

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННУТТ ім. акад. І.С. Гупою  
Кафедра мехатроніки та пакувальної техніки

«До захисту в ЕК»

Директор інституту(декан факультету)  
[підпис] Сергій Бедменко  
(підпис) (ім'я та прізвище)

« 12 » 02 2024р.

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри  
[підпис] Людмила Кривошея-Володіна  
(підпис) (ім'я та прізвище)

« 12 » 02 2024р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА

зі спеціальності 131 Прикладна механіка  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми Прикладна механіка

на тему: Дослідження параметрів технологічного процесу подати м'яких харчових продуктів в упаковку

Виконав: здобувач 2 курсу, групи ПМ-2-1М

Розумний Олег Володимирович [підпис]  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник Деремівська Анастасія Василівна [підпис]  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

Консультанти \_\_\_\_\_  
(ім'я та прізвище) (підпис)

\_\_\_\_\_ (ім'я та прізвище) (підпис)

\_\_\_\_\_ (ім'я та прізвище) (підпис)

Рецензент [підпис] Олександр ГАВВА  
(ім'я та прізвище) (підпис)

Я як здобувач(ка) Національного університету харчових технологій розумію і підтримую політику університету з академічної доброчесності. Я не надавав(-ла) і не одержував(-ла) незарядженої допомоги під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Здобувач [підпис]  
(підпис)

Київ - 2024р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) Навчально - науковий інженерно - технічний інститут ім. акад. І. С. Гулого

Кафедра мехатроніки та пакувальної техніки

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 131 Прикладна механіка

(код і назва)

Освітньо-професійна програма прикладна механіка

(назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри МПТ

Володимир Кривоплас  
«20» 11 2023 року ВОЛОДИМІР

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Розумного Олега Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження параметрів процесу подачі сипких харчових продуктів в упаковку

керівник роботи Деремівська Анастасія Василівна КТМ доц.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом закладу вищої освіти від «20» 11 2023 року № 940-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 05.02.2024р.

3. Вихідні дані до роботи 1. Вид досліджень - аналітичні, 2. Тип обладнання - для роботи із сипкими харчовими продуктами.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Вступ 2. Дослідження та Аналіз обладнання для накопичення, відгачі та подачі сипкої харчової продукції в зону пакування 3. Аналітичне дослідження технологічного процесу перемішування сипких харчових продуктів в зону пакування 4. Дослідження точності дозування 5. Висновки 6. Список використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація на 16 аркушах.



## Реферат

Сучасне виробництво харчових продуктів вимагає вдосконалення технологій упаковки, особливо коли мова йде про сипкі продукти. Правильний процес упаковки сипких харчових продуктів є ключовим для забезпечення якості продукції та задоволення потреб споживачів. Для досягнення цієї мети важливо дослідити та оптимізувати параметри цього процесу.

У магістерській роботі "Дослідження параметрів процесу подачі сипких харчових продуктів в упаковку" проведено комплексний аналіз та дослідження різних аспектів процесу упаковки сипких харчових продуктів. Починаючи з огляду та аналізу обладнання для накопичення, видачі та подачі продукту, дослідження охопило різні типи обладнання, їхні переваги та недоліки, що дало можливість встановити оптимальні рішення для конкретних виробничих умов.

Далі було проведено аналітичне дослідження технологічного процесу переміщення сипких харчових продуктів в зону пакування. Визначено вплив різних параметрів, таких як швидкість подачі, розмір часток продукту та тиск упаковки, на якість та ефективність упаковки. Результати аналізу свідчать про важливість правильного налаштування цих параметрів для забезпечення високоякісної упаковки продуктів.

Окремо було досліджено точність дозування під час процесу упаковки. Вивчено вплив різних факторів на точність дозування та розроблено рекомендації для оптимізації цього процесу.

Загальний висновок полягає в тому, що правильне налаштування та контроль параметрів процесу упаковки сипких харчових продуктів є важливим для досягнення високоякісної продукції. Результати дослідження вказують на необхідність подальших досліджень у цій сфері та розвитку інноваційних технологій упакування.

**Ключові слова:**

Сипкі харчові продукти, упаковка, обладнання, технологічний процес, точність дозування.

## **Abstract**

Modern food production requires the improvement of packaging technologies, especially when it comes to loose products. The correct packaging process for loose food products is key to ensuring product quality and meeting consumer needs. To achieve this goal, it is important to investigate and optimize the parameters of this process.

In the master's thesis "Investigation of the parameters of the process of feeding loose food products into packaging" a comprehensive analysis and study of various aspects of the process of packing loose food products was carried out. Starting with the review and analysis of the equipment for the accumulation, dispensing and feeding of the product, the study covered different types of equipment, their advantages and disadvantages, which made it possible to establish optimal solutions for specific production conditions.

Next, an analytical study of the technological process of moving loose food products to the packaging area was conducted. The influence of various parameters, such as feed rate, product particle size, and packaging pressure, on packaging quality and efficiency was determined. The results of the analysis indicate the importance of the correct setting of these parameters to ensure high-quality product packaging.

The accuracy of dosing during the packaging process was separately investigated. The influence of various factors on dosing accuracy was studied and recommendations were developed to optimize this process.

The overall conclusion is that proper setting and control of bulk food packaging process parameters is essential to achieve high quality products. The results of the study indicate the need for further research in this area and the development of innovative packaging technologies.

### **Keywords:**

loose food products, packaging, equipment, technological process, dosage accuracy.

## Зміст

Вступ .....	4
1. Дослідження та аналіз обладнання для накопичення, видачі та подачі сипкої харчової продукції в зону пакування.....	6
1.1 Огляд сипких харчових продуктів та їх класифікація.....	6
1.2 Бункери .....	6
1.3 Живильники .....	14
1.4 Дозувально-фасувальні модулі.....	30
1.5 Транспортні системи .....	33
1.6. Пристрої для ущільнення СХП в пачці.....	35
2. Аналітичне дослідження технологічного процесу переміщення сипких харчових продуктів в зону пакування .....	37
3. Дослідження точності дозування.....	57
Висновок.....	86
Список використаної літератури.....	87

## ВСТУП

Сьогодні упаковка увійшла в наш побут настільки, що паковані продукти харчування і товари народного споживання є звичним явищем. А так як упаковка здебільшого принесена ринком з інших країн, то її значення і вплив на побут населення і довкілля сприймається недостатньо усвідомлено.

Практика свідчить, що стан пакувальної справи в країні визначає її розвиток. Тому не дивно, що на сьогодні місткість світового ринку упаковки становить більш ніж \$500млрд. Але 80% усієї упаковки сьогодні використовує менш ніж 20% населення земної кулі. Багато країн потерпає від різних лихоліть, а народи цих країн голодують, мають низький рівень життя, велику смертність. Саме це спонукає весь світ шукати нові й нові заходи, які зможуть не тільки продовжити життя на Землі, а й зробити його більш привабливим. А для досягнення цієї ідеї потрібно працювати щонайменше у трьох напрямках:

1. Показувати та доводити усім, що упаковка це більш ніж зберігання та постачання продуктів чи товарів. Упаковка – це можливість ефективно реалізувати потенціал нашої планети для досягнення високого рівня життя тих 80% населення земної кулі, які його не мають.

2. Змінювати психологію багатьох і доводити, що виготовлена з розумом та вмінням упаковка враховує питання екології та економічності нашого життя.

3. Впроваджувати сучасні пакувальні технології в країнах, що розвиваються, для більш ефективного використання ресурсів планети.

Сучасна упаковка стала показником ефективного виробництва, стабільного бізнесу та впевненого поведження на ринках збуту. Вітчизняний виробник, підприємець, бізнесмен усе частіше віддають належне розвитку галузі пакування, розуміючи, що сьогодні упаковка – це не лише пляшки та коробки, якими ми користуємось тимчасово, а що це сучасний шлях для подальшого збереження природних ресурсів та покращення життя людей.

Поява на нашому ринку сучасних технологій дає надію на розвиток вітчизняного пакувального виробництва, яке тільки завдяки конкуренції може заявити про себе, виробляючи те, що сьогодні потребує український споживач. Автоматизація виробничих процесів, зростання значення споживача на ринку, перетворення ринку виробника на ринок споживача, надзорства конкуренція спонукали виробничі компанії та фірми шукати нові конструкції упаковки, пакувальні матеріали, технології та нове обладнання. Кожне підприємство на етапі свого розвитку намагається зайняти високу позицію саме за рахунок випуску конкурентоспроможної продукції. Цього можна досягнути як за рахунок випуску нової за рецептурою продукції та використання принципово нових видів упаковки.

Підвищення точності фасування сипких продуктів є актуальною задачею, вирішення якої зменшує ризики виробника й покупця у переробній і харчовій промисловості, сільському господарстві, будівництві, торгівлі. Після тотального переходу при ваговому дозуванні на тензометричні давачі і пневматику, які забезпечують максимальну швидкість керування виконавчими елементами, фактично не виконувалися системні дослідження проблем підвищення точності дозування як взагалі. Разом з тим, використання лише тензометричних давачів дає не дуже значний вигравш у точності тому, що проблема підвищення точності є комплексною. Зокрема, для узгодження продуктивності дозатора й пакувальника застосовують багатоканальні дозатори, нерівномірність роботи яких накладає специфічні відбитки на точність фасувальних систем. Специфікою є й домінування динамічної складової похибки дозування. Це дозволяє стверджувати, що ступінь дослідження даної тематики явно недостатній, а проблеми досліджень і розробок в області підвищення точності дозаторів є актуальними.

## **РОЗДІЛ 1. Дослідження та аналіз обладнання для накопичення ,видачі та подачі сипкої харчової продукції в зону пакування**

### **1.1 Огляд сипких харчових продуктів та їх класифікація**

Інколи для попереднього прийняття рішення щодо способу дозування і конструкції дозувального пристрою користуються спрощеною класифікацією сипучої продукції залежно від її гранулометричного складу. Так сипуча продукція поділяється умовно на чотири основні групи.

Перша група об'єднує порошкову продукцію з розміром частинок 0,02–0,6 мм. Для дозування цієї продукції найбільш широко застосовуються шнекові дозатори.

До другої групи сипучої продукції належать подрібнена продукція з розмірами частинок в межах 0,6–6 мм. Для дозування цієї групи продукції широке застосування дістали дозатори об'ємного типу (стаканчикові, маятникові, шибєрні).

Третя група об'єднує сипучу продукцію з розмірами частинок близько 6 мм і більше. Для дозування такої продукції застосовують вагові дозатори лінійного типу.

Четверта група об'єднує продукцію складної та крихкої форми ( чіпси та.ін. )

### **1.2. Бункери**

Занадто довго бункери вважалися неважливим і дешевим обладнанням у порівнянні з системами млинів і печей. Вони розглядаються лише як прості контейнери, які повинні бути заповнені продуктом для зберігання з метою, щоб цей продукт міг бути відновлений пізніше в заданий час з постійною швидкістю. Фізичні характеристики продукту, як правило, ігноруються при проектуванні бункера, за винятком кута природного укосу, який, можливо, враховується шляхом використання дещо крутішого нахилу стінки для розвантажувального бункера бункера. Основним критерієм проектування було оптимальне використання певної території. Тож не дивно, що робота

багатьох установок бункерів все ще погіршується через надто плоскі бетонні розвантажувальні бункери, сконструйовані із занадто малим вихідним отвором і обладнані невідповідними живильниками. Проблеми з роботою, такі як нестабільний або навіть переривчастий потік продукту з бункерів із зв'язаними сипучими речовинами, промивання живильників порошками, сегрегація продукту та неповне спорожнення, що призводить до зменшення робочої ємності бункера, є звичайним досвідом і дуже часто вважаються неминучими. Використання кувалди та стрижнів є добре відомими, але неефективними засобами для компенсації несприятливих наслідків недбалої та невмілої конструкції контейнера. Слід зазначити, що ставлення цементної промисловості до конструкції бункерів принципово змінилося за останні п'ятнадцять років. Сучасні процедури випробувань (наприклад, випробування на зсув) і концепції дизайну (масова витрата) більше не ігноруються, а приймаються.

Розмір і геометрія бункера залежать від функціональних вимог, таких як обсяг зберігання, метод і швидкість вивантаження, властивості матеріалу, що зберігається, доступний простір і економічні міркування. Бункери зазвичай складаються з вертикальної секції з плоским дном або дна з похилими сторонами, відомого як бункер (рис. 1.1). Вони зазвичай круглі, квадратні або прямокутні в поперечному перерізі і можуть бути розташовані поодиночці або групами. Круглі бункери є більш ефективними конструкціями, ніж квадратні або прямокутні бункери, що призводить до зниження витрат на матеріали. За такої ж висоти квадратний контейнер забезпечує на 27% більше місця для зберігання, ніж круглий ящик, діаметр якого дорівнює довжині сторони квадратного контейнера. Бункери з плоским дном вимагають меншої висоти для заданого об'єму матеріалу, що зберігається.

Розмір бункера визначається швидкістю подачі та вивантаження, а також максимальною кількістю матеріалу для зберігання. Для високої швидкості вивантаження потрібні глибокі бункери з крутими стінками. Контейнери з плоским дном зазвичай мають низьку швидкість розряду і використовуються,

коли час зберігання тривалий, розрядження відбувається рідко, а обсяг зберігання великий.

Співвідношення висоти бункера до діаметра впливає на навантаження від матеріалу, що зберігається, і, отже, на конструкцію конструкції. Присадкуваті контейнери визначаються як такі, висота яких не перевищує 1,5 діаметра або найменшої довжини сторони. Тонкі бункери мають відношення висоти до діаметра більше 1,5.

Бункери зазвичай конічної, пірамідальної або клиновидної форми. Перевага пірамідальних бункерів полягає в тому, що вони прості у виготовленні, хоча вони можуть призвести до проблем з потоком через накопичення матеріалу, що зберігається, у кутах. Випускні отвори можуть бути концентричними або ексцентричними відносно центру бункера. Слід уникати ексцентричних виходів, оскільки розподіл тиску важко передбачити, і можуть виникнути проблеми через сегрегацію матеріалу, що зберігається. Кут нахилу бортів бункера вибирається так, щоб забезпечити безперервне вивантаження з необхідною схемою потоку.

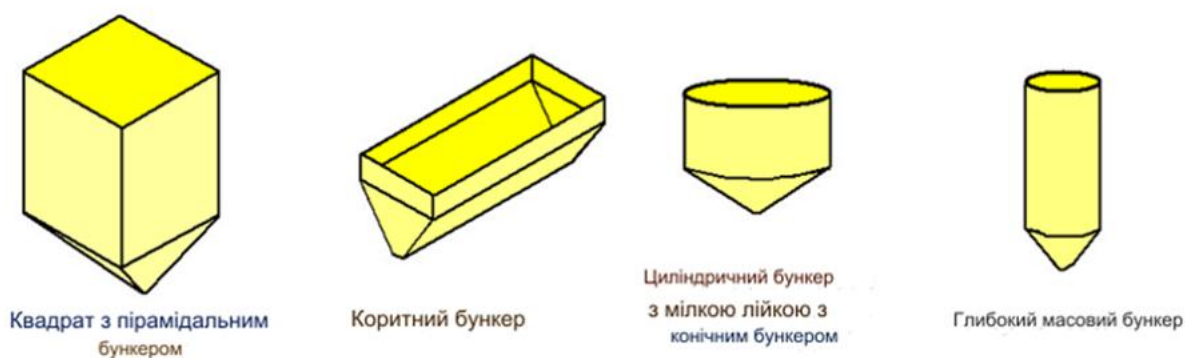


Рис. 1.1. Геометрія бункерів

Стало очевидним, що модель потоку можна класифікувати на два типи: воронкоподібний потік і масовий потік. Ці два різні режими потоку (рис. 1.2) можна спостерігати, якщо сипучий твердий матеріал вивантажується з силосу. У разі масового потоку (рис. 1.2)

а) весь вміст силосу рухається під час вивантаження. Масовий потік можливий, лише якщо стінки бункера є достатньо крутими та/або гладкими, а сипкі тверді речовини вивантажуються через весь вихідний отвір. Якщо стінка

бункера занадто плоска або шорстка, з'явиться лійка. У разі воронкоподібного потоку (рис. 1.3)

б) першим рухається лише те сипуче тіло, яке розташоване в області більш-менш над вихідним отвором. Насипне тверде тіло, що прилягає до стінок бункера, залишається в спокої і називається «мертвою» або «застійною» зоною. Цю сипучу речовину можна вивантажити лише тоді, коли силос повністю спорожнено. Мертві зони можуть досягати поверхні сипучого твердого заповнення, так що воронковий потік стає очевидним при спостереженні за поверхнею. Також можливо, що мертві зони розташовані лише в нижній частині силосу, тому воронковий потік неможливо розпізнати, спостерігаючи за поверхнею заповнення силосу.

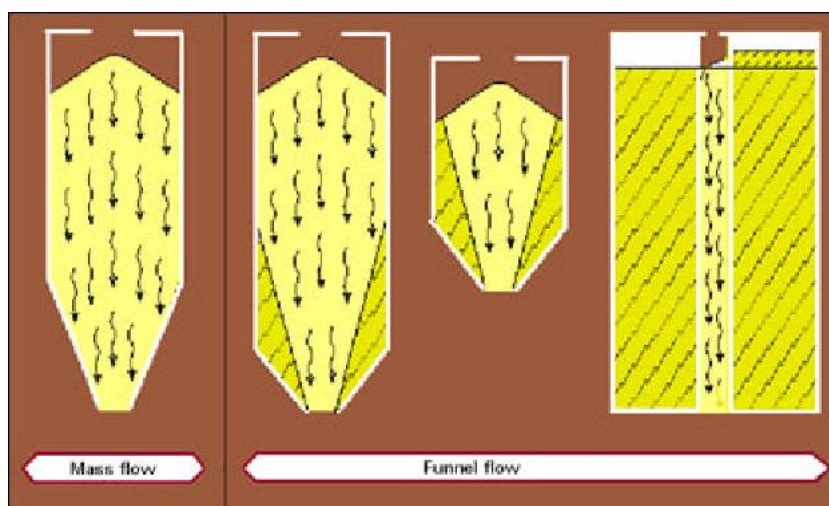


Рис. 1.2. Режими потоку (шаблони)

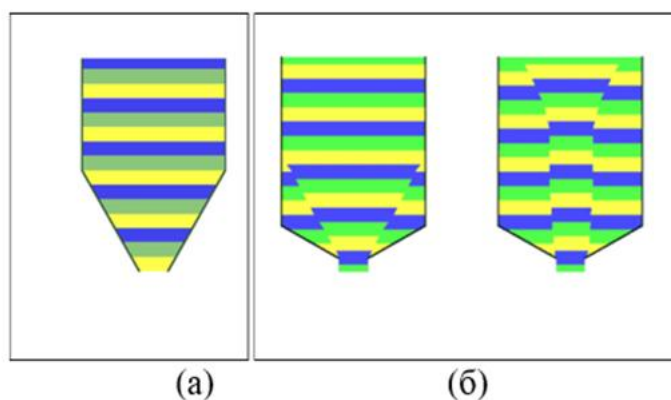


Рис. 1.3. (а) Масовий потік (б) Потік воронки

Існує два основних і різних типи потоку твердих речовин у бункерах: масовий потік і потік воронки. Існує також окремий випадок, який є

комбінацією цих двох потоків, який називається розширеним потоком. Ці потоки отримали свої назви завдяки тому, як тверді речовини рухаються в бункерах. Характеристики та відмінності між трьома режимами потоків (воронка, маса та розширений) зображені нижче.

Тип потоку (рис. 1.4), де частина продукту в силосі знаходиться в стані спокою (застійні зони), називається воронковим потоком або основним потоком. Воронковий потік застосовний лише для грубих (сипучих продуктів), де старіння або розпад неважливі. У всіх інших випадках повинна відбуватися масова витрата.

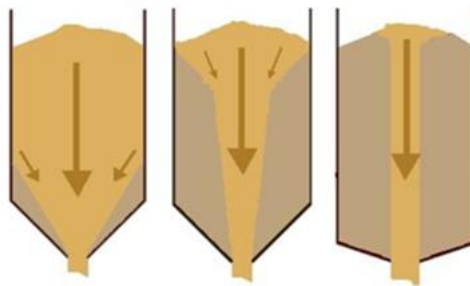


Рис. 1.4. Бункер типу воронкового потоку

Під час заповнення бункера продукт завжди буде розділятися: грубе зерно скочуватиметься вниз по схилу купи поверхні до кола бункера, тоді як дрібні фракції переважно накопичуватимуться в центрі бункера. Розвиток схеми потоку в бункерах лійчастого типу залежить від характеристик потоку продукту, співвідношення швидкості подачі та швидкості вивантаження та розташування подачі відносно розвантажувального отвору. При відкритті вихідного отвору бункера лійчастого типу продукт буде текти лише у вузькій серцевині, яка утворюється трохи вище вихідного отвору бункера, тоді як навколишній продукт залишається в спокої. Об'ємний розряд твердих речовин є, по суті, нерегулярним щодо швидкості та щільності. Бункери лійкоподібного типу зазвичай не можна спорожнити повністю, що призводить до зменшення робочої ємності. Порядок вивантаження інвертується порівняно з порядком завантаження, тобто бункер показує послідовність потоку «перший увійшов – останній вийшов».

За умов відсутності подачі продукт, який буде вивантажуватися першим,

є дрібним продуктом із центральної зони бункера. Після цього поверхня продукту перетвориться з ворсистої на воронкоподібну; рівень продукту в бункері знизиться. Оскільки грубі частинки з окружності бункера тепер скочуються вниз по схилу до центру, гранулометрія вивантаженого продукту змінюється з дрібної на грубу. Весь продукт навколо центрального ядра залишається в спокої. Порядок вивантаження інвертується порівняно з порядком завантаження, тобто бункер показує послідовність потоку «перший увійшов – останній вийшов».

Якщо швидкість подачі перевищує швидкість вивантаження, рівень продукту в бункері зростає, поверхня продукту зберігає форму купи, а дрібна частина продукту переважно виводиться, оскільки всі грубі частинки скочуються вниз по схилу купи. Весь продукт, що оточує центральне ядро, залишається в спокої.

У випадках, коли швидкість подачі та швидкість вивантаження однакові, рівень продукту в бункері та форма поверхні продукту залишатимуться постійними. Продукт не поділяється під час годування, оскільки він проходить безпосередньо до вихідного отвору бункера через активоване центральне ядро. Знову весь продукт, що оточує центральне ядро, залишається в спокої.

(Рис.1.5) показані різноманітні конструкції воронкоподібних бункерів.

