

Міністерство освіти та науки України  
Запорізький національний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)  
Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні  
(назва факультету)  
кафедра металургійного обладнання  
(повна назва кафедри)

## **ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**

На тему Аналіз ефективності роботи бункерів для зберігання сипких матеріалів

Виконав: магістрант групи 8.1332-1  
Левченко Ю.А.  
(ПІБ) (підпис)

спеціальності  
133 Галузеве машинобудування  
(шифр і назва)  
спеціалізація

(шифр і назва)  
Освітньо-професійна програма  
133.00.12 Металургійне обладнання  
(шифр і назва)

Керівник Власов А.О.  
(прізвище та ініціали) (підпис)  
Н.контроль Васильченко Т.О.  
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя – 2023 року

Запорізький національний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Інженерний навчально-науковий інститут .

Кафедра металургійного обладнання .

Рівень вищої освіти магістр .

(другий (магістерський) рівень)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування .

(шифр і назва)

Спеціалізація \_\_\_\_\_.

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма 133.00.12 Металургійне обладнання

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедру А.О. Власов

“ \_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

Завдання

до випускної кваліфікаційної роботи магістра

Левченко Юлії Анатоліївни

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської роботи: Аналіз ефективності роботи бункерів для зберігання сипких матеріалів керівник магістерської роботи к.т.н., доцент Власов А.О., затверджені наказом вищого навчального закладу від “09” жовтня 2023 року № 1581-с.
2. Строк подання студентом магістерської роботи 10 грудня 2023 року.  
Вихідні дані магістерської роботи показники роботи бункерного обладнання коксових печей ЗКХЗ
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Актуальність та перспективи підвищення ефективності роботи бункерів для зберігання сипких матеріалів. Аналіз руху сипкого матеріалу в бункерах. Аналіз змінення потоку при різних конфігураціях бункера. Охорона праці та техногенна безпека. Аналіз форми руху потоку вугілля, його залежність від форми бункера.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

## 6. Консультанти розділів магістерської роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Власов А.О., к.т.н, доцент		
2	Власов А.О., к.т.н, доцент		
3	Власов А.О., к.т.н, доцент		
4	Власов А.О., к.т.н, доцент		

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів магістерської роботи	Примітки
1	Збір матеріалу на проектування	01.05.23 – 27.05.23	
2	Групування та аналіз зібраного матеріалу. Уточнення завдань проектування	01.09.23 – 15.09.23	
3	Виконання теоретичної частини проекту	16.09.23 – 16.10.23	
4	Виконання графічної частини проекту	17.10.23 – 17.11.23	
5	Написання та оформлення пояснювальної записки	18.11.23 – 30.11.23	
6	Перевірка проекту консультантами	01.12.23 – 08.12.23	
7	Попередній захист проекту	08.12.2023	
8	Переплітання пояснювальної записки	Згідно з графіком	
9	Захист проекту у ЕК	Згідно з графіком	

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник магістерської роботи \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Левченко Ю. А. Аналіз ефективності роботи бункерів для зберігання сипких матеріалів.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальність 133 – Галузеве машинобудування, науковий керівник А.О. Власов. Запорізький національний університет, інженерний навчально-науковий інститут, кафедра металургійного обладнання, 2023.

Магістерська робота присвячена аналізу форми руху потоку вугілля, його залежності від форми бункера.

Дано поняття про загальні принципи витоку матеріалу з бункеру та можливі заходи оптимізації витоку сипких матеріалів з бункерів.

Розглянуто теоретичні основи витоку матеріалу з бункеру та залежність швидкості витоку від форми бункеру. Проведено аналіз роботи бункерів ПАТ «Запоріжсталь».

Ключові слова: СИПКИЙ МАТЕРІАЛ, БУНКЕР, ВОРОНКА, ЗАСТІЙНІ ЗОНИ, КУТ НАХИЛУ КОНУСНОЇ ЧАСТИНИ, ФОРМА РУХУ.

## ABSTRACT

Levchenko Yu. A. Analysis of the efficiency of bunkers for storage of loose materials.

Qualifying thesis for obtaining a master's degree of higher education in specialty 133 - Industrial mechanical engineering, scientific supervisor A.O. Vlasov. Zaporizhzhia National University, Engineering Educational and Scientific Institute, Department of Metallurgical Equipment, 2023.

The master's thesis is devoted to the analysis of the shape of the coal flow, its dependence on the shape of the bunker.

The concept of the general principles of leakage of material from the hopper and possible measures to optimize the leakage of loose materials from the hoppers

are given.

The theoretical basis of the leakage of material from the hopper and the dependence of the leakage rate on the shape of the hopper are considered. An analysis of the operation of the bunkers of PJSC "Zaporizhstal" was carried out.

