 131 – 135.

51. 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.

52. Василенко П. М. Теория движения частицы по шероховатым поверхностным сельскохозяйственных машин / П. М. Василенко. – К. : УАСХН, 1960. – 284 с.

53. Блехман И. И. Вибрационное перемещение / И. И. Блехман, Г. Ю. Джанелидзе. – М. : Наука, 1964. – 410 с.

54. Русанов С. А. Некоторые теоретические аспекты процесса виброкипения / С. А. Русанов, К. В. Луняка, В. А. Ардашев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2007. – №6/5. – С.23 – 25.

55. Русанов С. А. Дослідження процесу віброкипіння дисперсних середовищ / С. А. Русанов, К. В. Луняка, П. В. Смагін // Вісник Хмельницького національного університету. – 2007. – №1. – С.132 – 141.

56. Русанов С. А. Взаємодія віброкиплячого шару з несучими поверхнями / С. А. Русанов, К. В. Луняка, Г. М Глухов, О. І. Ключев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2009. – № 5/5. – С. 9 – 13.

57. Русанов С. А. Математичне моделювання процесу віброкипіння сипких середовищ / С. А. Русанов, К. В. Луняка, В. В. Карманов //

Математичне моделювання процесу віброкипіння сипких середовищ // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2009. – № 1. – С. 32 – 40.

58. 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.

59. Касьянов Н. А. Математическое моделирование движения смеси огнетушащего порошка с воздухом / Н. А. Касьянов, А. А. Колибабчук // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2010. – №12. – Частина 2. – С. 74 – 80.

60. Ковтун В. Ф. Условия существования виброоживленного слоя в импульсном смесителе / В. Ф. Ковтун // Химия и химическая технология. – 2009. – Вып. 8. – С. 101 – 102.

61. Максимов Е. В. Исследование истечения сыпучих материалов в сводных условиях / Е. В. Максимов, К. С. Бекбаев, Б. К. Тарабаев, А. С. Бердыгожин, Т. М. Жакупов // Вестник науки Казах. агротехн. ун-т. им. С. Сейфуллина. – 2012. – № 4. – С. 94 – 98.

62. Патрин В. А. Имитационная математическая модель процесса передачи энергии в обрабатываемую зерновую среду от рабочих органов сортировальных машин / В. А. Патрин, А. В. Патрин, В. А. Крум // Вестник НГАУА. – 2012. – № 2. – С. 117 – 123.

63. Богданов Э. В. Обґрунтування технологічного процесу та розробка конструкції вібраційного дозатора мобільного комбікормоприготувального агрегату : автореф. дис. к-та техн. наук : 05.05.11 / Богданов Э. В. – Луганськ: Луганськ. нац. аграр. ун-т., 2007. – 20 с.

64. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред / Р. И. Нигматулин. – М. : Наука, 1978. – 336 с.

65. Рахматулин Х. А. Газовая и волновая динамика / Х. А. Рахматулин.

– М. : МГУ, 1983. – 200 с.

66. Альтшуль А. Д. Гидродинамика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, П. Г. Кисилев. – М. : Госстройиздат, 1965. – 277 с.

67. Смыслов В. В. Гидравлика и аэродинамика : учеб. для вуз. / В. В. Смыслов. – К. : ВШ, 1979. – 416 с.

68. Тищенко Л. Н. Применение уравнения Бернулли к расчету движения зернового слоя на плоском наклонном виброрешете / Л. Н. Тищенко, В. П. Ольшанский // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – №3. – С. 110 – 113.

69. Локтионова О. Г. Динамика вибрационных технологических процессов и машин для переработки неоднородных гранулированных сред : автореф. дис. д-ра техн. наук : 01.02.06 / Локтионова О. Г. – Курск : ГОУ ВПО «Воронеж. гос. техн. ун-т», 2008. – 35 с.

70. Захаров Н. М. Об аналогии вибрируемого слоя с вязкой жидкостью / Н. М. Захаров // Доклады МИИСП. – 1966. – Т. 3. – Вып. 1. – С.201 – 210.

71. Косилов О. Н. Исследование поведение и вибровязких свойств сыпучих сельскохозяйственных материалов : автореф. дисс. канд. техн. наук / Косилов. О. Н. – Ростов-на-Дону : РИСХМ, 1966. – 20 с.

72. Федоренко И. Я. Критерии подобия гидродинамических моделей виброкипящего слоя сыпучего материала / И. Я. Федоренко, Д. Н. Пирожков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2005. – №1. – С. 105 – 108.

73. Тищенко Л. Н. Расчёт потока псевдооживленной зерновой смеси на виброрешете / Л. Н. Тищенко, В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский // Механіка та машинобудування. – 2009. – №1. – С. 33 – 43.

74. Ольшанский В. П. Гармонические колебания неоднородного псевдооживленного слоя зерна на плоском виброрешете / В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский // Вібрації в техніці та технологіях. – 2011. – №2. – С. 134 – 138.

75. Тищенко Л. Н. Колебания зерновых потоков на виброрешётах / Л. Н.

Тищенко, В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский. – Харків : Міськдрук, 2012. – 267 с.

76. Русанов С. А. Моделювання гідродинаміки віброкиплячого шару з розробкою утилізатора тепла сипких матеріалів : автореф. дис. к-та техн. наук : 05.17.08 / Русанов С. А. – Херсон : Херсон. нац. техн. ун-т., 2008. – 25 с.

77. Протодьяконов И. О. Гидромеханика псевдоожигенного слоя / И. О. Протодьяконов, Ю.Г. Чесноков. – Л. : Химия, 1982. – 264 с.

78. Членов В. А. / Виброкипящий слой / В. А. Членов, Н. В. Михайлов. – М. : Наука, 1972, – 343 с.

79. Пирожков Д. Н. Сведение гидродинамической модели виброожигенного сыпучего материала к системе Лоренца / Д. Н. Пирожков // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2008. – №8. – С. 59 – 65.

80. Федоренко И. Я. Использование модели Лоренца для описания процесса смешивания сыпучих материалов / И. Я. Федоренко, Д. Н. Пирожков, Р. А. Котов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2011. – №9. – С. 81 – 85.