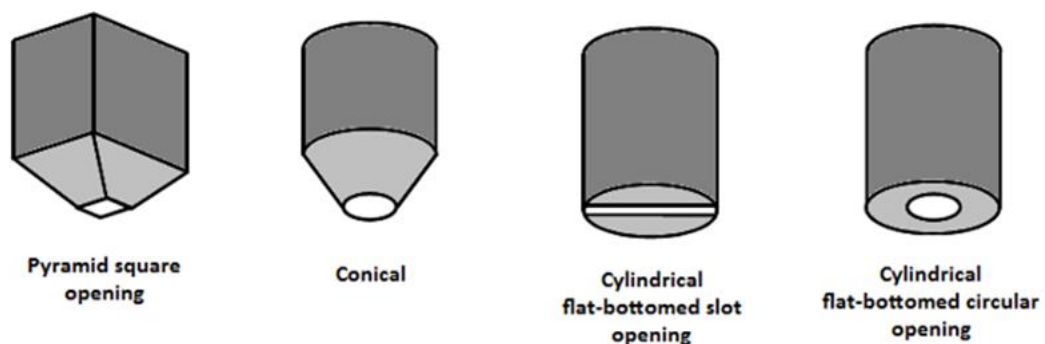


Рис. 1.5. Загальні конструкції воронкоподібних бункерів

Типовими характеристиками масових бункерів є витончена форма, круті нахили стінок розвантажувального бункера та відносно великі вихідні отвори. Типові форми бункерів масового потоку показані на (рис. 1.6).



Рис. 1.6. Бункер масового потоку

Розділення продукту під час заповнення бункера типу масового потоку не можна запобігти, оскільки грубе зерно скочується вниз по схилу купи до окружності бункера, тоді як дрібні фракції будуть переважно накопичуватися в центрі бункера. Схема потоку, яка розвивається в бункері масового потоку, значно відрізняється від бункера лійчастого типу. У бункерах масового потоку весь продукт, що зберігається, активується та рухається до вихідного отвору бункера щоразу, коли продукт вивантажується. Це призводить до моделі потоку «перший увійшов – перший вийшов». Бункери типу масового потоку зазвичай можна повністю спорожнити за рівномірної швидкості вивантаження. (Рис. 1.7) показує деякі з найбільш поширених конструкцій бункерів масового потоку.

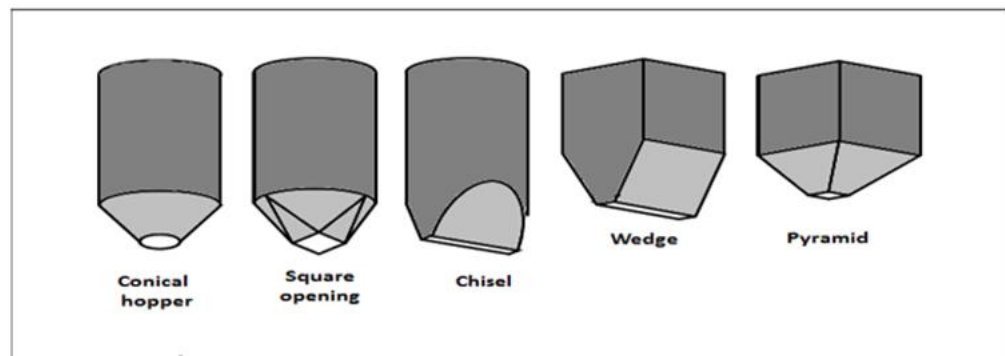


Рис. 2.7. Загальні конструкції для масових бункерів

Продуктивність бункерів і силосів для сипучого зберігання залежить від характеру їхнього вмісту, тому в першу чергу слід звернути увагу на фізичні властивості з огляду на експлуатаційні вимоги системи.

Основною особливістю конструкції є форма режиму потоку, який має бути створений, сумісний із продуктом(ами), що визначає порядок зони викиду вмісту. Якщо обладнання містить пристрій подачі або розвантажувальний пристрій для сприяння або контролю потоку, це слід розглядати як невід'ємну функцію з секцією зберігання при визначенні схеми вилучення.

Основний вибір лежить між моделлю **«масового потоку»**, де весь вміст рухається під час викиду (хоча рідко з однаковою швидкістю), і формою **«воронкового потоку»**, де потік обмежується вузьким потоком. канал від вихідного отвору до поверхні матеріалу або комбінація локальних ділянок обох, що називається **«розширеним потоком»**. Воронкоподібний потік і розширення зазвичай витягують продукт із поверхневих шарів, поступово стікаючи, утворюючи **«кут дренажного конуса»**. Вплив цієї останньої схеми полягає в тому, що щойно завантажений матеріал спустошується раніше, ніж раніше заповнений продукт, який залишається в області, що оточує канал потоку. У деяких випадках у режимі воронкового потоку або розширеного потоку розширюється до боків контейнера, перш ніж досягти поверхні зберігання. Це не питання вибіркового вибору, а наслідкова модель, яка називається **«змішаний потік»**. Це має зовнішній вигляд поверхні, схожий на масовий потік, але, незважаючи на структурні наслідки для напружень стінки, зазвичай не має експлуатаційного значення.

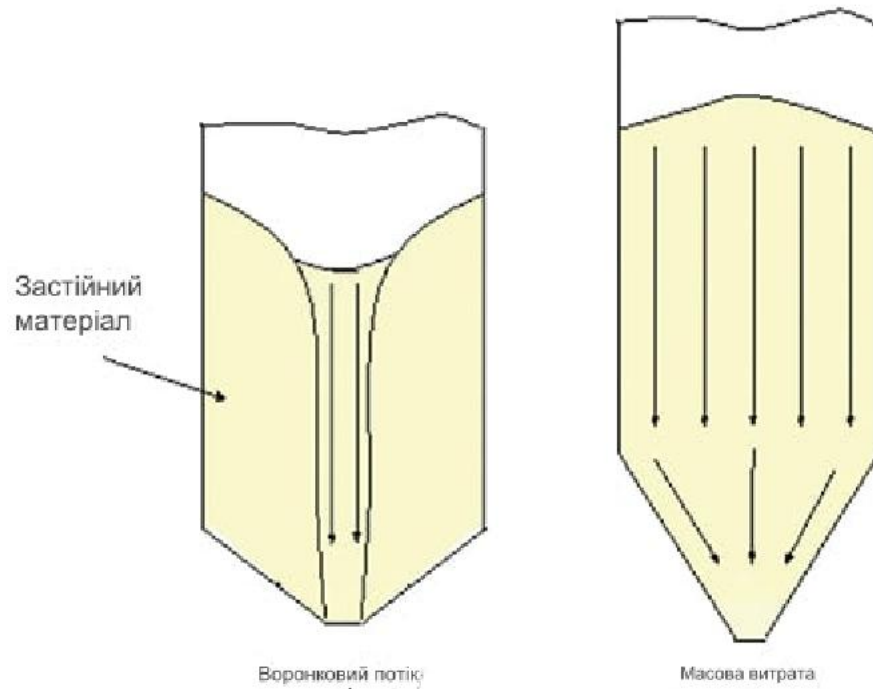


Рис. 1.8. Коли сипучі тверді речовини вивантажуються з бункера, бункера або силосу, можуть виникнути два типи схем потоку: типова схема потоку воронки показана ліворуч, а схема масового потоку – праворуч.

У бункері або силосі можуть відбуватися дві основні моделі потоку: масовий потік і потік воронки (рис.1.8). У масовому потоці весь шар твердих речовин перебуває в русі, коли матеріал виходить із вихідного отвору. Така поведінка усуває утворення застійних ділянок у посудині та забезпечує послідовність потоку «перший увійшов, перший вийшов», що забезпечує більш рівномірний профіль швидкості під час роботи. Рівномірний профіль швидкості також допомагає зменшити вплив сегрегації при просіюванні.

### 1.3. Живильники

Якщо бункер не розвантажується самопливом, у цьому випадку встановлений тип клапана, який відкриває та закриває вихідний отвір, потрібна певна форма контролю випускного отвору. Контроль швидкості подачі шляхом часткового відкриття випускного клапана є практичним лише для матеріалів, що вільно течуть, придатних для режиму потоку воронки, оскільки будь-яке обмеження частини зведе нанівець структуру масового потоку через блоковану область, яка стримує статичну область продукту.

Годівниці є невід'ємною частиною загальної конструкції бункера, який слід розглядати як єдину систему. Незважаючи на додаткову вартість для програми, вони надають засоби для точного контролю швидкості виходу, забезпечують багато переваг процесу та впливають на форму потоку.

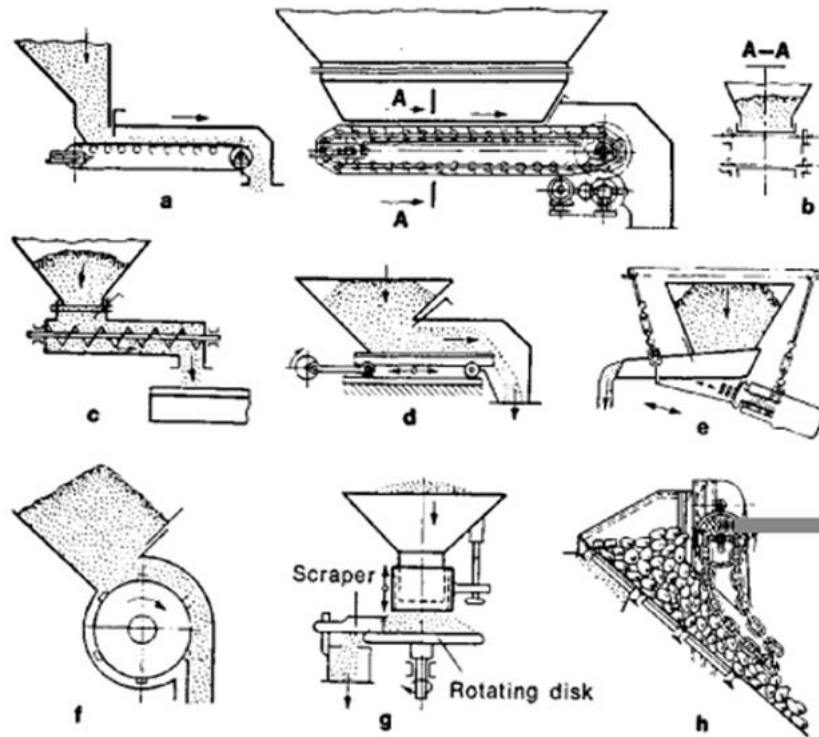


Рис. 1.9 (а) пояс, (b) фартух, (c) гвинт, (d) струшування, (e) вібрація, (f) барабан, (g) диск, (h) ланцюг

### Типи живильників для обробки сипучих речовин:

Живильники для контролю потоку сипучих речовин на конвеєрні стрічки вимагають відповідності певним критеріям:

- 1) Забезпечте необхідний діапазон витрат.
- 2) Обробка діапазону розмірів частинок або грудок і очікуваних характеристик текучості.
- 3) Забезпечте стабільну швидкість потоку для даного налаштування обладнання. Дозвольте легко змінювати швидкість потоку в необхідному діапазоні, не впливаючи на продуктивність бункера або бункера, з якого він подається.
- 4) Подайте матеріал на стрічку в правильному напрямку з правильною

швидкістю з правильною характеристикою навантаження та за умов, які спричиняють мінімальний удар, знос і погіршення якості продукту. Часто для досягнення цих цілей разом із годівницею використовується кормовий жолоб.

5) Вписатися в доступний простір.

Важливо, щоб схема потоку була такою, щоб весь випуск бункера подачі був повністю активним. Це має фундаментальне значення у випадку масових бункерів. При подачі вздовж щілинних випускних отворів у клиноподібних бункерах підтримка повністю активного вихідного отвору вимагає збільшення потужності живильника в напрямку подачі. Щоб досягти цієї умови, особливу увагу необхідно приділити конструкції вихідного отвору, оскільки вертикальні спідниці та контрольні ворота часто можуть звести нанівець ефект кінчного випуску. Вентилі слід використовувати лише як пристрої для регулювання потоку, а не як регулятори витрати. Контроль швидкості потоку повинен бути досягнутий зміною швидкості живильника. У цементній промисловості використовуються та модифікуються різні типи живильників для подачі сипучих матеріалів на стрічкові конвеєри.

Існує багато механізмів для розподілу сипких компонентів. Деякі важливі типи описані нижче:

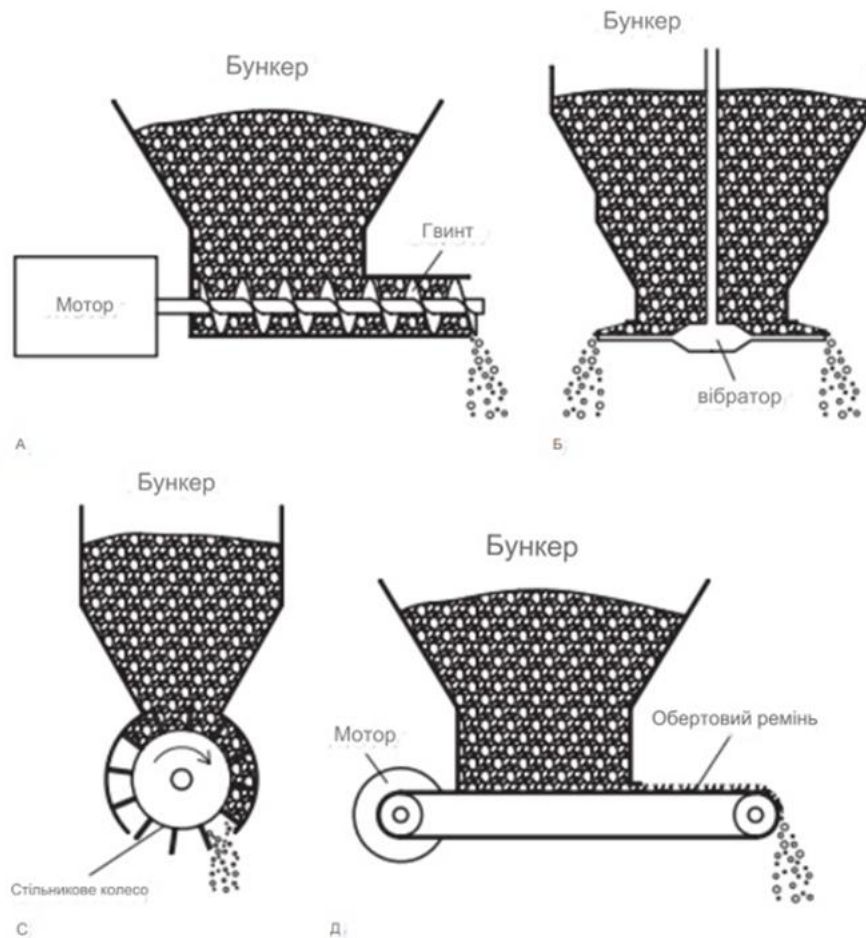


Рис.1.10.Різні типи механізмів розподілу корму: (а) шнековий пристрій подачі; (б) вібраційний живильник; (с) живильник клітинного колеса; (д) стрічковий живильник, що обертається.

*Шнек*: шнек дозволяє подавати певну партію продукту для кожного оберту. Шнек встановлений під бункером, з якого він заповнюється. Кількість, що виділяється за одиницю часу, залежить від діаметра шнека, конструкції шнека (зростання різьби шнека), швидкості обертання, ступеня наповнення та кута шнека.

Вібраційні живильники:

Вібраційні живильники широко використовуються для контролю вивантаження сипучих речовин із бункерів і складів і направлення цих матеріалів на конвеєрні стрічки. Вони особливо підходять для широкого

діапазону сипких речовин, здатні вмщати різні розміри частинок і особливо підходять для абразивних матеріалів. Однак вони, як правило, не підходять для дрібних порошоків розміром менше 150-200 меш, де затоплення може бути проблемою. Крім того, «липкі» когезійні матеріали можуть призвести до накопичення на піддоні, що призведе до зменшення швидкості потоку. Сипучі речовини транспортуються вздовж лотка живильника в результаті вібраційного руху, що надається часткам (рис. 1.11). Піддон годівниці рухається приблизно синусоїдально під деяким кутом тета до жолоба. Швидкість транспортування та пропускна здатність залежать від частоти приводу живильника, амплітуди або ходу, кута приводу та нахилу жолоба, коефіцієнта тертя між сипучою речовиною та піддоном, а також параметрів сипучої речовини, таких як об'ємна щільність, щільність частинок та загальні характеристики потоку.

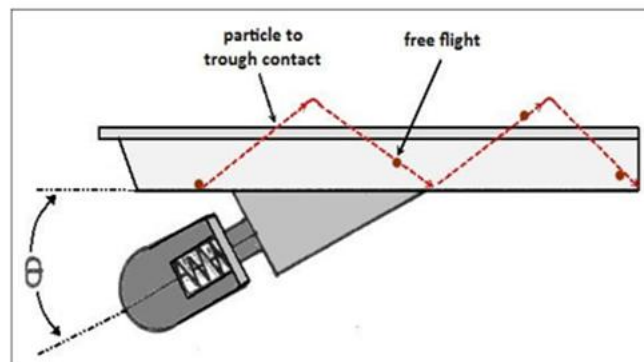


Рис. 1.11. Рух частинок шляхом вібрації

Загалом вібраційні живильники класифікуються як «груба сила» або «налаштовані» залежно від того, як рушійна сила передає рух піддону.

Як впливає з назви, годівниці типу «грубої сили» передбачають застосування рушійної сили безпосередньо до піддону (рис. 1.12.). Ці годівниці мають такі характеристики:

- а) Менша початкова вартість, але вищі експлуатаційні витрати.
- б) Більші сили, які необхідно врахувати в конструкції.
- с) Ударне навантаження на чашу передається на підшипники, на яких обертаються незбалансовані тягарці.

d) Швидкість доставки залежить від навантаження живильника через сипучі речовини.

e) Зазвичай обмежується додатками, що вимагають лише однієї швидкості подачі.

З іншого боку, «налаштовані» вібраційні живильники є більш складними у своїй роботі, оскільки рушійна сила передається на піддон через сполучні пружини (рис. 1.13). Таким чином вони діють, по суті, як вібраційна система з двома масами та використовують принцип збільшення сили, щоб надати руху каструлі. Основна рушійна сила створюється або електромагнітом, або обертовою незбалансованою системою мас.

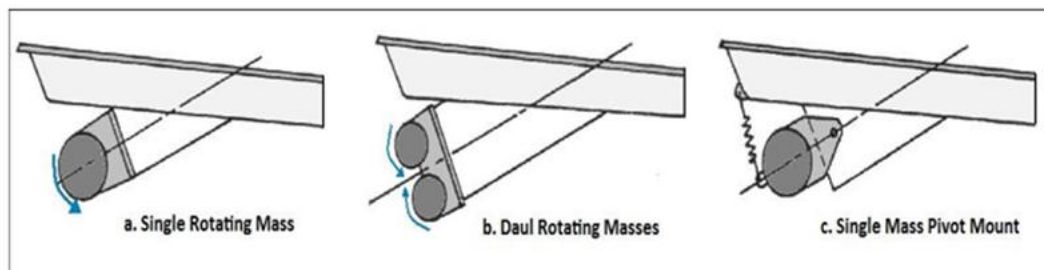


Рис. 1.12. Вібраційні живильники грубої сили

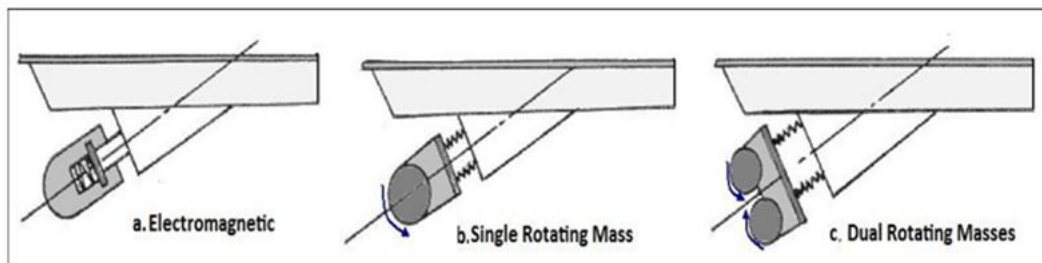


Рис. 1.13. Вібраційні живильники налаштованого типу.

Є кілька аспектів, на які слід звернути увагу при проектуванні кормових бункерів для використання з вібраційними живильниками. Ефективність живильника (як і всіх інших годівниць) значною мірою залежить від бункера, який повинен бути здатний безперебійно подавати матеріал до живильника.

Для симетричного бункера існує тенденція до того, що живильник забирає матеріал переважно з передньої частини бункера. Рівномірного витягування можна досягти, зробивши вихідний отвір бункера асиметричним із задньою стінкою бункера під правильним напівкутом ( $\alpha$ ) і передньою стінкою під кутом  $\alpha + (5^\circ \text{ до } 8^\circ)$ .

В якості альтернативи симетричний бункер може бути виготовлений для приблизно рівномірної подачі, використовуючи більш грубий підкладковий матеріал на передній поверхні. Інші рекомендації (рис. 1.14) включають:

- a) Розмір  $E$  повинен бути не менше 150 см.
- b)  $B$  має бути достатньо великим, щоб запобігти вигину або прорізу.
- c) Висота затвора  $H$  повинна бути обрана насамперед для досягнення прийнятної схеми потоку, а не для зміни швидкості потоку.
- d) Для годівниць великої місткості можуть знадобитися пластини, що висуваються до вихідного отвору жолоба.

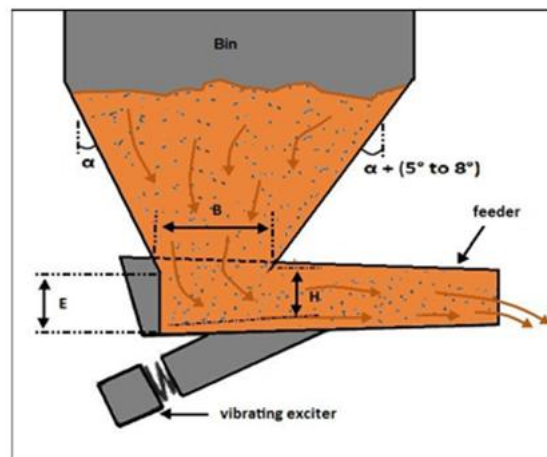


Рис. 1.14. Типове розташування вібраційного живильника

### Стрічкові живильники:

Стрічкові живильники використовуються для забезпечення контрольованого об'ємного потоку сипучих речовин із бункерів і бункерів. Зазвичай вони складаються з плоского ремня, який підтримується близько розташованими натяжними роликками та приводиться в рух кінцевими шківками (рис.1.15). У деяких випадках бункери подають безпосередньо на желобчасті конвеєри, як у випадку відвальних бункерів, які використовуються разом із стрічковими конвеєрами.