Key words: SICK MATERIAL, BUNKER, FUNNEL, STANDING ZONE, ANGLE OF INCLINATION OF THE CONICAL PART, RUKHU FORM

## ЗМІСТ

Вступ.....	10
1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ БУНКЕРІВ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ.....	12
1.1. Актуальність підвищення ефективності роботи бункерів для зберігання сипкого матеріалу. ....	12
1.2. Бункери, його види та методи використання.....	13
1.2.1. Устрій бункерів.....	13
1.2.2. Витікання матеріалу з бункера.....	15
1.3. Вуглезавантажувальний вагон.....	21
1.4. Сипкий матеріал як робоче середовище. ....	31
1.5. Фізико-хімічні властивості шихти. ....	34
1.6. Додаткове обладнання бункера.....	41
1.7. Постановка задачі дослідження.....	47
2. АНАЛІЗ РУХУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ В БУНКЕРАХ.....	48
2.1. Моделі дискретного середовища пластичного плинину.....	48
2.2. Потік сипкого матеріалу.....	49
2.3. Швидкості потоку сипкого матеріалу з конусної частини бункера.....	53
3. АНАЛІЗ ЗМІНЕННЯ ПОТОКУ ПРИ РІЗНИХ КОНФІГУРАЦІЯХ БУНКЕРА.....	59
3.1. Бункер квадратного перетину.....	59
3.2. Вплив кута нахилу стінки конусної частини на швидкість розвантаження. ....	64
3.3. Вплив розміру вихідного отвору на швидкість розвантаження. ....	66
4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА.....	71
4.1. Характеристика ступеня безпеки обраних технологічних процесів, рівня їхньої механізації та автоматизації. ....	71
Таблиця 4.1 - до розрахунку рівня механізації праці.....	72
4.2. Аналіз потенційних небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища.....	72
4.3. Санітарно-гігієнічні умови праці.....	73
4.3.1. Освітлення.....	78

	7
4.3.2. Заходи з техніки безпеки. ....	78
4.4. Пожежна безпека. ....	80
Висновок.....	85
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	87

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

### Розділ 1

Д - Довгопламеневі

Г - Газові

Ж - Жирні

К - Коксові

ПС - Піснувато-спіклене

Т - Худі

Ф - Антрацити

V - кількість летючих речовин

У - нижня границя спікання КЖ – коксовий жирний

ГЖ – газовий жирний

С – спікливе

СС – слабоспікливе

О – пісне

Н – низькометаморфизований

В – витринитовий

Ф – фюзинитовий

### Розділ 2

{ $\sigma$ } - напруженням

{ $\epsilon$ } - не повні деформації

{ $d\epsilon$ } - швидкості їх приростів

$\Phi(\{\sigma\})$  – потенціальна функція

$d\lambda$  – множник Лагранжа

$\sigma_1, \sigma_3$  – максимальне і мінімальне головні напруження

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  – напруження в площині деформування

$\tau_T$  – границя текучості матеріалів  $\alpha$  – кут нахилу жолоба (труби до горизонту)

$\varphi_0$  – кут тертя сипкого матеріалу о стінки ємності

$\delta$  – характерний розмір частинки а і b – постійні

$\Pi$  – найбільший розмір частинки сипкого матеріалу



$B$  – постійна, яка залежить від властивостей матеріалу

$R_{\Gamma}$  – гідравлічний радіус ємності, м

$A_0$  – площа міделевого перерізу введених в потік конструктивних елементів (проекція площі перерізу конструктивного елемента на площину перпендикулярну напрямку руху сипкого потоку)

$A_{\Gamma}$  – площа міделевого перерізу частинки сипкого матеріалу

$A$  – площа перерізу потоку

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>

$h$  – висота шару матеріалу в бункері, м

$\lambda$  – коефіцієнт витікання (0,55..0,65 для легкосипких матеріалів; 0,3..0,5 для кускових матеріалів неправильної форми; 0,2..0,25 для пилоподібних матеріалів)

$P_1(t) = 0$  – тиск в нижній точці трубки, Па

$P_2(t)$  – тиск в верхній точці трубки, який визначається рівнем рідини, що знаходиться у ємності ( $h$ )

$l$  – довжина трубки, м

$\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості  $r$  – радіус трубки, м

$V$  – об'єм матеріалу в бункері

$R$  – гідравлічний радіус отвору, м

$a$  – розмір частинки;

$D$  – діаметр отвору бункера.

$m$  – маса матеріалу в бункері;

$\rho$  – насипна щільність матеріалу

## Вступ

Бункери використовують для зберігання, перевезення та накопичення продукції. Вони мають дуже широку сфери в яку входять хімічна, харчова та легка промисловість.

Бункер у первинному своєму значенні слугує як певний буфер на виробництві між окремими його ланками. Допомагає об'єднувати різні типи виробництва, такі як циклічні та сезонні разом з безперервними які потребують постійного та стабільного, у своїх показниках продуктивності, надходженнях нового матеріалу, та відвантаження готової продукції.

Завдяки таким властивостям логістика між різними цехами, або навіть підприємствами, спрощується, та стає більш гнучкою, а самі підприємства менш вразливими до раптових перебоїв з поставками.

Завдяки сучасним технологіям автоматизування, робота бункерних приладів стає все більш вигіднішою та простішою, а їх застосування більш коректним та незамінним.

Бункер використовується не лише як певна ємність для зберігання матеріалу протягом певного часу. Його також використовують у приладах та апаратах для змішування, розчинення чи обробки різних матеріалів. Бункер дає змогу проводити подібні операції одразу з великою кількістю матеріалу, що суттєво підвищує продуктивність всієї установки. В багатьох апаратах бункер являє собою основну частину конструкції. Маючи автоматизоване постачання сировини, виробництво стає безперервним та більш продуктивним. Прилади з бункерами використовують майже у всіх сферах виробництва, від мішалок для бетону до харчових змішувачів глазури для цукерок.

Також бункери використовують для транспортування матеріалу. Транспортування у такий спосіб не має обмежень по відстані. Це можуть бути і далекі рейси вагонів-хопперів, і короткі відстані вуглазавантажувальних вагонів на коксохімічних виробництвах. Використання бункерів для транспортування на короткі відстані вирішує проблеми логістики. Коли необхідно у певний час, у певному місті відвантажити або завантажити велику кількість матеріалу за

короткий проміжок часу. Такі завдання не можуть бути виконані звичними стрічковими конвеєрами або шнеками, особливо коли місце завантажень-розвантажень постійно змінюється.