Деякі особливості стрічкових пристроїв подачі включають:

- a) Підходить для вилучення матеріалу вздовж вихідних отворів бункера з щілинами, якщо він правильно спроектований.
- b) Може витримувати високі ударні навантаження від великих часток.

с) Плоскі поверхні стрічки можна досить легко очистити, що дозволяє подавати когезійні матеріали.

д) Підходить для абразивних сипучих речовин.

е) Здатність забезпечити пристрій подачі з низькою початковою вартістю, який є залежним від роботи та піддається автоматичному управлінню.

Стосовно першого пункту, геометрія бункера та живильника для довгих слотів має вирішальне значення, якщо потрібно отримати рівномірне витягування. Хоча зазвичай фідери встановлюються горизонтально, у деяких випадках фідер може бути розроблений для роботи під низьким кутом нахилу ( $\beta$ ) до  $5^\circ$  (рис. 1.15). Зокрема, як було зазначено раніше, отвір Н слід використовувати для тренувати схему потоку, а не контролювати швидкість потоку. Як було продемонстровано експериментом, неправильне налаштування воріт призведе до нерівномірного всмоктування з воронкоподібним потоком, що відбувається або вниз по задній стінці, або вниз по передній стінці. В одній серії експериментів із використанням сипучого матеріалу гранульованого типу просте збільшення параметра затвора Н призводить до того, що потік поступово рухається вперед. Остаточне налаштування воріт потребує ретельного регулювання, щоб досягти рівномірного розтягування. Таким чином, у стрічкових живильниках варіації швидкості потоку повинні досягатися зміною швидкості стрічки. Ця вимога накладає певні обмеження на стрічкові живильники, коли потрібна дуже низька швидкість потоку, особливо якщо сипка тверда речовина взагалі зв'язана або містить великі грудки.

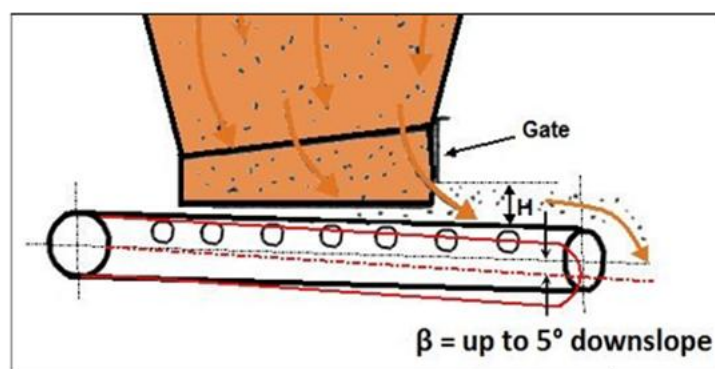


Рис. 1.15. Компонування стрічкового живильника.

Особливу увагу потрібно приділяти конструкції бункера/завантажувального механізму під час роботи з дрібним порошком, щоб гарантувати уникнення проблем із затопленням. Якщо сипкий матеріал має тенденцію прилипати до стрічки, розлив може бути проблемою стрічкових живильників. Тому, якщо є достатній простір, бажано встановити живильник над стрічковим конвеєром (рис. 1.16) на який він подає матеріал, щоб будь-який матеріал, що падає зі зворотного боку стрічки, автоматично падав на конвеєрну стрічку.

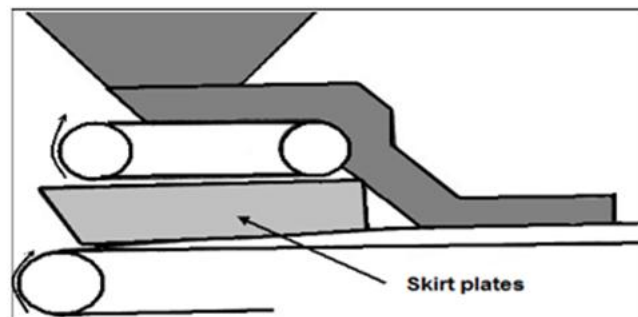


Рис. 1.16. Стрічковий живильник, розташований над конвеєром, щоб мінімізувати розливання

Стрічкові живильники також можуть мати застосування, де короткий прискорювальний ремінь використовується для прискорення матеріалу в точці завантаження високошвидкісного конвеєра (рис. 2.17). Прискорювальний конвеєр запобігає зношенню кришки довгого конвеєра.

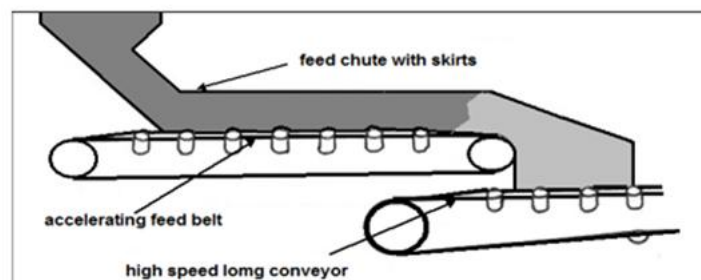


Рис. 1.17 Стрічковий живильник як прискорювальний конвеєр.

Годівниці з обертним столом:

Годівницю з ротаційним столом можна розглядати як інверсію плужної. Він складається з круглої пластини з силовим приводом, що обертається безпосередньо під отвором бункера, у поєднанні з регульованою подавальною

манжетою, яка визначає об'єм сипучого матеріалу, який потрібно доставити (рис. 1.18). Мета полягає в тому, щоб дозволити однаковій кількості сипучого матеріалу витікати з повного вихідного отвору бункера та рівномірно розподілятися по столу, коли він обертається. Потім матеріал рівномірним потоком переорюється в розвантажувальний жолоб.

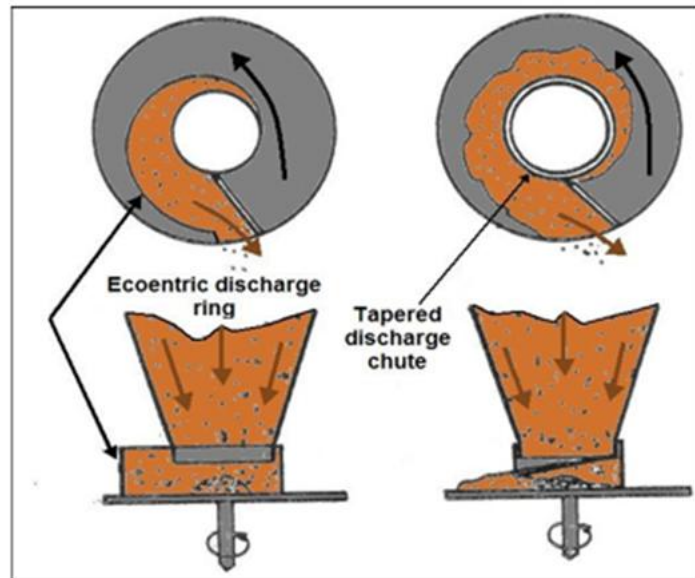


Рис. 1.18. Годівниця з поворотним столом

Цей живильник підходить для транспортування когезійних матеріалів, які вимагають великих вихідних отворів бункера, при швидкості потоку від 5 до 125 тонн на годину. Швидкість подачі певною мірою залежить від того, якою мірою матеріал розповсюджується на стіл. На це впливає кут природного укосу матеріалу, який змінюється залежно від вмісту вологи, розподілу розмірів і консолідації. Ці варіації перешкоджають досягненню високої точності подачі. Годівниці з поворотним столом підходять для вихідних отворів бункерів діаметром до 2,5 м; діаметр столу зазвичай на 50-60% більший, ніж вихідний діаметр бункера. З деякими матеріалами в центрі столу може утворитися значна мертва область. Іноді це можна уникнути, якщо вставити скребкову планку на вихід бункера. Важливо переконатися, що сипучий матеріал не ковзає по поверхні плити, сильно згортаючи або перешкоджаючи видаленню сипучого матеріалу.

Шнекові живильники та розвантажувачі:

Шнекові живильники широко використовуються для сипучих речовин із низькою або нульовою когезією, таких як дрібні та гранульовані матеріали, які потрібно розподіляти в контрольованих умовах із низькою швидкістю потоку. Однак (як і у випадку зі стрічковими живильниками) виникають складнощі конструкції, коли потрібно подавати вздовж вихідного отвору бункера з щілинами (рис. 1.19). Шнек із рівним кроком і постійним діаметром має тенденцію витягувати матеріал із задньої частини бункера, як на (рис. 1.19 а). Щоб протистояти цьому, рекомендується кілька пристроїв для забезпечення збільшення потужності шнека в напрямку подачі, як показано на (рис. 1.19). Показані схеми: ступінчастий крок, змінний крок, змінний крок і діаметр і змінний діаметр вала.

Зміна кроку, як правило, обмежена діапазоном від 0,5 діаметра мінімум до 1,5 діаметра максимум. Це обмежує відношення довжини до діаметра шнекового пристрою подачі приблизно до шести, що робить його непридатним для довгих пазів.

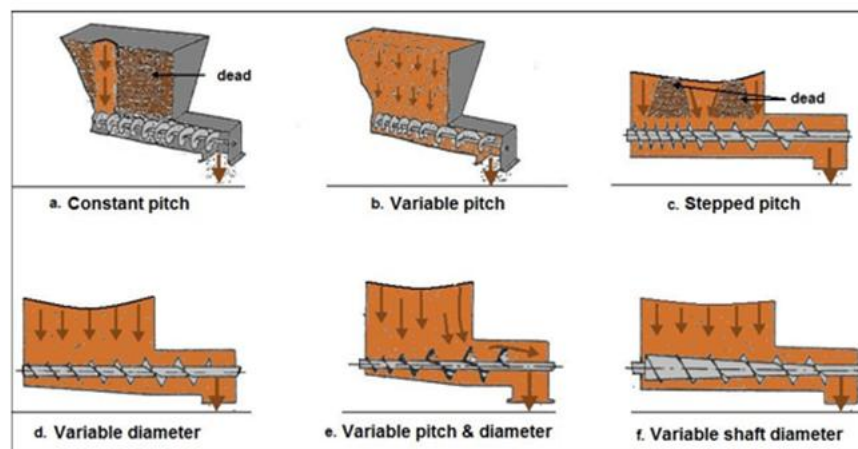


Рис. 1.19. Подача гвинта вздовж слота

Ділянка шнека, що веде від бункера до вихідного отвору живильника, є основоположною для визначення кількості матеріалу, що вивантажується за один оберт шнека. У точці, де шнек залишає бункер, для цілей контролю важливо закрити шнек, як правило, «дросельною» секцією, яка має такий самий радіальний зазор, як і жолоб. Ця секція дроселя повинна простягатися

принаймні на один крок, щоб запобігти каскадному розповсюдженню матеріалу через лютки.

Оскільки шнековий живильник покладається на тертя для транспортування матеріалу, він має дуже низьку ефективність з точки зору енергетичних потреб. Крім того, об'ємна ефективність дещо погіршується через обертовий рух, що надається сипучому матеріалу під час операції подачі.

Оскільки шнекові живильники, як правило, повністю закриті, досягається відносно хороший контроль пилу. Однак через високі втрати на тертя сипкі тверді речовини абразивного типу можуть ефективно скоротити термін служби живильника через абразивний знос. Дрібний порошок, який має тенденцію до затоплення, важко контролювати в шнековому живильнику в ситуаціях затоплення.

Шнекові розвантажувачі: шнекові розвантажувачі є варіантами звичайного шнекового живильника. Дві версії, які найчастіше використовуються, показані на малюнку (рис. 1.20). (рис. 1.20 а) показує один гвинт, який змушений повільно обертатися навколо дна силосу для зберігання з плоским дном. Одночасно обертається шнек і розрізає сипкий матеріал, переміщуючи його в центральний розвантажувальний жолоб. На (рис. 1.20 б) вся підлога силосу обертається навколо фіксованої осі. Сипучий матеріал притискається до обертового шнека, коли дно силосу обертається.

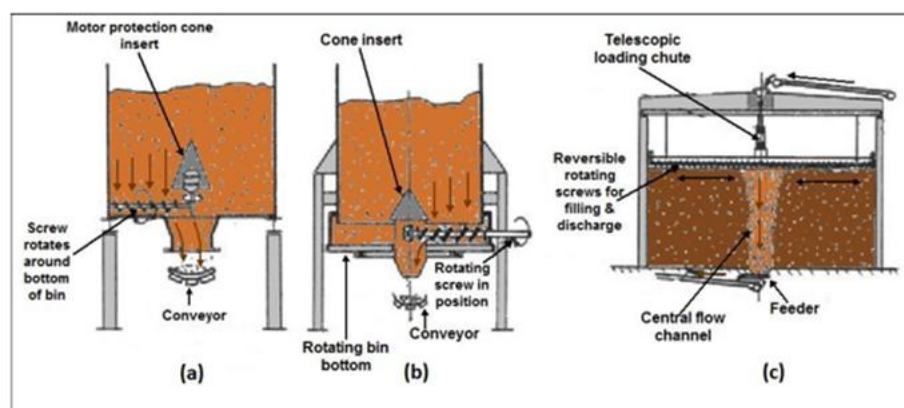


Рис. 1.20. Різні гвинтові розрядні пристрої

Шнекові розвантажувачі успішно використовувалися для деяких вологих (липких) сипких речовин, які не вдалося ефективно обробляти за допомогою

інших засобів. На додаток до забезпечення необхідного просування потоку, ці пристрої також контролюють швидкість подачі. Проблеми можуть виникнути, коли пристрої цього типу виходять з ладу, потребують ретельного дослідження при розгляді гвинтового розрядного пристрою для використання в певному застосуванні.

Альтернативне застосування гвинтових розрядів, яке схематично показано на (рис. 1.20 с), виникло в Нідерландах, і (як зазначено) гвинти обертаються навколо верхньої поверхні матеріалу для витягування до центрального розрядного каналу. Шнеки також використовуються для розподілу сипучого матеріалу під час наповнення. Ця система спочатку була розроблена як недороге сховище для картопляного крохмалю, але зараз вона використовується для інших сипучих матеріалів, зокрема вугілля. Він забезпечує дуже велику місткість, екологічно чисте сховище. Його основний недолік полягає в тому, що він працює за послідовністю «перший увійшов – останній вийшов», і тому не рекомендується для матеріалів, які з часом руйнуються.

Ротаційні живильники:

Ротаційні живильники (також відомі як барабанні, лопатеві, зірчасті та клапанні живильники) зазвичай використовуються для об'ємної подачі дрібних сипучих речовин, які мають достатньо хорошу сипучість.

Обертаний барабанний живильник (рис. 1.21 а) можна вважати надзвичайно коротким стрічковим живильником. Барабан перешкоджає витоку сипучого матеріалу, але вивантажує його шляхом обертання. Ця годівниця підходить тільки для матеріалів з хорошою сипучістю, які не схильні до аерації. Подібні міркування стосуються роторно-лопатевого живильника (рис. 1.21 б), який можна розглядати як надзвичайно короткий пластинчастий живильник; (рис. 1.21) показує деякі модифікації лопатки. Подавач поворотного клапана (рис. 1.22 а) повністю закритий і призначений для запобігання затопленню порошків або дрібнозернистих матеріалів. Зірчастий живильник (рис. 1.22 б) забезпечує засіб для отримання

рівномірного вилучення вздовж отвору щілини. Ці живильники не підходять для абразивних сипучих матеріалів, оскільки не можна підтримувати зазори, і живильники мають тенденцію втрачати контроль, особливо під час роботи з газоподібними порошками. Когезивні порошки мають тенденцію закупорювати кишені ротора та зменшувати ємність живильника

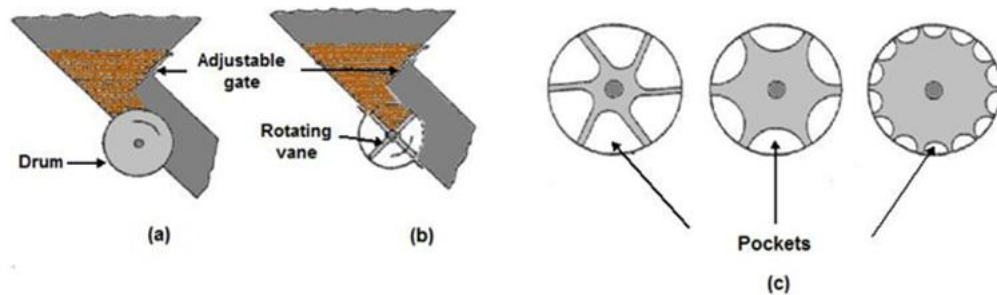


Рис. 1.21. Ротаційні барабанні та лопатеві живильники з різними обертовими елементами.

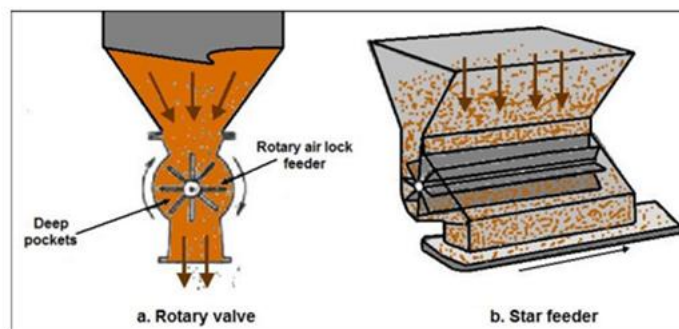


Рис. 1.22. Обертовий клапан і зірчасті живильники.

Вибір годівниці для конкретної ситуації не завжди простий, особливо якщо можливим є більше ніж одне задовільне рішення. Тип і розмір живильника для конкретного застосування в першу чергу визначаються характеристиками сипучого матеріалу, який потрібно перевантажувати, і необхідною місткістю.

З точки зору проектування важливо мати можливість з певною точністю визначити навантаження, що діють на живильники в комбінаціях бункер/роздавач, і відповідні вимоги до потужності. Проте сучасний рівень техніки (у минулому) був таким, що навантаження та вимоги до потужності неможливо було оцінити з будь-яким ступенем точності. Наприклад, було помічено, що більшість опублікованих формул мають емпіричний характер і

отримані для прогнозування навантажень і відповідних вимог до потужності для живильників, які використовуються в поєднанні з бункерами з воронкоподібним потоком. Ці формули є неадекватними при застосуванні до бункерів масової витрати, оскільки (у таких випадках) вимоги до навантажень і потужності часто сильно знижуються. Це значною мірою пов'язано з тим, що в бункерах масового потоку вся площа вихідного отвору бункера представлена живильнику.

Навантаження, що діють на фідери, можуть значно відрізнятись. Для цього є багато причин, деякі більш очевидні, ніж інші. Було зазначено, що форма вихідного отвору бункера впливатиме на навантаження на живильник (рис. 1.23). На (рис. 1.23 а) повне навантаження (не рівне гідростатичному напору) діє на живильник. На (рис. 1.23 б) навантаження частково зменшено шляхом зміни форми бункера. На (рис. 1.23 с) навантаження повністю видалено з живильника і діє лише на стінку бункера. Хоча переваги (рис. 1.23 б - с) здаються очевидними, рішення може бути не таким простим, як зображене. Зрозуміло, що схема потоку, розроблена під час операції подачі, повинна бути такою, щоб рівномірний, несегрегований потік досягався весь час.

Навантаження, що діють на фідери, і відповідні вимоги до потужності залежать від кількох факторів. Серед них:

- а) Схема потоку в бункері, масова або воронкоподібна.
- б) Властивості текучості сипучої речовини.
- с) Вибрана форма бункера, яка у випадку масового потоку включає осесиметричну або конічну, плоский потік або перехід (поєднання конічного та плоского потоку).
- д) Фактична геометрія бункера.
- е) Характеристики тертя стінки між сипучою речовиною та стінками бункера та бортовими плитами.
- ф) Тип годівниці та її геометричні пропорції.

g) Початкові умови наповнення, коли бункер наповнюється з порожнього стану, і умови потоку, коли відбулося вивантаження.

Найефективніша та надійна продуктивність годівлі досягається за допомогою комбінації масового бункера/живильника. Для даної сипучої речовини та геометрії бункера/живильника навантаження, що діє на живильник, значно змінюється між початковим навантаженням (коли бункер заповнюється вперше) і навантаженням під час потоку або після його припинення. Було зазначено, що початкове навантаження може в 2-4 рази перевищувати навантаження потоку. Однак дослідники показали, що варіація набагато більша, ніж це з початковими навантаженнями, які в 4-8 разів перевищують навантаження потоку. Теоретичні прогнози показують, що можуть виникнути обставини, за яких варіації початкового/потокового навантаження можуть бути набагато вищими, ніж зазначено.

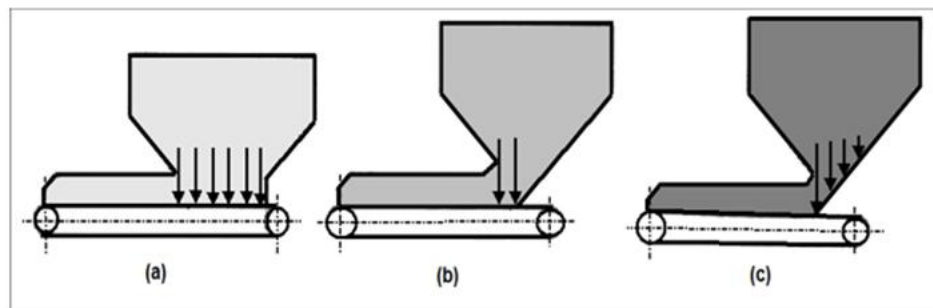


Рис. 1.23. Зміна навантаження на живильник шляхом зміни конфігурації бункера.

Завантажувальні лотки:

Як зазначалося раніше, роль живильних лотків полягає в тому, щоб направляти сипучі речовини з бункерів і живильників на конвеєрні стрічки таким чином, щоб звести до мінімуму розлив і знос стрічки. Жолоб також може бути сконструйований таким чином, щоб компонент вихідної швидкості, дотичний до стрічки  $V_T$  (рис. 1.24), якомога ближче відповідав швидкості стрічки. У той час як нормальний компонент  $V_N$  швидкості на виході має бути якомога меншим, щоб мінімізувати пошкодження стрічки від удару, необхідно забезпечити безперервність подачі з достатнім нахилом жолоба для підтримки потоку та запобігання задусі. На малюнку (рис. 1.25) показано швидкість

потоків сипучих речовин у різних моделях жолоба.

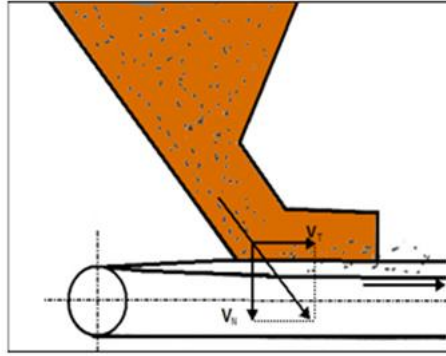


Рис. 1.24. Завантажувальний жолоб для стрічкового конвеєра

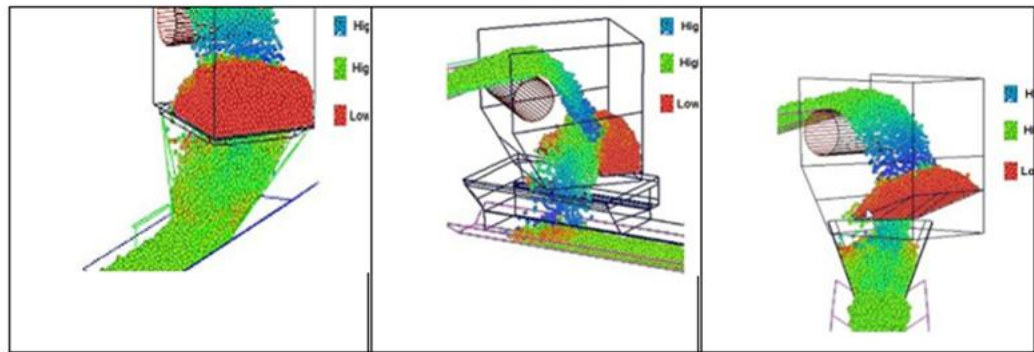


Рис. 1.25. Швидкість сипучих тіл у різних моделях жолоба

#### 1.4. Дозувально-фасувальні модулі.

Робота об'ємних дозаторів безперервної дії для сипких матеріалів ґрунтується на подаванні матеріалу із місткості робочим органом, який здійснює обертальний, поступальний або зворотно-поступальний рух. До цього типу належать дозатори барабанні, тарілчасті, шнекові, з податливою страллю. На рис. 1.26 в першому ряду показані дозатори з обертовим дозувальним органом, в другому – вібраційні дозатори, в третьому – вагові дозатори.

Розглянемо їх будову та принцип роботи. Барабанний дозатор 1-а має робочий барабан 2 з кількома карманами (комірками), які заповнюються сипким матеріалом із живильного патрубку 4 під дією тяжіння. Барабан обертається в циліндричному корпусі 1. Продуктивність регулюється частотою обертання барабана або зміною об'єму карманів. Із карманів борошно надходить у вихідний патрубок дозатора. У живильному патрубку

розташовані датчики верхнього і нижнього рівня 3 і 4 сипкого матеріалу.

Тарілчастий дозатор 1-б має горизонтальний обертовий диск 1, з якого матеріал знімається скребком 2. Висота шару матеріалу регулюється пересувною манжетою 3, яка перекриває вихідний патрубок бункера. Матеріал розташовується на тарілці у вигляді зрізаного конусу, розміри якого залежать від висоти розташування манжети та кута природного нахилу матеріалу визначається частотою коливань, кутом нахилу лотка та висотою робочого

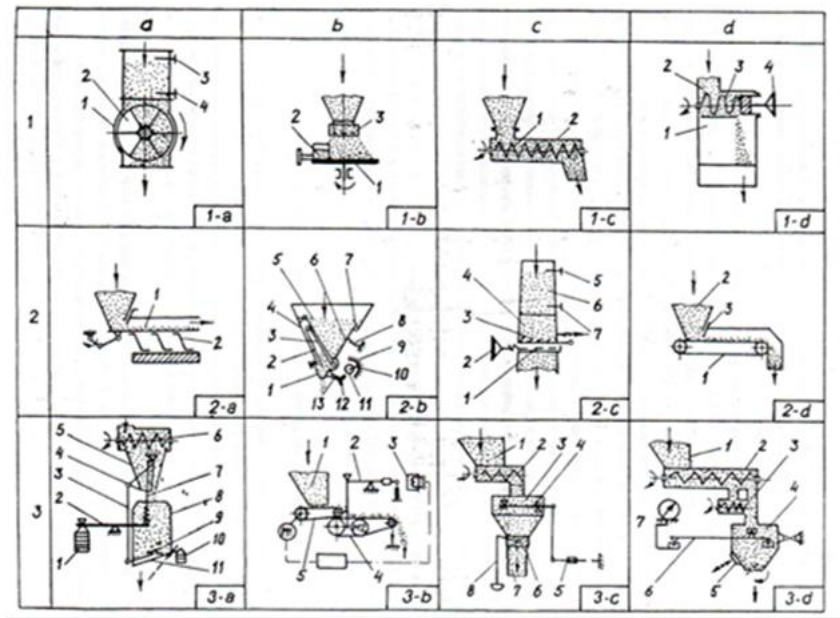


Рис.2.26 Функціональні схеми дозаторів сипких продуктів.

Шнековий дозатор 1-е. У кожусі 2 розташований шнек 1, який подає матеріал із бункера у вихідний патрубок дозатора. Продуктивність дозатора може змінюватися частотою обертання шнека або його кроком.

Дозатор з податливою спіраллю 1-д. Цей дозатор розроблено О.Т.Лісовенко і В. О. Островським. У корпусі 1 з горловиною 2 розташована податлива спіраль 3 прямокутного перерізу, яка м'яко діє на матеріал, не допускаючи його ущільнення, і підтримує стабільну кінцеву щільність маси. Продуктивність дозатора регулюється штурвалом 4 шляхом зміни перерізу вихідного отвору і відповідної зміни кроку податливої спіралі.

Дозатор з вібрототком 2-а. Має робочий орган у вигляді лотка 1, підвішеного на пружних опорах 2. При вібруванні лотка сипкий матеріал переміщується у поздовжньому напрямку. Продуктивність дозатора

визначається частотою коливань, кутом нахилу лотка та висотою робочого органу.

Дозатор з вібруючою стінкою 2-в. Складається з пірамідального бункера 5 з двома нахиленими стінками: Ліва 4 — нерухома, права 6 тримається на шарнірі 7 і може вібрувати при ударах по ролику 13 обертовим кулачком 12. Зворотнє зміщення стінки 6 забезпечується дією відтягувальної пружини 8. Продукт виходить через щілину між стінками бункера. Поворотом ексцентрика-обмежувача 11 можна змінювати амплітуду коливання стінки, а отже розмір щілини і продуктивність дозатора. Щоб уникнути затримки продукту на лівій стінці 4, по якій ковзає текстолітовий лист 2, зв'язаний тягою 3 з вібруючою стінкою 6, пересувають по шкалі 9 стрілку 10, укріплену на осі ексцентрика 11. Для додаткового регулювання розміру щілини та повного перекриття її при зупинці служить заслінка 1. Такі дозатори знайшли розповсюдження на макаронних змішувачах борошна.

Дозатор з вібруючою решіткою конструкції О.Т. Лісовенка і О.Л. Сотникова 2-с. У горловині 6 з оглядовим вікном 13 плексигласу установлені давачі верхнього 5 і нижнього 7 рівнів. Продукт, проходячи всередині корпусу 4, попадає на вібраційну дозувальну решітку 3 і виходить 13 дозатора через регульовальну решітку 1 зі штурвалом 2, за допомогою якого регулюють продуктивність дозатора.

Стрічковий дозатор 1-d. Це короткий стрічковий конвеєр 1, розташований під живильним бункером 2. Подавання матеріалу регулюється переміщенням заслінки 3 або зміною швидкістю конвеєра.

Будова та принцип дії дозатора Ш-ХДА. Для установки стрілки циферблатного покажчика в нульове положення на ваговому важелі 5 є тарні вантажі 4. досипний пристрій 8 кріпиться спеціальній основі до рами 7. дозатор має щит керування, пристрій для розташування в ньому пускорегульовальної та сигнальної апаратури для дистанційного керування роботою дозатора, який працює у двох режимах – автоматичному та ручному.

### 1.5 Транспортні системи.

Серед різноманітних способів транспортування сипучих речовин стрічковий конвеєр, очевидно, є одним із найефективніших і надійніших і добре підходить для транспортування сипучих речовин у широкому діапазоні обсягів. Успіх стрічкових конвеєрів залежить від ряду факторів, не останнім з яких є початкова подача сипких речовин на стрічку та ефективне переміщення твердих речовин з однієї стрічки на іншу на станціях передачі конвеєра. З майбутньою тенденцією до вищих швидкостей стрічки та більш вузьких стрічок, щоб досягти вищої економічної ефективності, багато уваги потрібно буде приділяти дизайну систем стрічкової подачі, яка гарантуватиме високі швидкості подачі з мінімальним проливанням та зносом стрічки.

Хоча основні цілі ідеальної системи подачі для завантаження конвеєрних стрічок є досить очевидними, важливо, щоб вони були взяті до уваги. Такі цілі можна підсумувати таким чином:

- a) Вільний і рівномірний потік матеріалу без поділу із заздалегідь визначеною швидкістю потоку в тому ж напрямку, що й рух стрічки, і бажано з тією ж швидкістю.
- b) Рівномірне осадження матеріалу навколо центру стрічки.
- c) Уникнення розливу матеріалу та проблем із пилом.
- d) Зведення до мінімуму абразивного зносу та пошкоджень від ударів.

Подача сипучих речовин на стрічкові конвеєри зазвичай контролюється комбінацією гравітаційного бункера/живильника, а в більшості випадків; тверді речовини нарешті направляються на стрічку через жолоб самопливу. Завантажувальний бункер може бути частиною відкачувального бункера (рис. 1.27 а) або частиною системи повернення запасів (рис. 1.27 б). В якості альтернативи це може бути окремий самоскидний бункер для розвантаження вантажівок або залізничних вагонів (мал.1.27 с) і (рис. 1.27 d) відповідно.

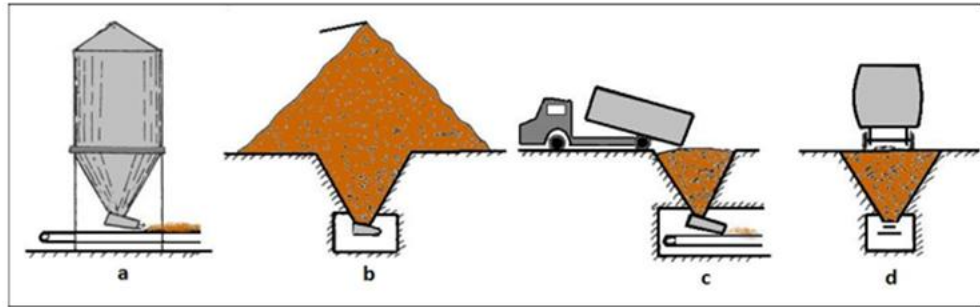


Рис.1.27. Комбінації бункер/роздавач для завантаження конвеєрних стрічок.

Швидкість подачі контролюється бункером і живильником як невід'ємним блоком, тоді як жолоб для подачі в пристрої для керування потоком і швидкістю подачі. Важливо розуміти інтерактивні ролі цих компонентів як інтегрованої системи.

Конвеєрна стрічка — це стрічка з петлею, яка приводиться в рух і обертається навколо одного або кількох шківів. Він приводиться в дію електричним двигуном і підтримується металевою плитою або роликami, на яких спирається конвеєрна стрічка. Шків, який приводить в дію конвеєрну стрічку, називається ведучим шківом і має неактивний проміжний шків.

Приводи шківів на розвантажувальному кінці конвеєрної стрічки називають головними приводами, тоді як приводи, розташовані на кінці подачі, відомі як хвостові приводи. Переважним типом приводу шківа є головний привід, розташований на розвантажувальному кінці та використовує силу тяги для переміщення конвеєрної стрічки.

## Компоненти конвеєрної системи

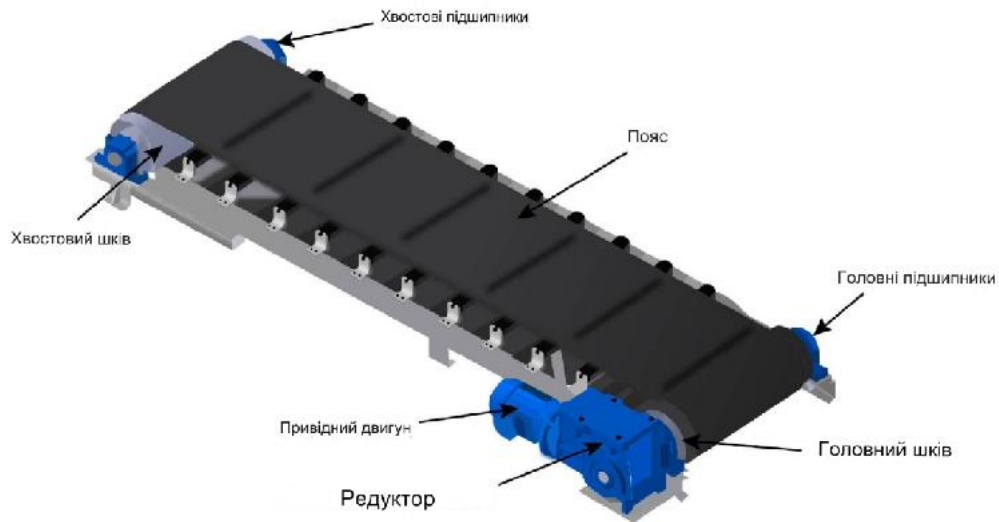


Рис. 1.28. Компоненти стрічкового конвеєра.

Існує нескінченна кількість типів і застосувань конвеєрів. Усі різновиди служать для транспортування матеріалів і вантажів по безперервному шляху. Хоча моторизовані конвеєрні стрічки є традиційною формою конвеєрної системи, деякі системи використовують ролики без двигуна для переміщення матеріалів.

### 1.6. Пристрої для ущільнення СХП в пачці.

Ущільнення сипких харчових продуктів в пачці може бути здійснене за допомогою різних пристроїв та технологій. Ось декілька з них:

1. Вакуумний ущільнювач: Цей пристрій використовує вакуум, щоб видалити повітря з упаковки, створюючи вакуумний середовище всередині пачки. Це допомагає ущільнити сипкі продукти, такі як кава, крупи або цукор, забезпечуючи кращу збереженість та захист від окислення.

2. Функція ущільнення в герметичних упаковках: Деякі упаковочні машини мають вбудовану функцію ущільнення, яка запобігає проникненню повітря всередину пачки. Це особливо важливо для сипких продуктів, щоб запобігти їх вологому псуванню або втраті якості.

3. Вибійна прес-упаковка: Цей тип пристрою використовується для ущільнення сипких продуктів, наприклад, порошків або гранул, за допомогою

механічного тиску. Вибійна прес-упаковка стискає продукт у відповідний контейнер або упаковку, що допомагає зменшити об'єм і зберегти продукт в стабільному стані.

4. Гідростатичний ущільнювач: Цей пристрій використовує гідростатичний тиск для ущільнення продуктів у пачці. Він зазвичай використовується для ущільнення продуктів у великих ємностях або бочках, таких як нафта, соки або рідкі харчові інгредієнти.

Ці пристрої допомагають забезпечити ефективне ущільнення сипких харчових продуктів у пачці, що збільшує їхню тривалість зберігання та зберігає якість продукту.

### **Висновки до розділу 1**

У цьому розділі проведено огляд та аналіз сучасного обладнання, яке використовується для накопичення, видачі та подачі сипких харчових продуктів в зону пакування. Вивчено основні типи та конструкції обладнання, їхні переваги та недоліки, а також принципи їхньої роботи.

## РОЗДІЛ 2. Аналітичне дослідження технологічного процесу переміщення сипких харчових продуктів в зону пакування

### Аналітичне дослідження процесу переміщення СХП в бункері.

Існують дві загальні схеми потоку, які можуть виникати, коли сипучі тверді речовини вивантажуються з бункера: потік воронки та масовий потік. При воронкоподібному потоці над вихідним отвором утворюється активний канал потоку, а застійний матеріал залишається на периферії. У масовому потоці весь шар твердих речовин перебуває в русі, коли матеріал виходить із вихідного отвору. Воронковий потік виникає, коли стінки бункера недостатньо круті або мають недостатньо низьке тертя, щоб дозволити течію вздовж них. Масові бункери зазвичай мають круті стінки та/або стінки з низьким коефіцієнтом тертя. Схема потоку показана на рис.2.1



Рис. 2.1. Шаблони потоку; зліва: воронковий потік; праворуч: маса потік.

Вибір між воронкоподібним бункером і масовим бункером залежить від ряду факторів. Якщо матеріал має тенденцію до сегрегації, слід вибрати масовий витрата. Матеріали, які можуть злежуватися або легко утворювати стійкі щілини, слід обробляти в бункерах масового потоку. Масовий потік також рекомендується при роботі з дрібним порошком, оскільки він, швидше за все, заповнить живильники, і коли застосування потребує стабільної швидкості викиду твердих частинок.

Потік у лійці нормальний, якщо сегрегація не викликає занепокоєння,

порошок не аерується, а випускний отвір бункера є достатньо великим, щоб запобігти утворенню стабільної щілини. У багатьох випадках розмір вихідного отвору бункера, який необхідний для запобігання розвитку стабільної свердловини, значно більший, ніж той, який необхідний для запобігання утворенню цілісної дуги. Загалом бункери з масовим потоком є кращими перед бункерами з лійковим потоком. Властивості потоку:

Щоб розробити бункер для надійного потоку, необхідно знати наступні властивості потоку сипучих твердих речовин: (1) когезійна міцність, (2) внутрішнє тертя, (3) стисливість, (4) тертя стінки та (5) проникність. Ці властивості вимірюються за допомогою тестерів комірки зсуву, тертя стінки та проникності. Співвідношення між необмеженою межею текучості сипучого матеріалу та основним напруженням консолідації називається функцією потоку. Ефективне місце текучості забезпечує зв'язок між основним напруженням консолідації та ефективним кутом тертя. Стисливість — це співвідношення між об'ємною щільністю матеріалу та основним напруженням консолідації. Проникність пов'язує перепад тиску через шар матеріалу та поверхневу швидкість газу.

### **Масові Бункери:**

Для бункерів масового потоку визначено два критичні конструктивні параметри: кут бункера та розмір випускного отвору. Кут бункера, необхідний для забезпечення потоку маси, залежить від ефективного кута тертя  $\delta$ , кута тертя стінки та геометрії бункера. На рисунках 2.2 і 2.3 наведені рекомендовані кути масового потоку бункера для конічних бункерів і бункерів з плоскими стінками та щілинними випускними отворами на основі аналізу. По горизонтальній осі відкладено значення допустимого кута бункера  $\theta'$ , по вертикальній осі – значення кута тертя стінки  $\phi'$ . Границі між масовим потоком і потоком воронки залежать від ефективного кута тертя  $\delta$ . Будь-яка комбінація  $\theta'$  і  $\phi'$ , яка потрапляє в граничну область масової витрати на діаграмі, забезпечить масову витрату.

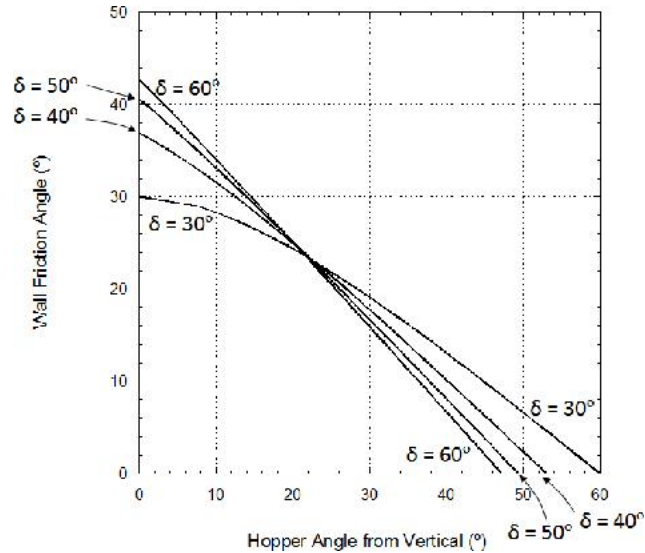


Рисунок 2.2 Теоретичні кути масового потоку бункера для бункерів з круглими або квадратними випускними отворами. Примітка: слід використовувати мінімальний коефіцієнт безпеки від 2 до 3

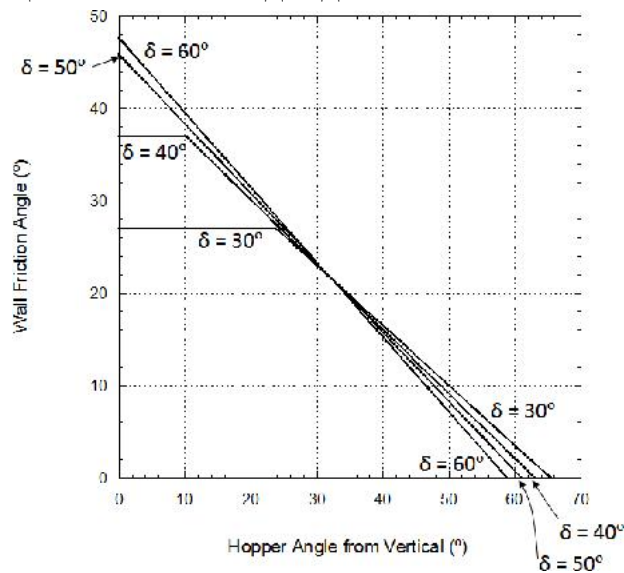


Рисунок 2.3. Рекомендовані кути масового потоку бункера для клиновидних бункерів.

Коефіцієнт безпеки  $2-3^\circ$  по відношенню до теоретичного кута масового потоку бункера рекомендується в конструкції конічного масового бункера. З іншого боку, кути бункерів із плоскими стінками та щілинними вихідними отворами (наприклад, клиноподібні та перехідні бункери), у яких потік плоский, можуть бути на  $5-10^\circ$  більшими, ніж рекомендовано на рисунку 3, без ризику воронкоподібного потоку. Випускний отвір бункера з плоским потоком має бути принаймні вдвічі більшим за його ширину, щоб

застосувати рисунок 3, якщо він має вертикальні торцеві стінки, і в три рази довший, якщо його торцеві стінки збігаються.

Зверніть увагу, що правила проектування для плоских бункерів не можуть бути застосовані до пірамідальних бункерів. Натомість слід використовувати рекомендації для конічних бункерів. Майте на увазі, що кути долини, утворені на перетині похилих стінок пірамідальних бункерів, можуть бути значно менш крутими, ніж кути самих стін бункерів. Можна розрахувати кут нахилу від вертикалі  $\theta_v$

$$\theta_v = \tan^{-1} \sqrt{\tan^2 \theta_{side} + \tan^2 \theta_{end}} \quad (1)$$

де  $\theta_{side}$  та  $\theta_{end}$  – кути бічної та торцевої стінок від вертикалі відповідно. Долина, яка є більш мілкою, ніж бічні або торцеві стінки, повинна бути достатньо крутою, щоб забезпечити потік маси.