Головною ціллю роботи є дослідження потоку сипкого матеріалу з метою вдосконалення конструкції бункера для оптимального його спустошення.

В роботі розглянуто особливості потоку сипкого матеріалу, зміна типу руху в залежності від геометричних параметрів бункера. Виявлені основні фактори, що негативно впливають на швидкість та якість розвантаження бункера. Запропоновано та розглянуто ряд вдосконалень, знайдено оптимальні параметри розмірів та розташування додаткового обладнання в бункері.

## 1. АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ БУНКЕРІВ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ

### 1.1. Актуальність підвищення ефективності роботи бункерів для зберігання сипкого матеріалу.

Ефективність роботи бункерів в першу чергу полягає у зменшенні втрат матеріалу під час зберігання. Ці втрати можуть виникати через не дотриманість умов, перевищення терміну зберігання чи не правильно обрані конструктивні параметри бункера. Останнє може спричинити ряд наступних факторів: виникнення застійних зон, падіння якості матеріалу у застійних зонах, розповсюдження негативного впливу на весь об'єм матеріалу.

На кожному підприємстві склад є однією з найважливіших елементів. Його правильне розташування, наявність необхідного обладнання, можливість швидкої модернізації, адаптації для побудови нових ланок виробництва, легкість обслуговування та ремонту мають велике значення та необхідність. Все це легко врахувати та закласти ще на етапі розробки якщо заздалегідь правильно визначити особливості зберігання сипкого матеріалу.

При зберіганні сировини на складі, необхідно зоб були дотримані всі умови зберігання: збереження показників температури у дозволеному інтервалі, певна вологість та освітленість, достатнє вентилявання приміщення та відсутність природніх шкідників. Також необхідно враховувати процеси які можуть протікати безпосередньо всередині матеріалу під дією власних фізико-механічних та біологічних властивостей. Наприклад зберігання ячменя вимагає низьких значень вологості. Інакше в іншому випадку зерно може почати пріти, що призведе до виділення великої кількості тепла та нагріву самого зерна з додатковим виділення спиртів, що унеможливилюватиме подальше використання цієї сировини на виробництві.

Під сипкими матеріалом може виступати велика кількість різноманітних речей, навіть ті, які у звичайному побуті важко назвати сипкими. Як правило це харчові продукти: картопля, морква, горіхи т ін. У промисловості такими матеріалами виступають будівельні суміші, полімери, мінеральні добрива.

Залежно від властивостей сипкого матеріалу та вимог до його зберігання, для фасування використовуються різні матеріали та об'єми. Так будівельні матеріали по типу цементу та шпаклівки, для продажу населенню, фасуються у мішках з ємністю від 10 до 50 кілограм. Такі мішки виготовляють переважно з мішковини, поліетилену та паперу. Також цемент може зберігатися у спеціальних бункерах з підтриманням низької вологості та об'ємом кілька тон. Такі природні матеріали як пісок, гравій, щебінь може зберігатися насипом під відкритим небом, оскільки саме їх походження дає їм змогу не піддаватися надмірній вологості та впливу навколишнього середовища.

Вимоги до зберігання харчової промисловості значно вищі. Зберігання зерна відбувається або насипом, або у спеціальних багато-тонних силосах з можливістю зберігання необхідних умов. В силосах також може зберігатися борошно, цукор, крохмаль, проте ці продукти також можуть бути розфасовані.

Для досліджень обрано коксохімічну промисловість. На них використовується вугілля різних фракцій та властивосте, а під час його підготовки до коксування воно сильно змінює свої характеристики.

## 1.2. Бункери, його види та методи використання.

### 1.2.1. Устрій бункерів

Бункера являють собою проміжні вантажосховища у вигляді судин великої ємності, що встановлюються у загальному ланцюзі транспортного та технологічного обладнання, і призначаються для тимчасового накопичення в них певної кількості насипних вантажів з подальшою видачею для переробки.

Наявність бункерів у загальному ланцюзі технологічних машин робить їх роботу менш залежною один від одного і дає можливість встановлювати їм найбільш доцільні режими.

Норма бункера, крім будівельних вимог, повинна задовольняти умовам можливого заповнення та повного розвантаження, без утворення "мертвих зон", в яких при випорожненні бункера вантаж затримується і не сходить під дією власної ваги до розвантажувальних отворів.

Зазвичай бункери (рисунок 1.1) мають складову форму з двох геометричних тіл: верхню - призматичну або циліндричну і нижню - що звужується до низу, у вигляді піраміди, призми, конуса або сфери. Однак при невеликій глибині бункер може не мати верхньої призматичної або циліндричної частини. При всій різноманітності бункерів загальним для всіх їх є дотримання належного співвідношення між кутом нахилу стінок розвантажувальної частини та кутом тертя матеріалу, для якого призначений бункер. Кут нахилу стінок до горизонту повинен бути більшим за кут тертя матеріалу.