Аналітичний опис теоретичної межі між областями масового потоку та воронкоподібного потоку для конічних бункерів має такий вигляд :

$$\theta' = 90^\circ - \frac{1}{2} \cos^{-1} \left( \frac{1 - \sin \delta}{2 \sin \delta} \right) - \beta \quad (2)$$

Де  $\beta$  розраховується з :

$$2\beta = \phi' + \sin^{-1} \left( \frac{\sin \phi'}{\sin \delta} \right) \quad (3)$$

Потрібно зауважити, що з рівнянням 2 слід використовувати коефіцієнт безпеки 2-3°. Для бункерів із щільними вихідними отворами наступне рівняння можна використовувати для розрахунку границі масового потоку:

$$\theta' = \frac{\exp[3.75(1.01)^{(\delta-30^\circ)/10}] - \phi'}{0.725(\tan \delta)^{1/5}} \quad (4)$$

для  $\phi'$  менше ніж  $\delta - 3^\circ$ .

Ці рівняння можуть бути змієподібними, але їх можна легко ввести в електронні таблиці та інше програмне забезпечення. Для підтвердження розрахунків можна використовувати цифри.

Напруга на стінці та велике напруження консолідації не рівні. Кут тертя стінки визначається шляхом накладення локусу текучості стінки та ефективного локусу текучості на той самий графік, як показано на рисунку

2.4. Значення  $\phi'$  знаходиться з перетину кола Мора, яке проходить  $\sigma_1$  і місце плинності стінки.

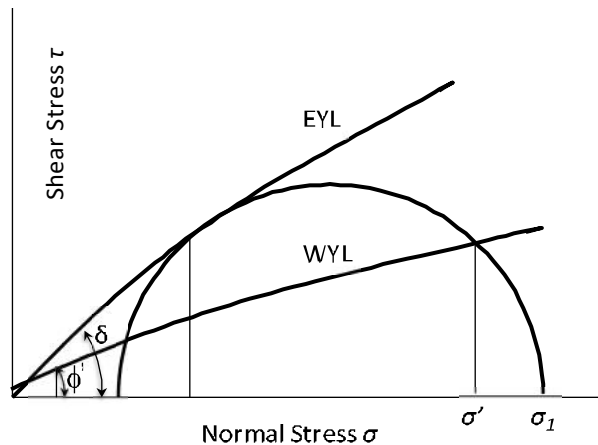


Рисунок 2.4. Побудова ефективного місця текучості та місця текучості стінки.

Якщо геометричне місце текучості стінки є лінійним, що часто вірно при низьких напругах, це можна описати так:

$$\tau' = a\sigma' + b \quad (5)$$

де  $\tau'$  і  $\sigma'$  — зсувне та нормальне напруження на поверхні стінки відповідно, де  $a$  та  $b$  — емпіричні константи, визначені регресією. Потім можна розрахувати нормальний стрес.

$$\sigma' = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \quad (6)$$

де

$$\alpha = a^2 + 1$$

$$\beta = 2(ab - \sigma_{avg}) \quad (7).(8)$$

та

$$\gamma = b^2 + \sigma_{avg}^2 - R^2 \quad (9)$$

Потім розраховується кут тертя стінки:

$$\phi' = \tan^{-1} \left( \frac{\tau'}{\sigma'} \right) \quad (10)$$

де напруга зсуву на стінці  $\tau'$  розраховується за рівнянням 5.

Щоб запобігти утворенню стабільної когезійної арки на виході з бункера, зовнішня напруга повинна бути більшою, ніж необмежена межа текучості порошку. Дженіке [1, 2] визначив коефіцієнт текучості  $ff$  як відношення основного напруги консолідації  $\sigma_1$  до напруги на опорі арки, яка природним чином утворюється на виході  $\sigma$ :

$$ff = \frac{\sigma_1}{\sigma} \quad (11)$$

Коефіцієнт потоку залежить від ефективного кута тертя порошку  $\delta$ , кута тертя стінки  $\phi'$  і кута бункера  $\theta'$ . Діаграми, які надають коефіцієнти потоку, надає Дженіке і 9-е видання Довідника інженерів-хіміків Перрі. Приклади наведено на рисунках 2.5-2.8.

Аналітичні вирази коефіцієнта потоку надані Арнольдом і Макліном.

$$ff = \frac{Y(1 + \sin \delta)H(\alpha)}{2(X - 1)(\sin \alpha)} \quad (12)$$

де

$$X = \frac{2^i \sin \delta \left[ \frac{\sin(2\beta + \alpha)}{\sin \alpha} + 1 \right]}{1 - \sin \delta}$$

$$Y = \frac{[2(1 - \cos(\beta + \alpha))]^i \sin \alpha (\beta + \alpha)^{1-i} + \sin \beta \sin^{1+i}(\beta + \alpha)}{(1 - \sin \delta) \sin^{2+i}(\beta + \alpha)} \quad (13)(14)$$

та

$$H(\theta') = \left( \frac{130^\circ + \theta'}{65} \right)^i \left( \frac{200^\circ + \theta'}{200^\circ} \right)^{1-i} \quad (15)$$

Значення  $i$  в рівняннях 13-15 дорівнює 1 для круглих вихідних отворів і 0 для щілинних випускних отворів.

Коефіцієнти потоку зазвичай коливаються від 1,2 до 1,6, але можуть бути набагато вищими, якщо тертя стінок надзвичайно низьке, а стінки бункера дуже круті.

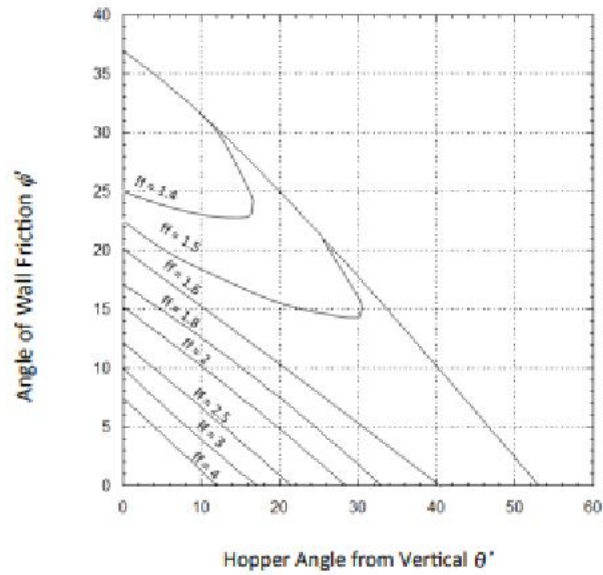


Рисунок 2.5. Коэффициенты витраты для конических бункерів,  $\delta = 40^\circ$ .

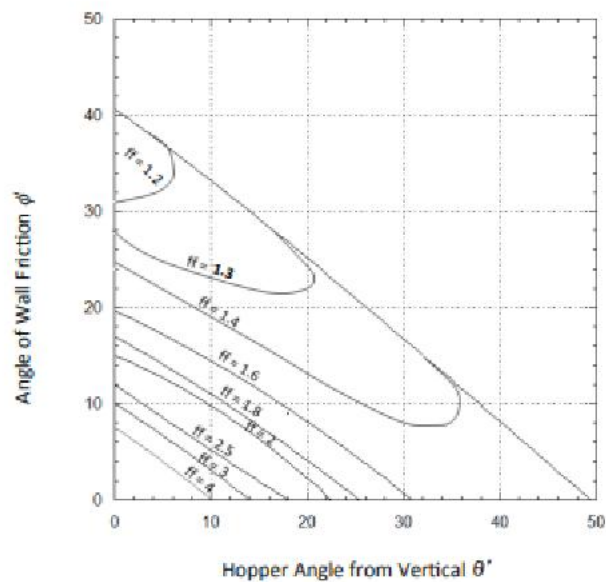
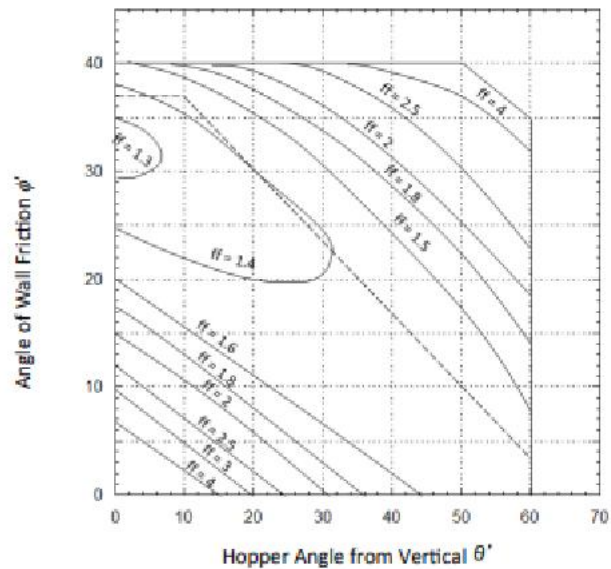
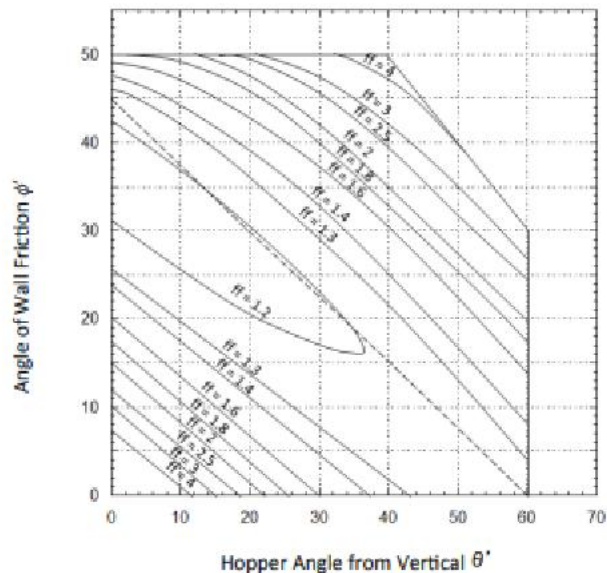


Рисунок 2.6. Коэффициенты потока для конических бункерів,  $\delta = 50^\circ$



Малюнок 2.7. Коефіцієнти потоку для плоских проточних бункерів із щілинними вихідними отворами,  $\delta = 40^\circ$ .



Малюнок 2.8. Коефіцієнти потоку для плоских проточних бункерів із щілинними випусками,  $\delta = 50^\circ$ .

Розмір вихідного отвору, який необхідний для запобігання розвитку когезійної дуги в бункері для масового потоку, можна визначити, спочатку наклавши коефіцієнт потоку та функцію потоку на той самий графік. Коефіцієнт потоку будується шляхом проведення через початок координат лінії з нахилом, що дорівнює  $1/ff$ . Як показано на рисунку 2.9, існує три можливості:

1. Функція потоку лежить нижче фактора потоку, і вони не

перетинаються. Коли це так, напруга, що подається на опори арки, завжди перевищує когезійну міцність матеріалу, і, отже, мінімальний розмір вихідного отвору відсутній.

існує вимога щодо запобігання когезивному вигину. Натомість вихідний розмір  $B$  визначається іншими міркуваннями, такими як необхідна швидкість викиду. Кут бункера, необхідний для масового потоку, вимагає відомості основного напруження консолідації  $\sigma_1$  на виході. Ця напруга розраховується з :

$$\sigma_1 = ff \frac{\rho_b g B}{H(\theta')} \quad (16)$$

2. Функція потоку лежить вище фактора потоку, а криві не перетинаються. Порошок не потече тільки через силу тяжіння. Слід звернути увагу на зміну властивостей текучості матеріалу, наприклад, збільшення розміру його частинок або використання засобів, що сприяють текучості, або використання стояка.

3. Функція потоку і фактор потоку перетинаються. На еретині двох ліній аркова напруга та когезійна міцність насипного твердого тіла є ідентичними та дорівнюють критичній напрузі  $\sigma_{crit}$ . Діаметр вихідного отвору бункера, який має бути перевищений, щоб запобігти скрученню,  $B_{min}$ , можна розрахувати:

$$B_{min} = \frac{H(\theta') \sigma_{crit}}{\rho_b g} \quad (17)$$

Коефіцієнт безпеки 1,2 іноді множиться на значення  $B_{min}$ . Оскільки об'ємна щільність  $\rho_b$ , ефективний кут тертя  $\delta$  та кут тертя стінки  $\phi'$  залежать від напруги, розрахунок критичних кутів бункера та розмірів арки є ітераційною процедурою. На малюнку 10 представлена блок-схема для розрахунку мінімального вихідного діаметра бункера та рекомендованого кута масового потоку бункера, коли функція потоку та коефіцієнт потоку перетинаються. Блок-схема для визначення рекомендованого кута масового

потіку бункера для вибраних діаметрів вихідного отвору наведена на рисунку 2.11.

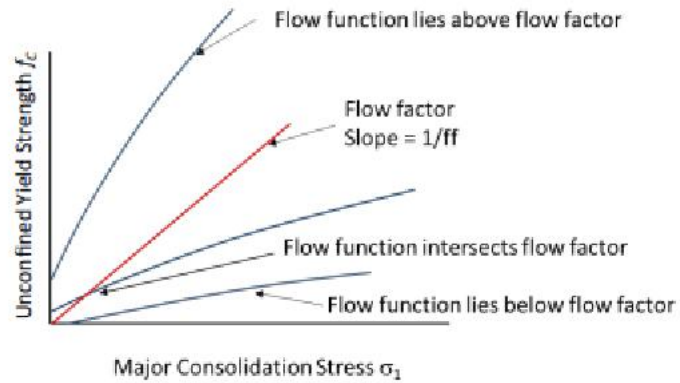


Рис.2. 9. Графік, що показує коефіцієнт потоку та функцію потоку.

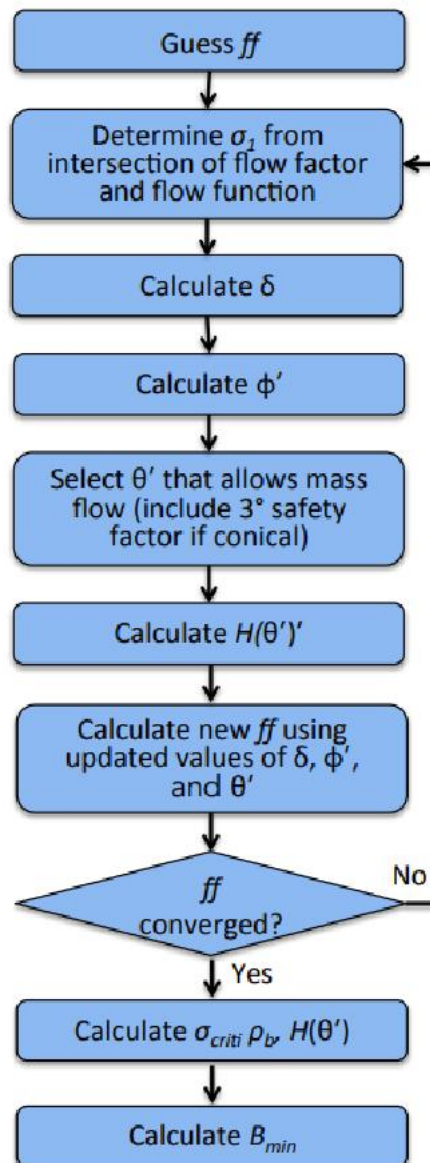


Рис. 2.10. Блок-схема для визначення критичного розміру вихідного отвору

бункера та кута масового потоку бункера.

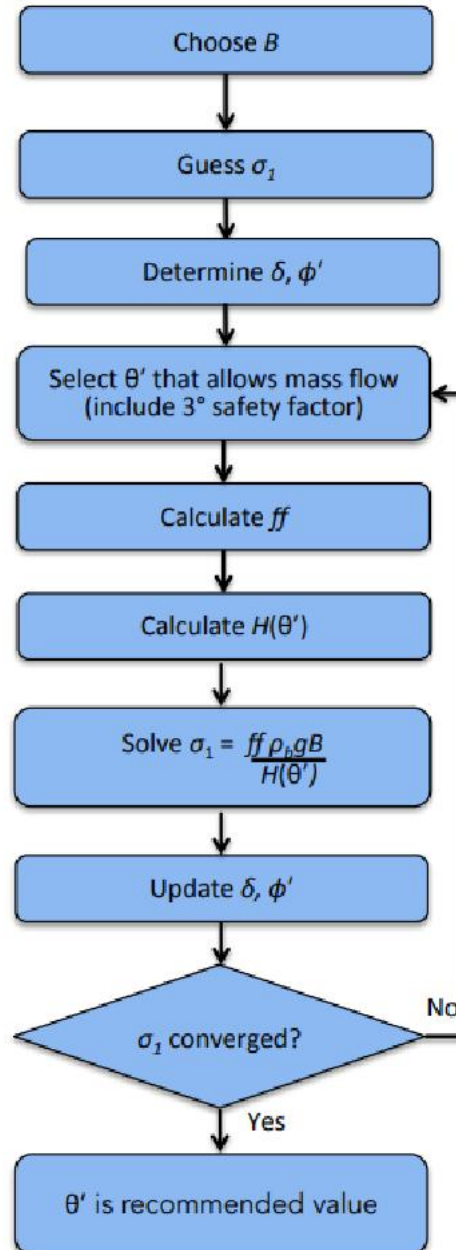


Рис. 2.11. Блок-схема для визначення рекомендованого кута масового потоку бункера для заданого діаметра вихідного отвору.

Щоб запобігти механічному блокуванню на виході бункера, використовуються наступні емпіричні правила: для конічного бункера діаметр вихідного отвору повинен принаймні в 6-8 разів перевищувати розмір найбільшої частинки, яку буде перевантажено; для бункерів з щілинними випускними отворами ширина випускного отвору повинна бути принаймні в 3-4 рази більшою за розмір найбільших часток.

За винятком тих випадків, коли очікується безперервне переміщення сипкого матеріалу, для конструкції бункера слід використовувати результати випробувань на когезійну міцність у часі та на тертя стінки.

Вихідний отвір також має бути достатньо великим, щоб забезпечити бажану швидкість розряду. Для крупнозернистих порошків швидкість викиду твердих частинок  $v_o$  визначається як:

$$v_o = \sqrt{\frac{Bg}{2(i+1)\tan(\theta')}} \quad (18)$$

з якого можна розрахувати масову швидкість розряду:

$$\dot{m}_s = \rho_{bo} A_o v_o \quad (19)$$

де  $A_o$  – площа поперечного перерізу вихідного отвору, а  $\rho_{bo}$  – об'ємна щільність на виході.

Максимальна швидкість викиду дрібного порошку може бути на порядки меншою, ніж у грубого порошку через несприятливий градієнт тиску газу, який розвивається поблизу вихідного отвору, коли порошок розширюється. Для дрібних порошків, які обробляються в бункері, який має вихідний отвір значно більший, ніж  $f_c/(\rho_b g)$ ,

$$v_o = \sqrt{\frac{Bg}{2(m+1)\tan\theta'} \left( 1 + \frac{1}{\rho_b g} \frac{dP}{dz} \Big|_o \right)} \quad (20)$$

3

$$\frac{dP}{dz} \Big|_o = \frac{v_o \rho_{bo} g}{K_o} \left( \frac{1}{\rho_{bmp}} - \frac{1}{\rho_{bo}} \right) \quad (21)$$

де  $\rho_{bmp}$  — об'ємна щільність у місці всередині бункера, де тиск газу є мінімальним, а  $K_o$  — параметр проникності з одиницями швидкості. Часто закон Дарсі виражають так:

$$u = -\frac{C}{\eta} \frac{dP}{dz} \quad (22)$$

де  $u$  — поверхнева швидкість рідини,  $C$  — проникність за Дарсі,  $\eta$  — в'язкість рідини.  $K$  і  $C$  пов'язані між собою:

$$K = C \frac{\rho_b g}{\eta} \quad (23)$$

Зауважте, що коли  $K$  дорівнює  $\rho_b g$ , сили, що діють на частинку через градієнт тиску та силу тяжіння, рівні та протилежні. Таким чином,  $K$  приблизно дорівнює мінімальній швидкості псевдозрідження сипучого матеріалу.

Рівняння 30 і 31 можна поєднати, щоб отримати таке квадратне рівняння:

$$\left[ \frac{2(i+1)\tan\theta'}{Bg} \right] v_o^2 + \left[ \frac{1}{K_o} \left( 1 - \frac{\rho_{bo}}{\rho_{bmp}} \right) \right] v_o - 1 = 0 \quad (24)$$

Для цілей проектування, що забезпечить консервативний результат,  $\rho_{bo}$  можна встановити рівним мінімальній насипній густині матеріалу, а  $\rho_{bmp}$  встановити рівним об'ємній густині при основній напрузі консолідації на з'єднанні циліндра бункера, яка розраховується за рівнянням Янсена [6]:

$$\sigma_1 = \frac{\rho_b g R_H}{k \tan\phi'} \left[ 1 - \exp\left( \frac{-k(\tan\phi')h}{R_H} \right) \right] \quad (25)$$

де  $R_H$  – гідравлічний радіус вертикального перетину бункера,  $h$  – його висота,  $k$  – коефіцієнт Янсена. У рівнянні 25 використовуються середні значення об'ємної щільності та кута тертя стінки. Параметр Янсена можна прийняти рівним 0,4.