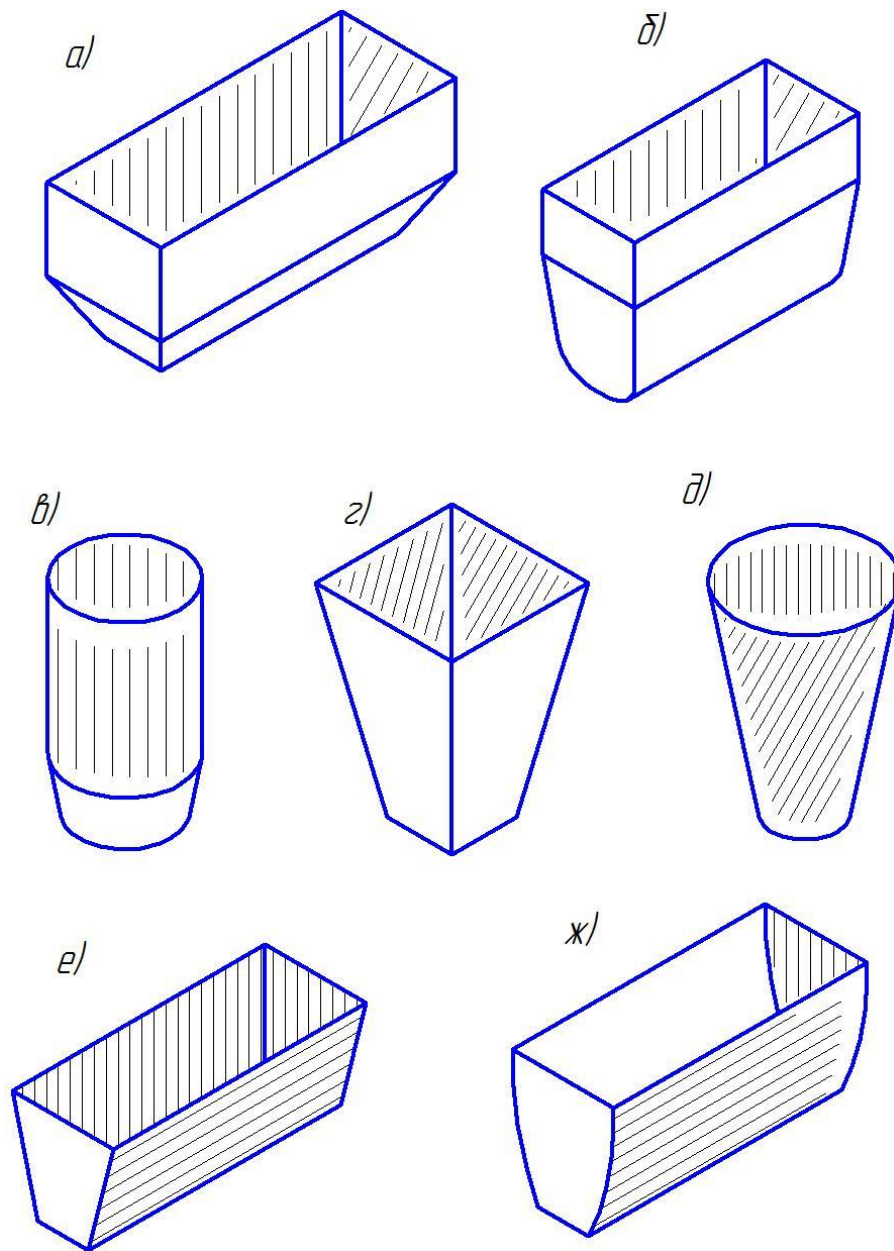


Рисунок 1.1 – Види бункерів за формою

Бункери бувають металеві, бетонні та залізобетонні. Найбільш поширені бункери зі стінками з листової сталі, а каркасом із профільної. Для полегшення руху вантажу стінки бункерів зсередини роблять гладкими; у випадку абразивних вантажів вони облицьовуються знімними сталевими плитами, спеціальними зносостійкими матеріалами - фторопластом, полістиролом, поліетиленом, гумою та ін. В цьому випадку на поверхні стінок утворюється шар захисту з матеріалу.

### 1.2.2. Витікання матеріалу з бункера

Процес закінчення насипного вантажу через випускний отвір у дні бункера відбувається в такий спосіб. У рух наводиться вертикальний стовп матеріалу над отвором, внаслідок чого на поверхні вантажу утворюється вирва, за якою в міру розвантаження зсипаються частинки. При розташуванні випускного отвору поблизу вертикальної стінки бункера насипний вантаж ковзає вздовж цієї стінки, і воронка, що утворюється, має несиметричну форму.

За дослідними даними висипання вантажу через симетричну вирву відбувається в наступному порядку (рисунок 1.2). Спочатку висипається частина 1, потім розташована під нею частина 2, потім зсуваються частини 3 і далі частини 4. В кінці висипання утворюється вирва з частин 5, що заповнюють "мертву зону".

Найменший кут нахилу стінок в нижній частині бункера, при якому уникають "мертві зони" і вантаж висипається без залишку, залежить від коефіцієнта тертя вантажу по стінці, зростаючи з його збільшенням. Так для вугілля цей кут приймається 45-50 °, для руди - не менше 65 °.

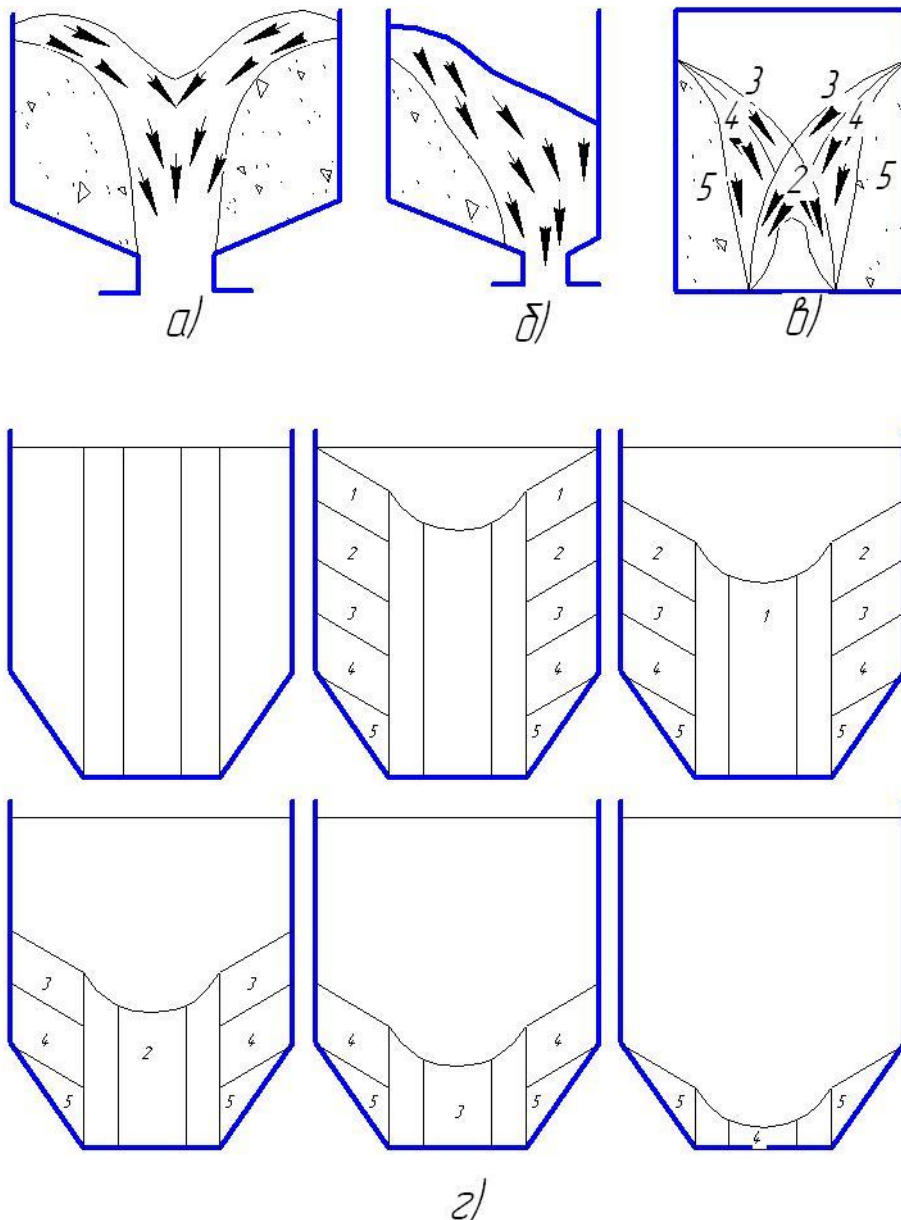


Рисунок 1.2 – Витікання матеріалу з бункеру

Висипання матеріалу через випускний отвір нерідко порушується утворенням зведення матеріалу у вигляді купола або арки. Особливо часто це відбувається при висипанні вантажів, що містять великі шматки (рисунок 1.3).

При нормальному закінченні матеріалу швидкість його висипання можна визначити за формулою

$$V = \lambda \cdot \sqrt{3,2gR}$$

де  $\lambda$  - коефіцієнт закінчення, що залежить від властивостей матеріалу;

$g$  – прискорення сили тяжіння;



$R$  - Гідравлічний радіус перерізу.

$$R = \frac{F}{L}$$

де  $F$  – площа отвору бункера;

$L$  - Периметр отвору бункера.

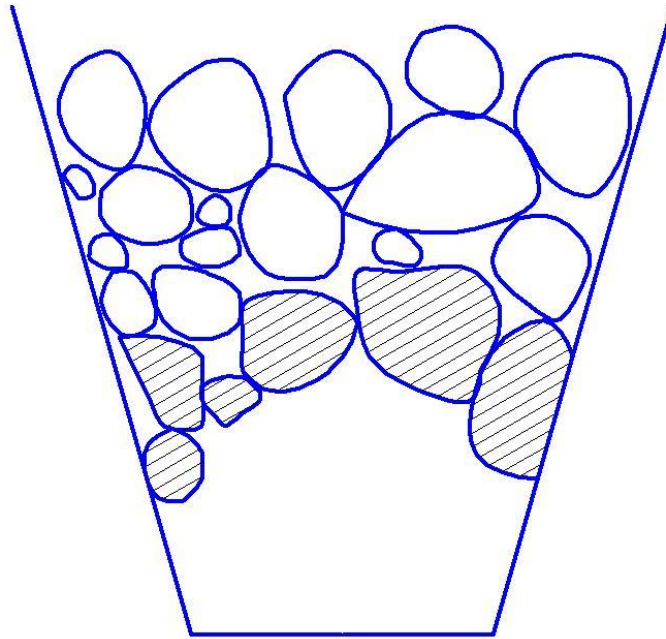


Рисунок 1.3 – Утворення склепіння в бункері

Бункери мають певні вимоги до герметичності, вологостійкості, або навіть, у разі зберігання харчових продуктів, гігієнічності. Нерідко бункери оснащують додатковими приладами для більш швидкого завантаження чи розвантаження. Особливо частою проблемою бункера є склепіння. Воно утворюється у випадках коли матеріал у бункері має здатність до грудкування, липкості, злежування чи коли вихідний отвір був обраний занадто вузьким. Для боротьби зі склепінням використовують вібраційні, пневматичні та ланцюгові пристрої.

Здебільшого бункери виготовляють з металів, залізобетону та їх комбінації. Також існують й варіації з алюмінію чи пластику – такі бункери використовують переважно при виробництві дрібних деталей.