В якості альтернативи можна використовувати диференціальну версію рівняння Янсена. Диференціальне рівняння можна чисельно інтегрувати, якщо відоме відношення об'ємної щільності до основного напруження консолідації (вертикального напруження). Диференційну форму задають:

$$\frac{d\sigma_v}{dz} + \frac{k \tan\phi'}{R_H} \sigma_v = \rho_b g \quad (26)$$

Воронкоподібні бункери :

Воронкоподібні бункери забезпечують значно більшу місткість в установках, де обмежений простір. Вихідний отвір воронкоподібного бункера має бути достатньо великим, щоб запобігти утворенню зв'язної дуги та стабільного крилоподібного отвору. Критичний діаметр свердловини  $D_F$ , *i.e.*, діаметр круглого вихідного отвору або діагональ вихідного отвору з щілинами, який повинен бути перевищений, щоб гарантувати, що пацюкова яма зруйнується, розраховується за:

$$D_F = \frac{G(\phi_t) f_c}{\rho_b g} \quad (27)$$

де  $\phi_t$  – статичний кут внутрішнього тертя, який визначається за часом випробувань на когезійну міцність,  $f_c$  необмежена межа текучості сипучого твердого тіла при тиску консолідації, задана рівнянням Янссена (рівняння 25 і 26). Функція  $G(\phi_t)$  є функцією, заданою Дженіке [1], яка зображена на малюнку

Аналітичне наближення до  $G(\phi_t)$  надається :

$$G(\phi_t) = -5.066 + 0.490\phi_t - 0.0112\phi_t^2 + 0.000108\phi_t^3 \quad (28)$$

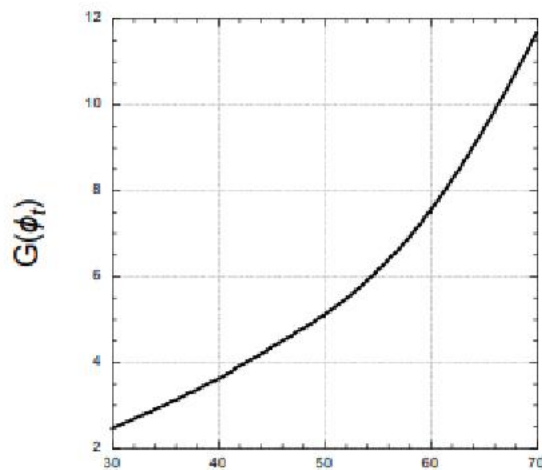


Рис. 2.12. Функція  $G(\phi_t)$

Якщо бункер із квадратним або круглим вихідним отвором сконструйовано з отвором, більшим за  $D_f$ , когезійного вигину не буде. Ширина щілинного

випускного отвору воронкоподібного бункера з плоскими стінками має бути достатньо великою, щоб запобігти утворенню цілісної арки. Використовується та сама процедура, яка використовується для визначення мінімальної ширини вихідного отвору для запобігання викривленню в бункері масового потоку з плоским потоком, за винятком того, що використовується коефіцієнт потоку 1,7.

Для деяких сипких матеріалів можна розробити бункер для розширеного потоку. Розширений проточний бункер, по суті, є воронковим проточним бункером над бункером масового потоку. Верхній діаметр секції масового потоку має бути більшим, ніж критичний діаметр  $DF$ , а його вихідний розмір має бути більшим, ніж критичний розмір дуги  $V_{min}$ . Коли сипучий матеріал вивантажується, він буде рухатися в нижній частині посудини, але потік відбуватиметься лише в каналі потоку у верхній частині посудини, розташованому над випускним отвором. Будь-яка яма завалиться, а бункер повністю спорожніє.

### **Ємності**

Слід використовувати розумне співвідношення висоти до діаметра ( $H/D$ ) секції циліндра, причому співвідношення приблизно від 1,5 до 4 зазвичай є найбільш економічним. Об'єм  $V$  і висота  $H$  деяких поширених конструкцій бункера наведені на рисунку 2.13.


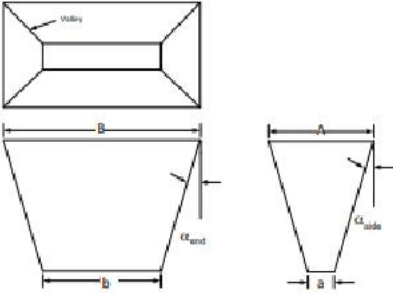
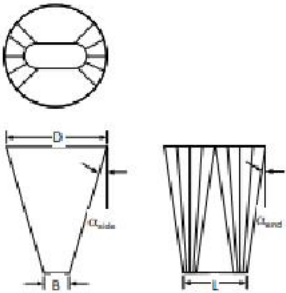
<p style="text-align: center;"><b>Conical</b></p> 	$H = \frac{D - B}{2 \tan \alpha}$ $V = \frac{\pi(D^3 - B^3)}{24 \tan \alpha}$
<p style="text-align: center;"><b>Pyramidal</b></p> 	$H = \frac{A - a}{2 \tan \alpha_{side}} = \frac{B - b}{2 \tan \alpha_{end}}$ $V = \frac{H[2(AB + ab) + Ab + aB]}{6}$
<p style="text-align: center;"><b>Transition</b></p> 	$H = \frac{D - B}{2 \tan \alpha_{side}} = \frac{D - L}{2 \tan \alpha_{end}}$ $V \approx \left[ \frac{\pi D^2}{12} + \frac{BL}{3} + \frac{D(B + 2L)}{12} \right] H$

Рис. 2.13. Ємність бункера.

Живильники:

Живильники можуть бути джерелом проблем з потоком бункера, якщо використовується неналежне обладнання або якщо вони неправильно спроектовані. Це особливо вірно для бункерів із щільними випускними отворами, де живильники мають бути сконструйовані таким чином, щоб рівномірно втягуватись із усього поперечного перерізу випускного отвору для забезпечення масового потоку. Однак навіть бункери з круглими вихідними отворами можуть мати нерівномірний потік, якщо не використовується належний інтерфейс.

Існує дві основні категорії живильників, доступних для обробки

сипучих речовин: об'ємні та гравіметричні. Об'ємний живильник вивантажує певний об'єм порошку протягом певного періоду часу. Цей тип живильника підходить для багатьох застосувань, особливо для масових бункерів, у яких насипна щільність порошку на виході з бункера майже не залежить від рівня всередині посудини.

Гравіметрична годівниця спирається на систему керування, яка регулює швидкість годівниці на основі втрати ваги. Оскільки контролер не може визначити швидкість вивантаження, коли його бункер заповнюється матеріалом, зазвичай два бункери використовуються послідовно. Верхня система сконструйована таким чином, що вона може дуже швидко подавати воду в нижню за течією. Під час циклу наповнення нижній живильник працює в об'ємному режимі (тобто з постійною швидкістю), а потім у гравіметричному режимі (тобто його швидкість контролюється шляхом вимірювання втрати ваги матеріалу всередині бункера), коли вниз за течією бункер заповнений. Гравіметричні годівниці зазвичай набагато дорожчі за об'ємні.

Перевагою масових бункерів є те, що насипна щільність на виході бункера не залежить від висоти матеріалу всередині посудини. Якщо точне вимірювання швидкості вивантаження з бункера не є критичним, об'ємні живильники часто є адекватною та менш дорогою альтернативою гравіметричним живильникам.

#### Поворотні клапани

Поворотні клапани часто використовуються під бункерами з круглими або квадратними вихідними отворами. Вони особливо корисні для застосувань, де необхідно забезпечити ущільнення, щоб запобігти витіканню повітря з або в вихідний отвір бункера. Схема поворотного клапана показана на рисунку 2.14.

Якщо використовується поворотний клапан, коротку вертикальну золотникову секцію слід встановити між випускним отвором бункера та вхідним отвором клапана. В іншому випадку матеріал може текти переважно

з верхньої сторони клапана та вплинути на схему потоку всередині посудини, як показано на рисунку 2.15

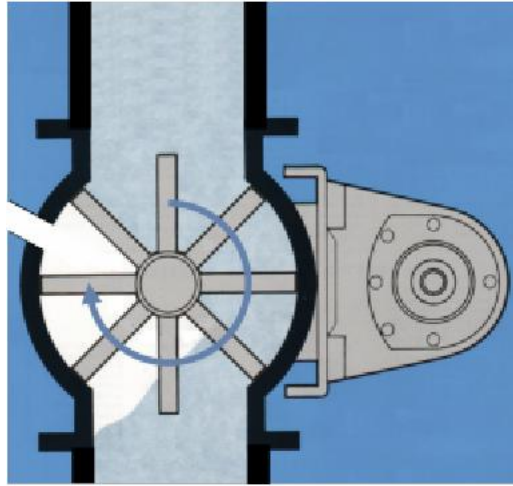


Рис. 2.14. Живильник з поворотним клапаном.

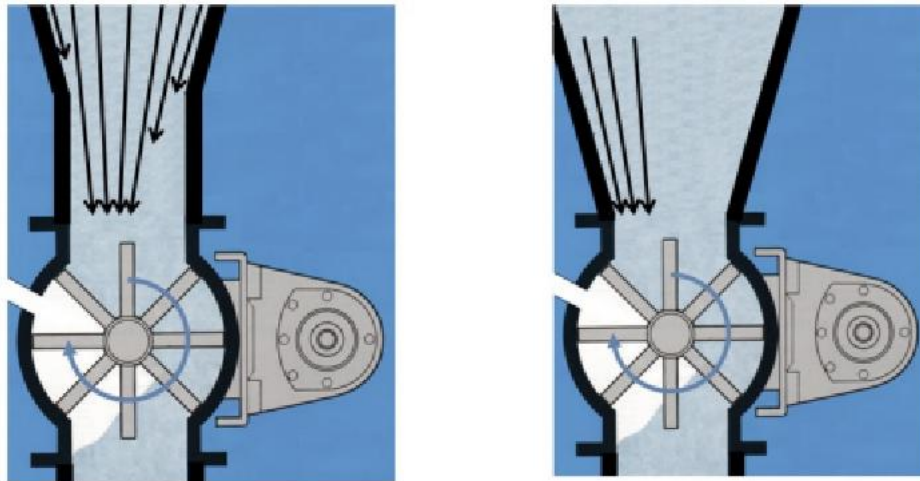


Рис. 2.15. Потік порошку через поворотний клапан із (ліворуч) і без (праворуч) золотникової секції.

Коли порошок випадає з кишені, повітря або газ, який його замінює, можна закачати назад у бункер. Слід розглянути можливість вентиляційної лінії, особливо якщо поворотний клапан викидає матеріал у лінію високого тиску. Як правило, вентиляційна лінія спрямовує повітря або в пилозбірник, або у верхню частину бункера.

Пропускна здатність поворотного клапана можна розрахувати за:

$$q = \frac{N\pi(D^2 - d^2)W}{4} \quad (29)$$

де  $q$  — об'ємна швидкість викиду,  $N$  — швидкість обертання клапана,  $D$  і  $d$  — діаметри лопатки та валу відповідно,  $W$  — ширина лопатки. Швидкість поворотного клапана 15-45 об/хв є кращою.

### Шнекові живильники:

Шнекові живильники в основному використовуються для контролю вивантаження порошку з бункерів із щілинними випускними отворами. Гвинт складається з серії рейок, намотаних навколо одного або кількох валів.

Шнек із постійним кроком і постійним діаметром вала призведе до формування каналу потоку в задній частині бункера над першим ходом шнека. Як показано на рис 2.16, цей канал буде втягувати матеріал з верхньої поверхні в канал потоку, доки не утвориться стабільний отвір і канал не спорожніє. Потім отвір періодично виривається, оскільки основа матеріалу провалюється над гвинтом. Це продовжуватиме розширювати канал потоку, і цей циклічний цикл «відмова-потік-порожній» триватиме, доки бункер не спорожниться.

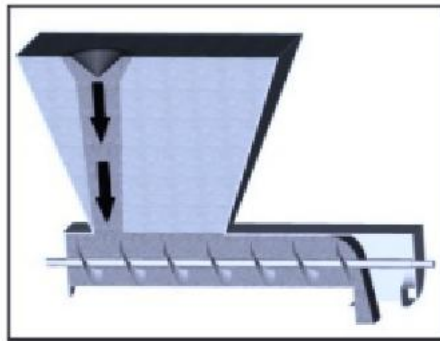


Рис. 2.16. Шнековий живильник з постійним кроком, шнек постійного діаметра.

Шнековий живильник масового потоку, що складається з конічної секції, за якою йде секція зі збільшенням кроку, забезпечує збільшення пропускної здатності живильника в напрямку потоку (див. рисунок 2.17). Довжина конуса і графік кроку вибираються так, щоб продуктивність шнека зростала лінійно вздовж довжини бункера. Діаметр шнека повинен дорівнювати ширині вихідного отвору бункера, а жолоб має бути приблизно на один дюйм ширшим за шнек. Допуски на виготовлення обмежують співвідношення довжини та ширини бункера менше ніж 8, бажано менше ніж 6.

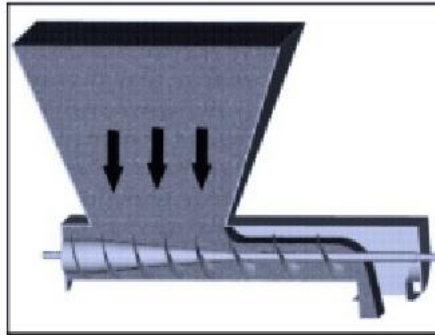


Рис. 2.17. Шнековий живильник масової витрати.

Кінцевий крок визначає потужність шнекового живильника, тобто:

$$q = \frac{N\pi(D^2 - d^2)(P_f - t)}{4} \quad (30)$$

де  $D$  і  $d$  — діаметри шнека та валу відповідно,  $q$  — об'ємна швидкість вивантаження,  $P_f$  — крок кінцевого шнека (також відомий як крок транспортування),  $t$  — товщина шнека, а  $N$  — швидкість шнека. Шнекові живильники, як правило, працюють приблизно на 80 відсотків від повної потужності, і найкраще працювати при частоті обертання від 3 до 40 об/хв.

Корито має бути U-подібної форми, а не V-подібної, щоб запобігти застоюванню матеріалу. Польоти гвинта повинні мати менший коефіцієнт тертя, ніж жолоб; інакше матеріал обертатиметься навколо валу й не транспортуватиметься.

### Висновки до розділу 2

У цьому розділі проведено аналіз технологічного процесу переміщення сипких харчових продуктів в зону пакування з урахуванням різних факторів, таких як швидкість подачі, розмір часток продукту, тиск упаковки та інші. Визначено ключові аспекти, які впливають на ефективність цього процесу.

### Розділ 3. Дослідження точності дозування

Одна з найважливіших характеристик дозувальних пристроїв – точність дозування. Це подача дозованої продукції у відповідності до заданої похибки і вагової продуктивності. Здійснювати абсолютно точне дозування практично неможливо. На точність дозування впливає велика кількість факторів:

- власні і вимушені коливання зважувальної системи;
- нерівномірність подачі продукції в дозувальний механізм;
- характер взаємодії зважувальної системи з дозованою продукцією;
- ступінь заповнення бункера-накопичувача;
- змінення фізико-механічних і технологічних властивостей продукції під дією зовнішніх силових, температурних та інших факторів.

Похибка дозування  $\Delta$  - відхилення результатів вимірювання величини доз продукції від дійсного або номінального значення.

В залежності від форми представлення розрізняють абсолютну  $\Delta$  та відносну  $\delta$  похибку дозування.

Абсолютна похибка виражається в тих же одиницях вимірювання, що і величина дози. Відношення абсолютної похибки дозування  $\Delta$  до номінального значення величини дози називають відносною похибкою  $\delta$ , що виражається у відсотках або частці.

Для визначення величини похибки і проведення метрологічних досліджень із потоку пакованих одиниць, одержаних при сталій роботі пакувальної машини, здійснюють вибірку із  $N$  послідовних доз.

Необхідну і достатню величину вибірки доз можна знайти за допомогою теореми Ляпунова, згідно з якою справедлива нерівність:

$$\frac{M_H - M_C}{S \cdot \sqrt{N}} < t_s \quad (31)$$

де  $M_C$  - середнє значення маси дози продукції;

$S$  – середнє квадратичне відхилення величини дози;

$t_s$  - нормоване відхилення;

Нерівність справедлива при нормальній функції розподілення похибок вимірювання. На основі результатів метрологічної атестації різних типів дозувальних пристроїв встановлено, що число проб не повинно бути меншим двадцяти.

Визначаємо кількість вибірок дози з машини фірми Krossan для пакування глазурованих пластівців в полімерну плівку.

Номінальна продуктивність машини становить 1,2 т/год, тривалість формування дози 3 с.

Отже отримана кількість вибірок рівна 30 ( $N=30$ ).

Використовуючи елементи теорії математичної статистики, перевіряють ідентифікацію закону розподілення похибок стаціонарного процесу дозування. Перевірка гіпотез про ступінь наближення елементарних розподілень до деяких математичних моделей здійснюється на основі критеріїв погодження, частіше всього критерію Пірсона. Уточнивши закон розподілення похибок, переходять безпосередньо до її метрологічної оцінки. В результаті проведеної вибірки глазурованих пластівців «Ласунка», що були фасовані автоматом фірми Krossan був отриманий ряд значень мас:

1) 1009 2) 997 3) 1001 4) 998 5) 1005 6) 995 7) 1010 8) 999 9) 1000 10) 997 11) 1007 12) 1002 13) 997 14) 1009 15) 1002 16) 999 17) 1002 18) 1009 19) 1006 20) 1001 21) 995 22) 997 23) 1001 24) 996 25) 1004 26) 1009 27) 998 28) 1002 29) 1007 30) 1010

Номінальна маса 1 кг (1000 г)

Визначаємо середнє арифметичне значення маси  $N$  послідовних доз:

$$M_C = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} M_i}{N} \quad (32)$$

$$M_C = \frac{1009 + 997 + 1001 + \dots + 1002 + 1007 + 1010}{30} = 1002,13 \text{ гр} \quad (33)$$

Тоді абсолютну похибку вибірки із N доз можна визначити за формулою:

$$\Delta M_C = |M_H - M_C| \quad (34)$$

$$\Delta M_C = |1000 - 1002,13| = 2,13 \quad (35)$$

Абсолютна похибка вибірки або середнє значення похибки характеризує систематичну похибку або рівень налагодження дозатора.

Похибка дозування системи може бути викликана:

- неправильним регулюванням величини дози;
- змінами пружних властивостей деталей дозатора;
- первинною і динамічною похибкою виконання дозувального пристрою та інше.

Під час проведення відповідного аналізу технічної системи дозування можна практично виключити систематичну складову похибки дозування. Згідно з існуючими методиками метрологічної атестації дозувальних пристроїв, систематична похибка не враховується, зважаючи на її малі величини в порівнянні із випадковою похибкою. Випадкова похибка дозування – це похибка, яка формується операцією дозування і залежить від перерахованих вище факторів, що впливають на точність дозування.

За основу точності дозування або випадкової похибки приймають середнє квадратичне відхилення маси дози від її середнього значення:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N} (M_i - M_C)^2}{N - 1}} \quad (36)$$

$$S = \sqrt{\frac{(1009-1002,13)^2 + (997-1002,13)^2 + \dots + (1007-1002,13)^2 + (1010-1002,13)^2}{30-1}} = 20,2p \quad (37)$$

Тоді довірчу межу допустимого відхилення випадкової похибки маси дози визначають за формулою:

$$\Delta M_B = \pm t \cdot S \quad (38)$$

$$\Delta M_B = \frac{1010-995}{18} = 0,83 \quad (39)$$

де  $t$  коефіцієнт Ст'юдента для числа вибірок  $N$  і довірчої ймовірності, визначається за ГОСТ 8.207-76

Також враховуємо систематичну похибку, яка визначає повну абсолютну похибку дозування:

$$\Delta = \Delta M_C + \Delta M_B \quad (40)$$

$$\Delta = 2,13 + 0,83 = 2,96 \quad (41)$$

Також за заданих вихідних даних визначаємо абсолютну похибку маси одиничної дози, виданої дозатором із вибраної  $N$  вибірки:

$$\Delta M_i = |M_H - M_i| \quad (42)$$

$$\Delta M_1 = |1009 - 1002,13| = 6,87$$

$$\Delta M_2 = |997 - 1002,13| = 5,13$$

$$\Delta M_3 = |1001 - 1002,13| = 1,13$$

$$\Delta M_4 = |998 - 1002,13| = 4,13$$

$$\Delta M_5 = |1005 - 1002,13| = 2,87$$

$$\Delta M_6 = |995 - 1002,13| = 7,13$$

$$\Delta M_7 = |1010 - 1002,13| = 7,87$$

$$\Delta M_8 = |999 - 1002,13| = 3,13$$

$$\Delta M_9 = |1000 - 1002,13| = 2,13$$

$$\Delta M_{10} = |997 - 1002,13| = 5,13$$

$$\Delta M_{11} = |1007 - 1002,13| = 4,87$$

$$\Delta M_{12} = |1002 - 1002,13| = 0,13$$

$$\Delta M_{13} = |997 - 1002,13| = 5,13$$

$$\Delta M_{14} = |1009 - 1002,13| = 6,87$$

$$\Delta M_{15} = |1002 - 1002,13| = 0,13$$

$$\Delta M_{16} = |999 - 1002,13| = 3,13$$

$$\Delta M_{17} = |1002 - 1002,13| = 0,13$$

$$\Delta M_{18} = |1009 - 1002,13| = 6,87$$

$$\Delta M_{19} = |1006 - 1002,13| = 3,87$$

$$\Delta M_{20} = |1001 - 1002,13| = 1,13$$

$$\Delta M_{21} = |995 - 1002,13| = 7,13$$

$$\Delta M_{22} = |997 - 1002,13| = 5,13$$

$$\Delta M_{23} = |1001 - 1002,13| = 1,13$$

$$\Delta M_{24} = |996 - 1002,13| = 6,13$$

$$\Delta M_{25} = |1004 - 1002,13| = 1,87$$

$$\Delta M_{26} = |1009 - 1002,13| = 6,87$$

$$\Delta M_{27} = |998 - 1002,13| = 4,13$$

$$\Delta M_{28} = |1002 - 1002,13| = 0,13$$

$$\Delta M_{29} = |1007 - 1002,13| = 4,87$$

$$\Delta M_{30} = |1010 - 1002,13| = 7,87$$

За результатами отриманих значень побудуємо графічну залежність, що показує значення відхилень абсолютної похибки дозування від допустимих значень.