Бункери можуть бути використані як для довгострокового так і для тимчасового зберігання.

Довгострокове зберігання приймається у випадках коли між поставками чи відвантаженням сировини проходить багато часу, або вони є сезонними як у випадку зі зберіганням зерна на фермах. Тоді використовують бункери з великою ємністю. Бункери висота яких більша за поперечний розмір називають силосними бункерами.

Акумуляюючі бункери бувають:

- Стаціонарні
- Напівстаціонарні
- Пересувні

Стаціонарні бункери розміщуються на постійній основі та не мають змоги рухатись. Вони можуть знаходитись як на технологічній лінії, так і поза неї та мають значну ємність. Завантаження та розвантаження цих бункерів відбувається самостійно, під впливом земного тяжіння та завдяки правильній геометрії. Основна частина бункера може бути виконана як з квадратного так і з круглого профілю. В його нижній частині розташований конус з випускним отвором. Головними параметрами конусної частини, які і впливають на саморозвантаження, є кут нахилу стінки та розмір вихідного отвору. Кут нахилу стінки повинен бути більшим ніж кут природнього нахилу сипкого матеріалу в бункері, а отвір має бути більшим в 3...5 рази від розміру найбільшої фракції того ж матеріалу. В залежності від методу використання бункера отвір може або зачинятись затвором, або під ним може знаходитись живильник для поступового відведення сировини на технологічну лінію. У разі склепіння матеріалу у бункері або зависанні грудок, що ускладнює подальшу подачу матеріалу, використовують вібраційні, пневматичні та ланцюгові пристрої. Вібраційні пристрої монтують на корпус, частіше саме на конусну частину, або кріплять на металеві пластини та опускають всередину. При залученні пневматичних систем, стиснене повітря подається у бункер через спеціальні сопла. Цей метод потребує, щоб сопла були вмонтовані ще на стадії виготовлення бункера. Ланцюгові пристрої мають вигляд звичайних ланцюгів з вантажем на кінці. При необхідності вантаж приводиться в рух і через ланцюги вібрація передається матеріалу та відбувається обвал.

Напівстаціонарі і пересувні бункери виготовляються з додатковими приладами завантаження та розвантаження. Часто вони використовуються у вугільній промисловості для перенесення великих мас вугілля від лав до місця розвантаження. Рухаються на невеликі відстані і можуть служити як бункерпотяг.

Короткострокове зберігання є більш розповсюдженим використанням бункера та застосовується майже на всіх типах промисловості. Такі бункери називають технологічними. У таких випадках бункер слугує більше як буфер ніж місце зберігання. Це дає можливість контролю подачі сировини та усунення коливань подачі. Гарним прикладом такого використання бункера є теплові електростанції які працюють на вугіллі. Вугілля надходить у вагонах великими партіями. Оскільки подати одразу всю партію вугілля у піч, з питань безпеки та раціональності, не є можливим, як і тримати постійно потяг на станції розвантаження, ще й мати запасний, використовують бункери.

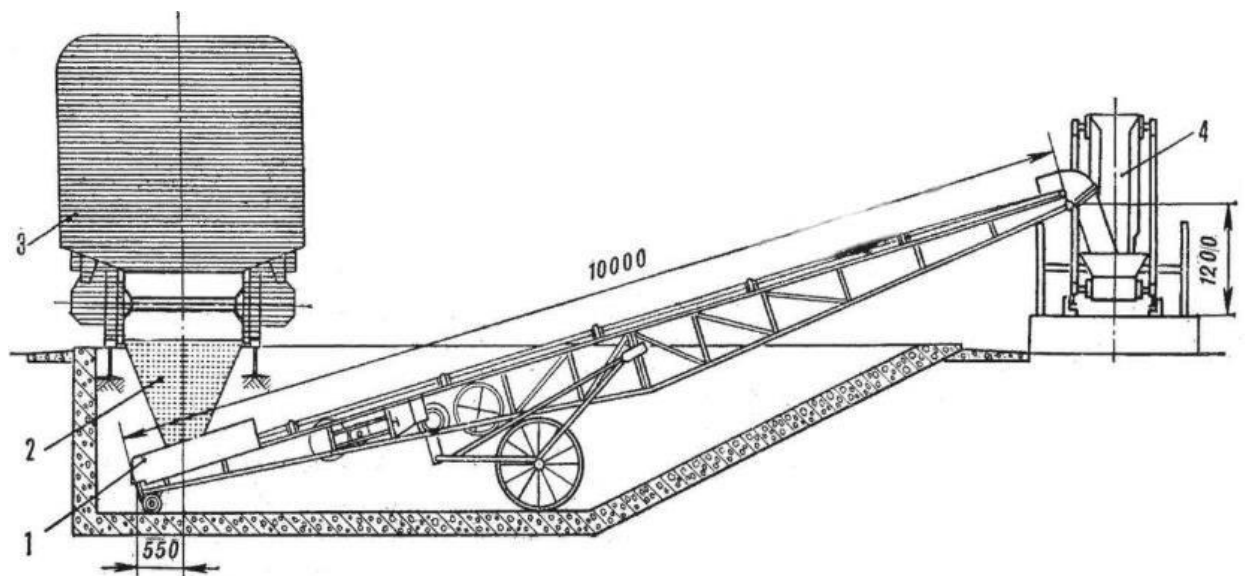
Бункери цього типу поділяються на[13]:

- Приймальні
- Живильник
- Зневоднюючі
- Компенсаційні
- Відвантажувальні
- Бункер-вагон
- Бункер підземний
- Бункер перевантажувач

Приймальні бункери необхідні для швидкого розвантаження транспорту шляхом саморозвантаження. Його встановлюють безпосередньо під місцем розвантаження. У випадку з потягами він розміщується під коліями, якщо це вантажівка то він має знаходитись нижче рівня землі та мати зверху спеціальну решітку. Розмір щілин у решітці має бути більшим у 3...5 рази більшим від розміру найбільших грудок матеріалу, що вивантажується. Приймальні бункери мають мати ємність більшу за одноразове розвантаження. Кратність такого

збільшення залежить від кількості циклів розвантаження за одиницю часу, та швидкості переносу матеріалу з приймального бункера на виробництво.

У випадку з залізничними коліями, встановлення великого бункера є не завжди можливим чи доцільним, тож його оснащують достатньо продуктивними стрічковими транспортерами для пришвидшення розвантаження. Також можливий варіант розвантаження потяга не під низ вагону, а у бік. У ролі бункера виступає насип під залізничними коліями. Такий спосіб може бути більш швидким, ніж попередній, але подальше перенесення матеріалу є ускладненим.



1 — стрічковий транспортер, 2 — приймальний бункер, 3 — вагон типу «хопер», 4 — транспортер або навантажувач на складі. [6]

Рисунок 1.4 - Приймальні - для прийняття матеріалу при розвантаженні вагонів, скіпів, самоскидів. [1]

Компенсаційний бункер фактично являє собою живильник, з невеликою різницею у використанні. Якщо головною роллю живильника є стабільна та неперервна подача матеріалу на лінії виробництва, то у випадку з компенсаційним головною роллю є компенсування коливань подачі. Такі коливання можуть виникати під час підвозу нових партій матеріалу, або якщо заповнення бункера відбувається за допомогою крана, чи бульдозера. Також їх використовують у гірничій промисловості, вугільних та рудних шахтах. У такому

випадку коливання можуть відбуватися під час різних подач великих мас руди. Без компенсатора, транспортувальні прилади можуть вийти з ладу, чи їхнє зношування буде надто швидким.

Використовуються для швидкого завантаження вагонів або вантажівок шляхом самостійного просипання матеріалу з бункера у ємність транспортування. Можуть мати як квадратну так і круглу форму у перерізі. Хоча у випадку використання декількох суміжних бункерів, частіше застосовують бункери з квадратним перерізом для збільшення сумарної ємності бункера. Не дивлячись на те, що головною задачею цього бункера є якомога швидше провести завантаження, є певні обмеження. Нижній отвір повинен мати оптимальні розміри для швидкого розвантаження та при цьому запобігати падінню занадто великих мас матеріалу. Падіння цих мас може виникати як через надто великий отвір, так і під час обвалення склепінь. Це може призвести до ушкодження або навіть поломки транспорту. Рекомендується використання спеціальних заслонок з можливістю регулювання швидкості розвантаження.

### 1.3. Вуглезавантажувальний вагон

Бункер використовуються на багатьох у багатьох видах промисловості і коксохімічне не є винятком. У коксохімічній промисловості бункер використовують на технологічній лінії підготовки шихти та її зберігання, транспортування шихти від вугільної вежі до коксової печі, прийняття готового коксу. У більшості випадків бункер є головною частиною обладнання. Гарним прикладом є вуглезавантажувальний вагон. Через його бункери проходить велика кількість сипкого матеріалу, має циклічний принцип роботи та цікаві конструктивні рішення.

Вуглезавантажувальний вагон – це машина яка виконує весь комплект операцій по набору шихти з вугільних веж, перенесення її до коксової печі, та майже всі операції по розвантаженню шихти у камеру печі. Деякі операції та їх сукупність виконуються у автоматичному режимі. Таким чином виконується

набір шихти у вагони, робота електровібраторів та завантаження шихти у піч. Але Вуглезавантажувальні вагони не є цілком автоматичними тож потребують корегування машиністом. Кабіна машиніста знаходиться у нижній частині, вхід до якої здійснюється з верхньої частини батареї печей. Завдяки такому розташуванню кабіни, машиністу простіше контролювати розташування вагона відносно камери печі, роботу механізмів для знімання та встановлення кришок загрузочних люків, механізмів по управлінню та чистці стояків.

Вуглезавантажувальні вагони виконують наступні операції:

- 1) Відчинення та зачинення затворів вугільних веж для набору необхідної кількості шихти в бункер вагона;
- 2) Управління механізмами обрушення шихти у вугільній вежі при її зависанні;
- 3) Зважування шихти у вагонах;
- 4) Транспортування шихти до необхідної печі;
- 5) Знімання-встановлення кришок завантажувальних люків;
- 6) Відчинення-зачинення затворів та опускання-підйом телескопів бункерів вагона для просипання шихти в піч;
- 7) Автоматичне обрушення завислої шихти у бункері вагоні електровібратором;
- 8) Прибирання шихти яка просипалась навколо завантажувальних люків;
- 9) Відчинення-зачинення кришок та клапанів гідрозатворів стояків і кранів для пароінжекції;
- 10) Чистка труби і колін стояків від залежей графіту.

Всі операції, що входять у цикл роботи вуглезавантажувального вагона, повинні виконуватися у конкретний час, яких залежить від кількості печей які мають бути обслуговані за зміну.