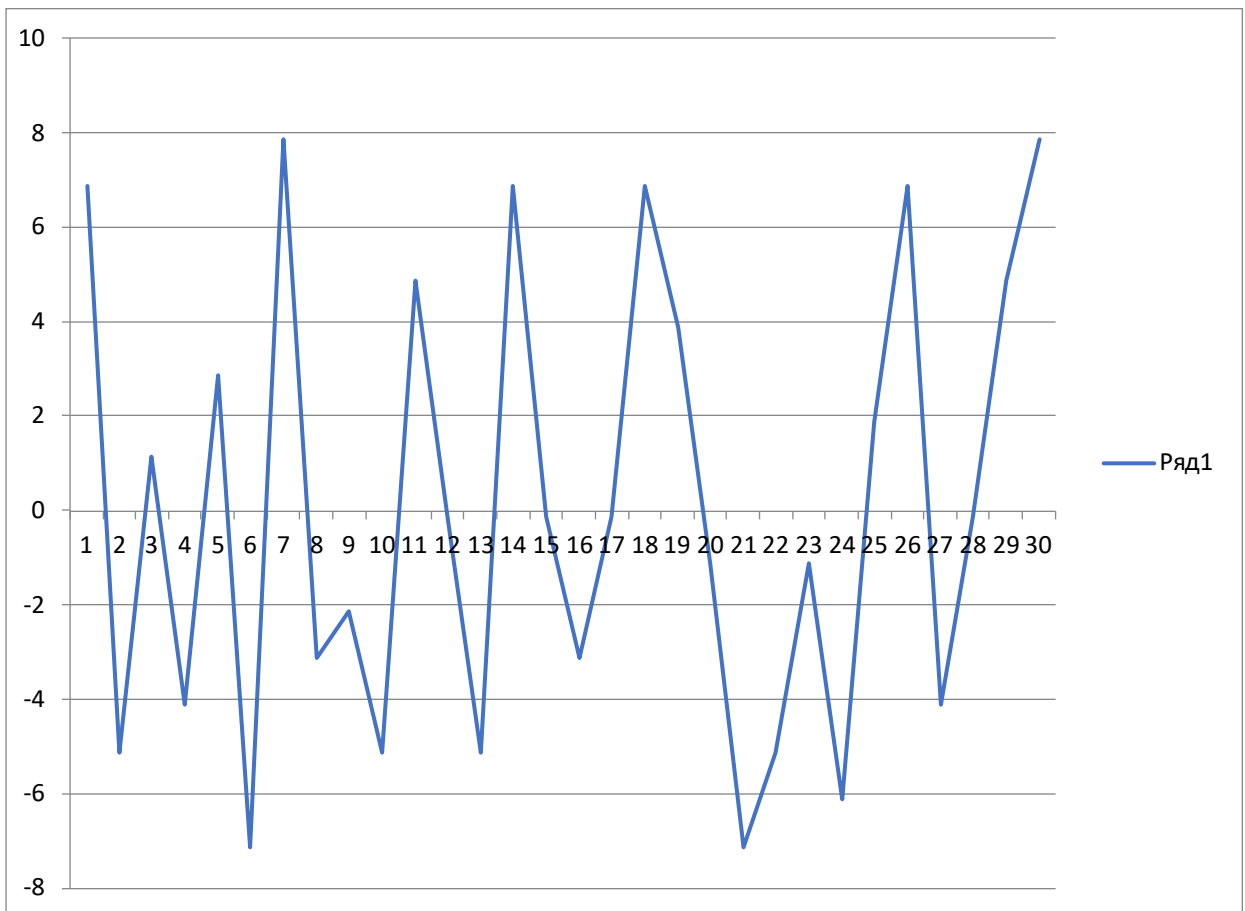


Рис.3.1.Графік відхилень абсолютної похибки дозування

За даними графіка можна спостерігати зміну залежності абсолютної похибки дозування, максимальна з них не перевищує допустиму.

Також визначаємо повну похибку дозування:

$$\delta = \frac{\Delta}{M_H} \cdot 100\% \quad (43)$$

$$\delta = \frac{2,96}{1000} \cdot 100\% = 0,29\% \quad (44)$$

Висновок: На основі отриманих даних отримана похибка дозування в межах 0,29%, що входить в межі допустимої похибки дозування  $\pm 2\%$ . Отже автомат налагоджений правильно, його конструктивні особливості дозволяють гасити всі фактори, що могли б вплинути на похибку дозування.

Величини систематичних і випадкових похибок у випадку їх невідповідності заданим значенням або встановленим ДСТУ є предметом для аналізу базових рішень, прийнятих під час конструювання дозатора, а саме:

- повнота використання точнісних можливостей за датчиків маси і правильний вибір кінематичних зв'язків за датчика з механічними елементами конструкції;
- конструктивне виконання заслінок мірної ємності, тип і потужність приводів, інерційність рухомих деталей;
- розміри і взаємне розташування подаючих каналів, заслінок і накопичувальних пристроїв;
- нерівномірність роботи живильників, працюючих на один зважувальний бункер;
- раціональність вибору параметрів циклограми роботи дозатора і т.ін.

Так як точність роботи дозатора залежить від багатьох факторів, не можна однозначно стверджувати, що застосування деяких із способів дозування підвищує точність, а інших – зменшує. Відомо, що добре зважена конструктивна проробка об'ємного дозатора дозволяє одержати точність не нижчу, ніж в кращих зразках вагових дозаторів. А тому правильно підходити до вибору дозатора потрібно не з вимог точності, а з відповідності його конструкції типу продукції. Практично всі існуючі сьогодні дозатори дозволяють формувати дозу продукції з похибкою 1-3% і точніше. Інша мова йде про продуктивність. Тут дійсно є прямий зв'язок з конструкцією дозатора, а отже чим більша продуктивність дозатора тим більше йде вплив

на точність дозування, що пов'язано зі зменшенням часу на один технологічний цикл дозування.

### **Дослідження залежності заповнення мірної ємності від маси частинки**

Одним із основних факторів, що впливає на точність дозування є ступінь заповнення мірної ємності. Була поставлена задача: дослідити залежність маси однієї дозованої частинки від наповненості мірної ємності, тобто встановити, яка можлива максимальна маса частинки, та на скільки буде заповнений бункер, щоб при падінні частинки не відбулось спрацювання датчиків і доза неповна доза продукту потрапила на фасування.

Задачу будемо розв'язувати на базі теорії про прямий центральний удар двох тіл.

Явище, під час якого швидкість точок матеріального об'єкта змінюється на скінченну величину за досить малий проміжок часу, називається ударом. Проміжок часу, за який відбувається скінченна зміна швидкостей точок матеріального об'єкта, називається – часом удару. Час удару практично вимірюється тисячними і меншими частками секунди.

Сили, що діють на точки матеріального об'єкта при ударі, можна поділити на звичайні (скінченні) сили, які змінюють швидкість точок об'єкта за певний проміжок часу, і на миттєві, або ударні, які змінюють швидкість точок матеріального об'єкта за досить малий проміжок часу.

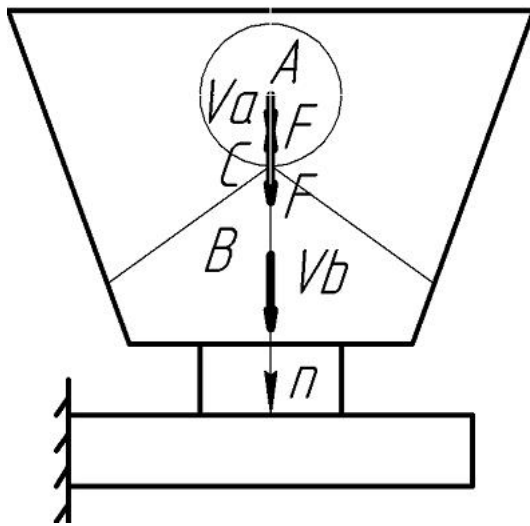
Проаналізуємо явище удару на прикладі зіткнення двох матеріальних тіл А і В. Нехай дотик тіл відбувається в одній точці С і до зіткнення тіло А мало

швидкість  $\vec{V}_A$ , а після зіткнення – швидкість  $\vec{U}_A$ .

Внаслідок взаємодії між тілами А і В виникає ударна сила. На підставі теореми про зміну кількості руху матеріальної точки для тіла А можна записати:

$$m_A \vec{U}_A - m_A \vec{V}_A = \vec{S} = \int_0^{\tau} \vec{F} dt \quad (45)$$

де  $\tau$  - час дії ударної сили (час удару). З формули випливає, якщо  $\vec{U}_A \neq \vec{V}_A$  на скінченну величину, то імпульс ударної сили  $\vec{S}$  також має скінченну величину. Оскільки  $\tau$  - дуже мала величина, то щоб імпульс  $\vec{S}$  (ударний імпульс) мав також скінченну величину, величина ударної сили має бути значною.



Таким чином, під час удару за дуже малий проміжок часу виникає ударна сила значної величини, яка створює ударний імпульс скінченної величини.

Подамо деякі визначення, що застосовуються при вивченні зіткненні матеріальних об'єктів. Загальна нормаль  $n$  до поверхні матеріальних об'єктів у точці дотику цих об'єктів

Рис.3.2.Розрахункова схема падіння частинки

називається лінією удару. Удар називається центральним, якщо центри мас матеріальних об'єктів при зіткненні лежать на лінії удару. Центральний удар називається прямим, якщо вектори швидкостей центрів мас матеріальних об'єктів до удару мають напрям уздовж лінії удару; в протилежному випадку удар називається косим. Якщо центр мас співударних матеріальних об'єктів не розташовані на лінії удару, то удар називається позацентровим.

Проаналізувавши рівняння для матеріальних тіл А і В на початку удару

відомі вектори швидкостей  $\vec{V}_A$  і  $\vec{V}_B$ . Щоб визначити швидкість тіла А і В у

кінці удару  $\vec{U}_A$  і  $\vec{U}_B$  за формулою, необхідно знати величину ударного

імпульсу  $\vec{S}$ . Отже, для розв'язання цієї задачі необхідно розглянути додаткові умови. Будемо вважати, що тіла А і В пружні, а їх поверхні абсолютно гладенькі. Тоді після моменту зіткнення обидва тіла деформуються, при цьому швидкість тіла А зменшується, а швидкість тіла В

збільшується ( $\vec{V}_A > \vec{V}_B$ ). Процес деформації закінчується тоді, коли швидкості тіл стають рівними. Цю частину удару називають фазою

деформації. Час тривалості цієї фази позначимо через  $\tau_1$ .

Ударна сила  $F$ , що діє з боку тіла А на тіло В, має напрям уздовж лінії удару праворуч, і  $F = -F'$ .

Ударний імпульс сили  $F$  за фазу деформації

$$\vec{S}_1 = \int_0^{\tau_1} \vec{F} dt \quad (46)$$

Імпульс сили  $F'$  за фазу деформації позначимо через  $\vec{S}'_1$ . Очевидно,

$$\vec{S}'_1 = -\vec{S}_1 \quad (47)$$

Після деформації тіла відновлюють свою форму повністю або частково залежно від ступеня пружності. Ця частина удару називається фазою

відновлення. Тривалість цієї фази позначимо через  $\tau_2$ . Фаза відновлення

закінчується в момент відділення тіл одне від іншого. Імпульс ударної сили, який діє на тіло А, під час фази відновлення становить:

$$\vec{S}_2 = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \vec{F} dt \quad (48)$$

Ефект дії ударної сили оцінюють за повним імпульсом:

$$\vec{S} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2 \quad (49)$$

Пружність співударних тіл під час удару оцінюють відношенням проекції ударного імпульсу фази відновлення до ударного імпульсу фази деформації на загальну нормаль  $n$ . Це відношення називається коефіцієнтом відновлення і позначається літерою  $k$ :

$$k = \frac{\vec{S}_2 \cdot \vec{n}}{\vec{S}_1 \cdot \vec{n}} = \frac{S_{2n}}{S_{1n}} \quad (50)$$

де  $|\vec{n}| = 1$

Коефіцієнт відновлення має безрозмірну величину. Залежно від природи матеріальних тіл він змінюється у межах від нуля до одиниці:  $0 \leq k \leq 1$ . Якщо

$$\vec{S}_2 = 0$$

$k=0$ , величина , тобто фаза відновлення відсутня. Такий удар називається абсолютно непружним (пластичним). У випадку, якщо  $k=1$ ,

$$\vec{S}_2 = \vec{S}_1$$

тобто , можна вважати, що за фазу відновлення тіло повністю відновлює свою форму. Такий удар називається абсолютно пружним. Якщо  $0 < k < 1$ , відбувається удар середньої пружності, і такий удар називається пружним.

Таким чином, для розв'язання практичних задач механіки удару необхідно в кожному конкретному випадку удару матеріальних об'єктів знати коефіцієнт відновлення.

Розглянемо прямий центральний удар двох тіл. Нехай  $\vec{V}_A > \vec{V}_B$  і коефіцієнт відновлення  $k$  для співударних тіл А і В відомий. Визначимо швидкість тіл А

і В в кінці удару, тобто  $\vec{U}_A, \vec{U}_B$ . Оскільки до системи тіл А і В зовнішні ударні імпульси не прикладені, то з виразу випливає, що кількість руху системи співударних тіл А і В під час удару не змінюється, тому

$$m_A V_A + m_B V_B = m_A U_A + m_B U_B, \quad (51)$$

де  $V_A$  і  $V_B$  – проекції векторів швидкостей відповідно тіл А і В на початку удару на нормаль  $n$ ;  $U_A$  і  $U_B$  – проекції векторів швидкостей відповідно тіл А і В у кінці удару на нормаль  $n$ .

Рівняння містить дві невідомі величини  $U_A$  і  $U_B$ , тому, щоб їх визначити, необхідно скласти ще одне рівняння. За визначенням  $k$  на підставі формули коефіцієнт відновлення для співударних тіл А і В

$$k = -\frac{U_n}{V_n} = -\frac{U_A - U_B}{V_A - V_B}, \quad (52)$$

де  $U_n = U_A - U_B$  – проекція вектора швидкості тіла А на початку удару на нормаль  $n$ .

Об'єднавши рівняння, матимемо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} m_A V_A + m_B V_B &= m_A U_A + m_B U_B \\ k &= \frac{U_A - U_B}{V_A - V_B} \end{aligned} \quad (53)(54)$$

Розв'язуючи систему рівнянь, визначимо проекції векторів швидкостей тіл А і В у кінці удару на нормаль  $n$ :

$$U_A = V_A - (1+k) \frac{m_B}{m_A + m_B} (V_A - V_B)$$

$$U_B = V_B - (1+k) \frac{m_A}{m_A + m_B} (V_B - V_A) \quad (54)(55)$$

Тепер знайдемо зміну кінематичної енергії  $T - T_0$  системи співударних тіл А і В за час удару.

Очевидно, що:

$$T - T_0 = \left( \frac{m_A U_A^2}{2} + \frac{m_B U_B^2}{2} \right) - \left( \frac{m_A V_A^2}{2} + \frac{m_B V_B^2}{2} \right) =$$

$$= \frac{m_A}{2} (U_A - V_A)(U_A + V_A) + \frac{m_B}{2} (U_B - V_B)(U_B + V_B) \quad (56)$$

Із системи випливає:

$$U_A - V_A = -(1+k) \frac{m_B}{m_A + m_B} (V_A - V_B)$$

$$U_B - V_B = (1+k) \frac{m_A}{m_A + m_B} (V_B - V_A) \quad (57)(58)$$

Підставляючи ці вирази в рівність, здобудемо

$$T - T_0 = \frac{m_A m_B}{2(m_A + m_B)} (1+k)(V_A - V_B)(-U_A - V_A + U_B + V_B) \quad (59)$$

Враховуючи вираз, перетворимо рівняння так:

$$T - T_0 = \frac{m_A m_B}{2(m_A + m_B)} (1+k) [k(V_A - V_B) + V_B - V_A] =$$

$$= \frac{m_A m_B}{2(m_A + m_B)} (1+k)(1-k)(V_A - V_B)^2 \quad (60)$$

або остаточно

$$T - T_0 = -\frac{m_A m_B}{2(m_A + m_B)} (1 - k)^2 (V_A - V_B)^2 \quad (61)$$

З виразу випливає, що при  $k \neq 1$   $T < T_0$ , тобто за час удару відбувається втрата кінетичної енергії системи співударних тіл А і В:

$$T_{BTP} = T - T_0 \quad (62)$$

Якщо  $k = 1$  (абсолютно пружний удар), то  $T = T_0$ , тобто кінетична енергія системи співударних тіл не втрачається. Якщо  $k = 0$  (абсолютно непружний удар), то із системи випливає, що

$$U = U_A = U_B = \frac{m_A V_A + m_B V_B}{m_A + m_B} \quad (63)$$

Форма визначає спільну швидкість тіл у кінці прямого центрального абсолютно непружного удару.

Втрачену енергію при ударі ( $k=0$ ) визначимо за формулою:

$$T_{BTP} = \frac{m_A m_B}{2(m_A + m_B)} (V_A - V_B)^2 \quad (64)$$

Нехай тепер одне з тіл, наприклад тіло В, буде нерухомим, тобто  $V_B = 0$ .

Тоді з рівностей випливає:

$$U = \frac{m_A V_A}{m_A + m_B};$$

$$T_{BTP} = \frac{m_A m_B}{2(m_A + m_B)} V_A^2 \quad (65)(66)$$

Таким чином, обидва тіла в кінці удару рухаються з однією швидкістю  $U$ . Тому кінетична енергія, яка залишається у системі (залишкова кінетична енергія),

$$T_{3AL} = \frac{(m_A + m_B)U^2}{2} = \frac{m_A^2 V_A^2}{2(m_A + m_B)} \quad (67)$$

Кінетична енергія системи на початку удару  $T_0$  (запас енергії) складається

тільки з кінетичної енергії тіла А, тобто  $T_0 = \frac{m_A V_A^2}{2}$ . Тоді для втраченої і залишкової кінетичних енергій системи маємо:

$$T_{3AL} = \frac{m_A T_0}{m_A + m_B} = \frac{T_0}{1 + \frac{m_B}{m_A}}$$

$$T_{BTP} = \frac{m_B T_0}{m_A + m_B} = \frac{T_0}{1 + \frac{m_A}{m_B}} \quad (68)(69)$$

Практично удар використовується або для деформації тіл, або для надання тілам швидкості. Втрачена системою кінетична енергія витрачається на деформацію тіл, залишкова кінетична енергія – на подолання опору в подальшому русі тіл. Якщо удар використовується для деформування тіл, то втрачена кінетична енергія має становити значну частину загального запасу енергії. З першої формули випливає, що цей випадок буде мати місце, якщо  $m_B \gg m_A$

, тобто маса нерухомого тіла, наприклад ковадла під час кування, має бути значно більшою маси тіла, що ударяє (молот).

Якщо удар виконується для надання швидкості співударним тілам, то залишкова кінетична енергія має становити значну частину загального запасу енергії. З другої формули випливає, що цей випадок буде мати місце, якщо

$$m_B \gg m_A$$

, тобто маса тіла, що ударяється, наприклад молотка під час забивання цвяхів, має бути значно більшою маси нерухомого тіла – цвяха.

Якщо має місце абсолютно пружний удар ( $k=1$ ) для тіл з однаковою масою

$$(m_B = m_A)$$

$$U_A = V_A, U_B = V_A$$

, з рівностей матимемо

. Отже, під час

абсолютно пружного удару тіл з однаковою масою має місце обмін

швидкостями і втрата кінетичної енергії не відбувається.

На базі теореми проведемо розрахунки залежності маси частинки від маси мірної ємності.

Інерційна ударна сила дорівнює:

$$S_{y\partial} = (1+k) \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} V \quad (70)$$

Сила удару, що буде діяти при падінні частинки:

$$F_{y\partial} = \frac{S_{y\partial}}{\tau_{y\partial}} = \frac{(1+k)m_1 m_2 V}{\tau_{y\partial} (m_1 + m_2)} \quad (71)$$

Звідси:

$$F_{y\partial} (m_1 + m_2) \tau_{y\partial} = (1+k)m_1 m_2 V \quad (72)$$

$$F_{y\partial} m_1 \tau_{y\partial} - (1+k)m_1 m_2 V = F_{y\partial} m_1 \tau_{y\partial}$$

$$m_1 [(1+k)m_2 V - F_{y\partial} \tau_{y\partial}] = F_{y\partial} m_2 \tau_{y\partial}$$

$$m_1 = \frac{F_{y\partial} m_2 \tau_{y\partial}}{(1+k)m_2 V - F_{y\partial} \tau_{y\partial}} \quad (73)(74)(75)$$

де:  $\tau_{y\partial} = 0,02c$  - час удару частинки;  $k=0$  – для абсолютно недружньої частинки;

$$V = \sqrt{2gh} \quad (76)$$

прийемо  $h=200$  мм, для подальших розрахунків; масу бункера приймаємо 10 кг.

$$F_{y\partial} = \frac{m_1(-kV) + m_1V}{\tau_{y\partial}} \quad (77)$$

Отже, підставивши значення в основний вираз отримаємо:

$$m_1 = \frac{\frac{m_1(-k\sqrt{2gh}) + m_1\sqrt{2gh}}{\tau_{y\partial}} m_2 \tau_{y\partial}}{(1+k)m_2\sqrt{2gh} - \frac{m_1(-k\sqrt{2gh}) + m_1\sqrt{2gh}}{\tau_{y\partial}} \tau_{y\partial}} \quad (78)$$

$$m_1 = \frac{[m_1(-k\sqrt{2gh}) + m_1\sqrt{2gh}]m_2}{(1+k)m_2\sqrt{2gh} - [m_1(-k\sqrt{2gh}) + m_1\sqrt{2gh}]} \quad (79)$$

$$m_1 = \frac{[m_1(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + m_1\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}]1000}{(1+0)11000\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200} - [m_1(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + m_1\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}]}$$

$$m_1 = 8g \quad (80)$$

Отже максимальний розмір однієї частинки буде дорівнювати 8 г. Її ударна

сила при падінні буде дорівнювати:

$$F_{y\partial} = \frac{8(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 8\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} \quad (81)$$

$$F_{y\partial} = \frac{8(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 8\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} \quad (82)$$

$$F_{y\partial} = 0,56H \cdot m \quad (83)$$

Отже при такій масі частинки (8г) максимально допустима наповненість бункера буде дорівнювати  $1000-56=944$ г. При такій наповненості мірної ємності (944 г), частинка масою 8 г викличе ударну силу, що змусить запрацювати мірні датчики, і на фасування буде подана доза в розмірі 952 г, що й причинить велику похибку дозування.

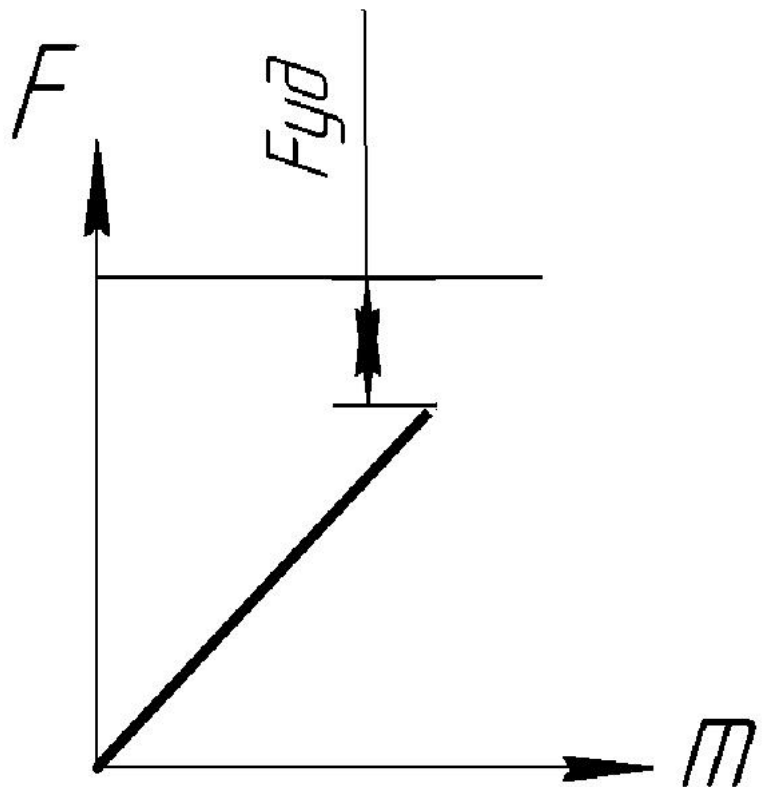


Рис.3.3Графік залежності набору маси продукту

До уваги також береться те, що врахування маси частинки береться при точному дозуванні, коли потік продукції мінімальний. Але спочатку в зважувальну ємність набирається маса продукту, що становить 60-70% номінальної дози продукту, а вже потім відбувається точне дозування, де і враховується маса однієї частинки.

Тепер розрахуємо наповненість мірної ємності для інших мас частинки:

Для маси частинки в 7,5 г:

$$F_{y\partial} = \frac{7,5(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 7,5\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,49H \cdot m \quad (84)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-49=951$  г.

Для маси частинки в 7 г:

$$F_{y\partial} = \frac{7(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 7\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,42H \cdot m \quad (85)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-42=958$  г.

Для маси частинки в 6,5 г:

$$F_{y\partial} = \frac{6,5(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 6,5\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,38H \cdot m \quad (85)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-38=962$  г.

Для маси частинки в 6 г:

$$F_{y\partial} = \frac{6(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 6\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,32H \cdot m \quad (86)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-32=968$  г.

Для маси частинки в 5,5 г:

$$F_{y\partial} = \frac{5,5(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 5,5\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,26H \cdot m \quad (87)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-26=974$  г.

Для маси частинки в 5 г:

$$F_{y\partial} = \frac{5(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 5\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,21H \cdot m \quad (88)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-21=979$  г.

Для маси частинки в 4,5 г:

$$F_{y\partial} = \frac{4,5(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 4,5\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,19H \cdot m \quad (89)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-19=981$  г.

Для маси частинки в 4 г:

$$F_{y\partial} = \frac{4(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 4\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,15H \cdot m \quad (90)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-15=985$  г.

Для маси частинки в 3,5 г:

$$F_{y\partial} = \frac{3,5(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 3,5\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,12H \cdot m \quad (91)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-12=988$  г.

Для маси частинки в 3 г:

$$F_{y\partial} = \frac{3(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 3\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,09H \cdot m \quad (92)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-9=991$  г.

Для маси частинки в 2,5 г:

$$F_{y\partial} = \frac{2,5(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 2,5\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,07H \cdot m \quad (93)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-7=993$  г.

Для маси частинки в 2 г:

$$F_{y\partial} = \frac{2(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 2\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,06H \cdot m \quad (94)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-6=994$  г.

Для маси частинки в 1,5 г:

$$F_{y\partial} = \frac{1,5(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 1,5\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,05H \cdot m \quad (95)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-5=995$  г.

Для маси частинки в 1 г:

$$F_{y\partial} = \frac{1(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 1\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,03H \cdot m \quad (96)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-3=997$  г.

Для маси частинки в 0,5 г:

$$F_{y\partial} = \frac{0,5(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 0,5\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,015H \cdot m \quad (97)$$

Отже при такій масі частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000 - 1,5 = 998,5$  г.

З отриманих даних побудуємо графічну залежність для візуалізації отриманих розрахункових даних:

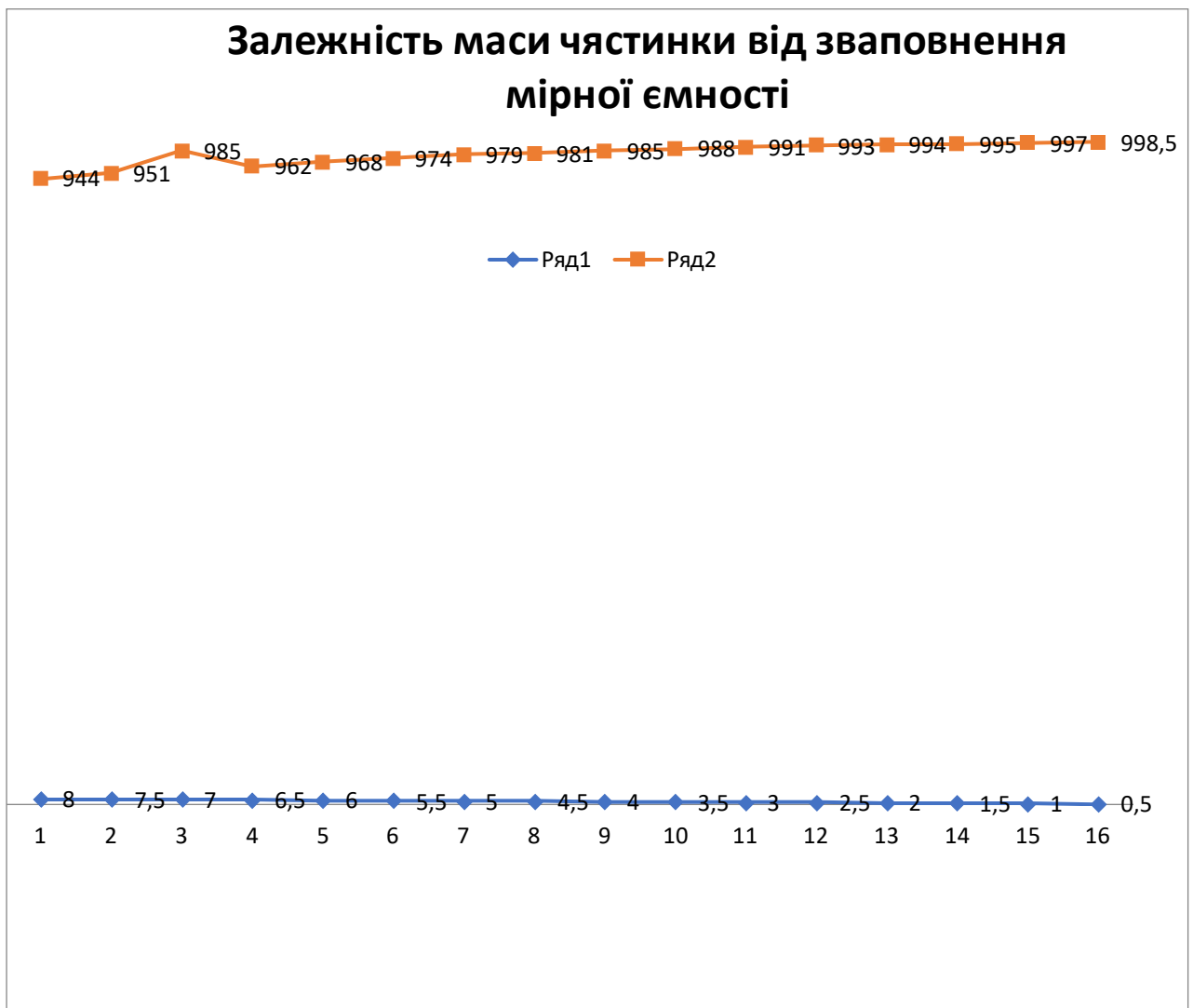


Рис.3.4.Залежність маси частинки від заповнення мірної ємності.

Ряд 1 – маса частинок (г);

Ряд 2 – маса наповненості бункера (г);

**Дослідження залежності заповнення мірної ємності  
від висоти падіння частинки**

Тепер спробуємо отримати залежність виходячи з висоти падіння частинки.  
За основу розрахунків приймаємо частинку масою 8 г та масу бункера 10 кг.

Для висоти падіння 500 мм:

$$F_{y\partial} = \frac{8(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 500}) + 8\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 500}}{0,02} = 0,92H \cdot m \quad (98)$$

Отже при такій висоті падіння частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-92=908$  г.

Для висоти падіння 450 мм:

$$F_{y\partial} = \frac{8(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 450}) + 8\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 450}}{0,02} = 0,85H \cdot m \quad (99)$$

Отже при такій висоті падіння частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-85=915$  г.

Для висоти падіння 400 мм:

$$F_{y\delta} = \frac{8(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 400}) + 8\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 400}}{0,02} = 0,78H \cdot m \quad (100)$$

Отже при такій висоті падіння частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-78=922$  г.

Для висоти падіння 350 мм:

$$F_{y\delta} = \frac{8(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 350}) + 8\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 350}}{0,02} = 0,64H \cdot m \quad (101)$$

Отже при такій висоті падіння частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-64=936$  г.

Для висоти падіння 300 мм:

$$F_{y\delta} = \frac{8(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 300}) + 8\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 300}}{0,02} = 0,58H \cdot m \quad (102)$$

Отже при такій висоті падіння частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-58=942$  г.

Для висоти падіння 250 мм:

$$F_{y\delta} = \frac{8(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 250}) + 8\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 250}}{0,02} = 0,51H \cdot m \quad (103)$$

Отже при такій висоті падіння частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-51=949$  г.

Для висоти падіння 200 мм:

$$F_{y\partial} = \frac{8(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}) + 8\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200}}{0,02} = 0,49H \cdot m \quad (104)$$

Отже при такій висоті падіння частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-49=951$  г.

Для висоти падіння 150 мм:

$$F_{y\partial} = \frac{8(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 150}) + 8\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 150}}{0,02} = 0,42H \cdot m \quad (105)$$

Отже при такій висоті падіння частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-42=958$  г.

Для висоти падіння 100 мм:

$$F_{y\partial} = \frac{8(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 100}) + 8\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 100}}{0,02} = 0,34H \cdot m \quad (106)$$

Отже при такій висоті падіння частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-34=966$  г.

Для висоти падіння 50 мм:

$$F_{y\partial} = \frac{8(-0\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 50}) + 8\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 50}}{0,02} = 0,27H \cdot m \quad (107)$$

Отже при такій висоті падіння частинки максимальна наповненість мірної ємності становитиме  $1000-27=973$  г.

Тепер з отриманих даних побудуємо графічну залежність для візуалізації отриманих даних:

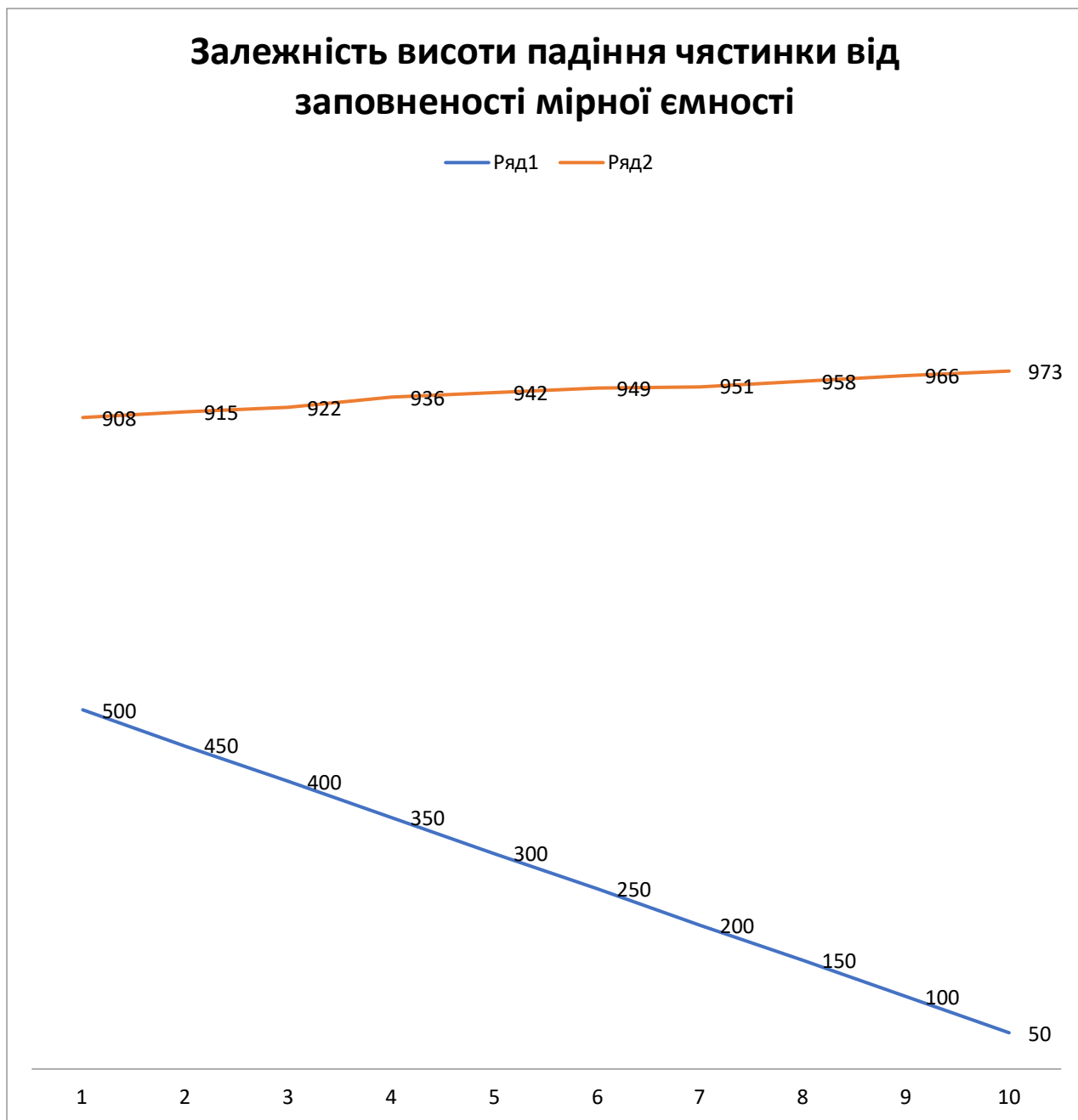


Рис.3.5.Залежність висоти падіння частинки від заповнення мірної ємності.

Ряд 1 – висота падіння частинки (мм);

Ряд 2 – заповнення мірної ємності (г);

З проведених математичних досліджень можна зробити висновок, що похибка дозування сипких продуктів залежить від багатьох факторів. В проведених розрахунках було взято за основу два основні фактори – це маса однієї частинки що дозується та висота падіння цієї ж частинки.

В результаті отриманих даних можна зробити висновок, що маса частинки суттєво впливає на точність дозування, тому що чим більша частинка тим більше виникає ударне зусилля при її падінні, і тому точність дози досить мала. Як показано на першій графічній залежності маса частинки прямо пропорційна масі дози що вже знаходиться в мірній ємності.

Тому чим менша частинка, тим менше ударне зусилля вона викликати при падінні, тим більша кількість продукту буде знаходитись в мірній ємності. В наших розрахунках мінімальна маса частинки була 0,5 г, при такій масі максимальна наповненість бункера становила 998, 5 г (при масі номінальної дози в 1000 г) і при дозуванні максимальна похибка що може виникнути становитиме близько 1 г, що становить 0,1%. Це дуже незначна похибка, тому рекомендується обирати продукт з мінімальним розміром однієї частинки для збільшення точності дозування (або приводити цей продукт до таких норм).

Іншим не менш важливим фактором є висота падіння частинки. Це викликано тим, що при збільшенні висоти падіння частинки збільшується ударна сила і відбувається спрацювання датчиків ще за неповної дози продукту. В наведених розрахунках максимальна висоти падіння приймалася 500 мм, при масі частинки в 8 г. За таких параметрів максимальна

наповненість бункера може становити лише 908 г, при такій наповненості похибка дозування становитиме близько 10%, що є недопустимим.

Тому рекомендується приймати мінімальну висоту падіння частинки, виходячи при цьому з конструктивних особливостей дозатора. Також на похибку дозування можна впливати варіюючи масо мірної ємності. При розрахунках враховувалася маса бункера 10 кг. Якщо за деякими конструктивними

особливостями дозувального пристрою потрібно збільшити висоту падіння продукту в мірну ємність, або ж реологічні особливості продукту не дозволяють зменшити масу однієї частинки продукту, для компенсації цих факторів рекомендується збільшувати масу мірної ємності, що дозволить зменшити вплив цих факторів на точність набраної дози, а в подальшому і на точність самого дозування.

### **Висновки до розділу 3**

У цьому розділі проведено дослідження точності дозування сипких харчових продуктів під час процесу подачі в упаковку. Вивчено вплив різних параметрів на точність дозування, таких як розмір часток, вологість продукту, налаштування обладнання тощо. Проаналізовано результати експериментів та визначено оптимальні умови для досягнення високої точності дозування.

## ВИСНОВКИ

У даній роботі було проведено глибокий аналіз та дослідження ключових аспектів процесу упаковки сипких харчових продуктів. Ця робота відкриває нові можливості для підвищення якості продукції та оптимізації виробничих процесів в харчовій промисловості.

В рамках дослідження було ретельно проаналізовано обладнання, яке використовується для накопичення, видачі та подачі сипких харчових продуктів в зону пакування. Вивчені різні типи обладнання, їхні переваги та недоліки, що дало можливість обрати оптимальні рішення для конкретних умов виробництва.

Далі було проведено аналіз технологічного процесу переміщення продукту в зону пакування. Визначено вплив різних параметрів, таких як швидкість подачі, розмір часток продукту та тиск упаковки, на якість та ефективність упаковки. Цей аналіз дозволив встановити оптимальні умови для забезпечення найвищої якості продукції.

Окремо було досліджено точність дозування під час процесу упаковки. Вивчено вплив різних факторів на точність дозування та розроблено рекомендації щодо їхнього оптимізації. Це дослідження виявилось важливим для забезпечення однорідності та точності в упаковці продуктів.

Загальний висновок полягає в тому, що правильне налаштування та контроль параметрів процесу упаковки сипких харчових продуктів є важливим для досягнення високої якості продукції та оптимізації виробничих процесів. Ця робота має значний практичний внесок у розвиток харчової промисловості та відкриває нові перспективи для подальших досліджень у цій сфері.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Jenike, A.W., Storage and Flow of Solids, Bulletin 123, University of Utah Engineering Station, 1964 (revised, 1976).
2. Jenike, A.W., Gravity Flow of Solids, Bulletin 108, University of Utah Engineering Station, 1961.
3. Arnold, P.C. and A.G. McLean, “An Analytical Solution for the Stress Function at the Wall of a Converging Channel”, *Powder Techn.*, **13**, 255 (1976).
4. Arnold, P.C. and A.G. McLean, “Improved Analytical Flow Factors for Mass-Flow Hoppers”, *Powder Techn.*, **15**, 276 (1976).
5. Arnold, P.C. and A.G. McLean, Bulk Solids: Storage, Flow and Handling, TUNDRAPublications, 1980.
6. Janssen, H.A., “Getreidedruck in Silozellen”, *Z. Ver. Dt. Ing.*, 39, 1045 (1895).
7. ASTM D-6128, Standard Test Method for Shear Testing of Bulk Solids Using the Jenike Shear Cell, ASTM International, 2006.
8. ASTM D-6773, Standard Shear Test Method for Bulk Solids Using the Schulze Ring Shear Tester, ASTM International, 2008.
9. Schulze, D., “Powders and Bulk Solids – Behavior, Characterization, Storage, and Flow,” Springer, New York, 2007.
10. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: у 3-х част.: навч. посіб. для ВНЗ / Під заг. ред. Ю.М. Кузнецова. – Частина 1. Принципи побудови агрегатно-модульного технологічного обладнання. – Кіровоград, 2003. – 422 с.
11. Беспалько А.П. Гігієнічні аспекти проектування пакувального обладнання / А.П.Беспалько, О.М.Гавва, С.В. Токарчук // Упаковка. – 2010 – №1 – С. 38 – 42.
12. Гавва О.М. Пакувальне обладнання. Обладнання для пакування продукції у споживчу тару / Гавва О.М., Беспалько А.П., Волчко А.І. – К.: ІАЦ “Упаковка”, 2008. – 436 с.
13. Губарев О.П. Мехатроніка: циклічно-методичний підхід до вирішення практичних задач автоматизації/ О. П. Губарев, О. С. Ганпанцурова . – Київ : КПІ, 2016. – 160 с.
14. Енергетичні трансформації і енергозбереження в харчових технологіях: монографія / А. І. Соколенко, А.А. Мазаракі, В. А. Піддубний та ін. ; НУХТ. — К. : Фенікс, 2012. — 484 с.
15. Інтенсифікація масообмінних процесів в харчових і мікробіологічних технологіях / А. І. Соколенко, О. Ю. Шевченко, В. А. Піддубний. — К. : ПП"Люксар", 2008. — 443 с.

16. Кривопляс-Володіна Л.О. Основи наукових досліджень у прикладних задачах: навч. посіб. для студ. вищ.навч.зак./Кривопляс-Володіна Л.О., Гавва О.М., Яровий В.Л., Токарчук С.В. – К.: Сталь, 2016. – 271 с.
17. Марчевський В.М. Конструкторська документація курсових і дипломних проектів: навч. посіб. / Марчевський В.М. – К.: Норіта-плюс, 2006. – 280 с.
18. Моделювання процесів пакування: підручник / А.І. Соколенко, В.Л. Яровий, В.А. Піддубний, К.В. Васильківський; за ред. А.І. Соколенка ; НУХТ. – Вінниця: Нова книга, 2004. – 272 с.
19. Пакувальне обладнання: підруч. / О.М. Гавва, А.П. Беспалько, А. І. Волчко, О. О. Кохан. — Київ : ІАЦ "Упаковка", 2010. – 744 с.
20. Пакувальні матеріали та їх фізико-хімічні властивості: підручник / А. І. Соколенко, В. С. Костюк, К. В. Васильківський та ін. ; Нац. ун-т харч. технол. — К. : Кондор, 2015. — 396 с.
21. Пальчевський Б.О. Автоматизація технологічних процесів (виготовлення і пакування виробів): навч. посіб. / Пальчевський Б.О. – Львів: Світ, 2007. – 392 с.
22. Пальчевський Б.О. Дослідження технологічних систем (модернізація, проектування, оптимізація): навч. посібник / Пальчевський Б.О. – Львів: Світ, 2009. – 232 с.
23. Проектування пакувального обладнання із мехатронних модулів./ М.В. Якимчук, О.М. Гавва, А.П.Беспалько та ін. – К: Видавництво «Сталь», 2017. – 515 с.
24. Сертифікація, гігієнічне забезпечення та метрологічна атестація пакувального обладнання: навч. посіб. / О. М. Гавва, А. П. Беспалько, С. В. Токарчук ; МОН України, Нац. ун-т харч. технол. — К. : НУХТ, 2014. — 268 с.
25. Теорія тертя у взаємодії твердих тіл: монографія / А.І. Соколенко, С.В. Іванов, В.А. Піддубний та ін. ; НУХТ. – К. : Фенікс, 2012. – 256 с.