Коксові печі завантажуються шихтою за суворим графіком. За правилами технічної експлуатації, розрив часу між видачою коксу та завантаженням нової партії шихти не повинен бути більшим за 15 хвилин. Під час завантаження шихти, вісь люків вуглезавантажувального вагону повинна зійтись з віссю люків

коксової печі. Допуском на співпадіння є  $\pm 25$  мм. Під час завантаження шихти у піч, телескопи повинні бути опущені та щільно прилягати до люків. Це забезпечує усунення присипання шихти скрізь щілини.

Оскільки вуглезавантажувальний вагон є машиною обслуговування, то її конструкція прямо залежить від конструкції коксової печі. Так кількість бункерів вагона залежить від кількості люків завантаження печі, а загальна місткість всіх бункерів залежить від корисного об'єму коксової печі та коливається від 16 до 28 м<sup>3</sup>.

Температурні умови роботи над коксовою піччю є досить важкими, як для обладнання, так і для обслуговуючого персоналу. У літній день, температура може сягати 55°-65° С. Також негативним фактором виступають абразивний коксовий пил, шкідливі метали та гази, що пришвидшують корозію. Деталі та елементи конструкції, що знаходяться у безпосередній близькості від люків коксових печей у момент розвантаження вагона, піддаються впливу значних температур та навіть полум'ю.

В ході роботи, вуглезавантажувальний вагон виконує ряд операцій, що стосуються однієї печі. Ці операції і формують робочий цикл. Такими операціями є:

- 1 встановлення вагона під бункером вугільної вежі;
- 2 відкриття затворів вугільної вежі;
- 3 заповнення шихтою бункерів;
- 4 закриття затворів вугільної вежі;
- 5 зважування шихти;
- 6 транспортування шихти до необхідної печі;
- 7 встановлення вагона по осі люків завантажувальної печі;
- 8 зняття кришок загрузочних люків та чистка гнізд люків;
- 9 опускання телескопів і відчинення шиберів вагонів;
- 10 вивантаження шихти в коксову камеру;
- 11 зачинення шиберів та підняття телескопів;
- 12 встановлення кришок загрузочних люків;

- 13 пересування вагонів до наступної печі для очистки стояків від графіта
- 14 встановлення механізму чистки по осі стояка
- 15 чистка стояків
- 16 встановлення механізму чистки в початкове положення
- 17 пересування вагона під вугільну вежу для наповнення наступною порцією шихти.

Операції, що приведені вище, виконуються саме у такому порядку. Також можливе не одночасне розвантаження всіх бункерів. У такому випадку спочатку відбувається розвантаження крайніх бункерів, а вже потім центрального.

Трьохбункерний вуглезавантажувальний вагон старого типу (рисунок 1.5, 1.6) складається з опорної рами металевої конструкції 1, бункерів 2, механізму пересування 3 з конічними зубчастими передачами 4, механізму для відкривання та закривання шиберів вагона, опускання та підйому телескопів 5, механізму чистки стояків 6, механізму струшування 7, однієї кабіни управління 8, а також необхідних сходин за загороджень.

Вуглезавантажувальні вагони старої конструкції не були оснащені зважувальним механізмом, а відкривання закривання шиберів та опускання підняття телескопів відбувалось вручну.

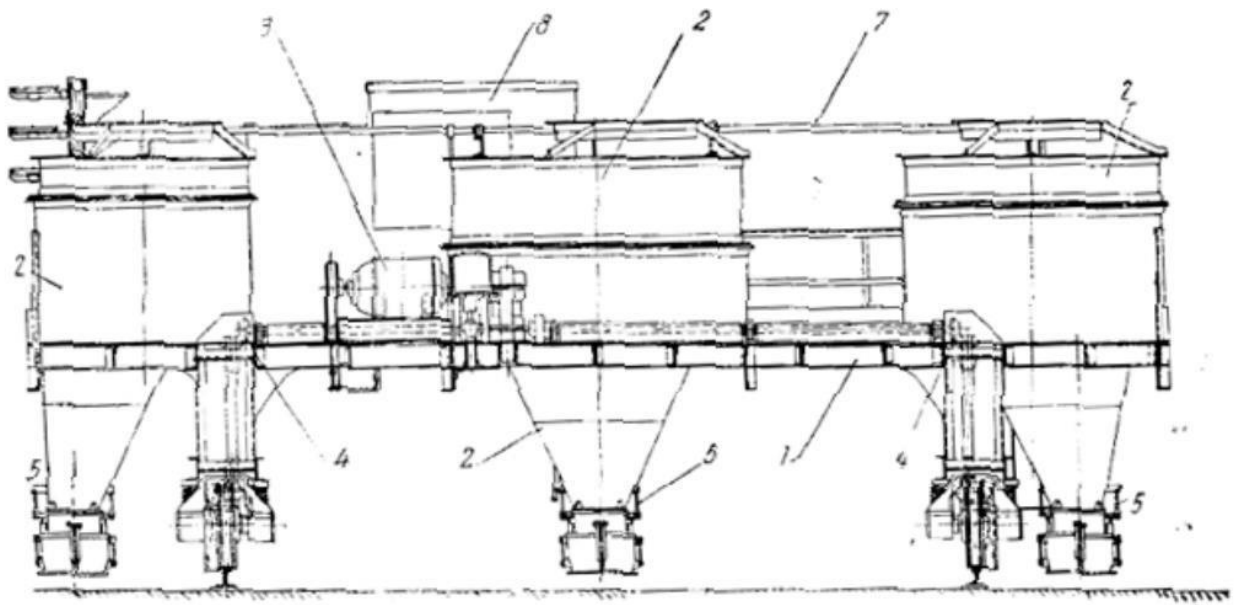


Рисунок 1.5. - Загальний вигляд вуглезавантажувального вагону старого типу.



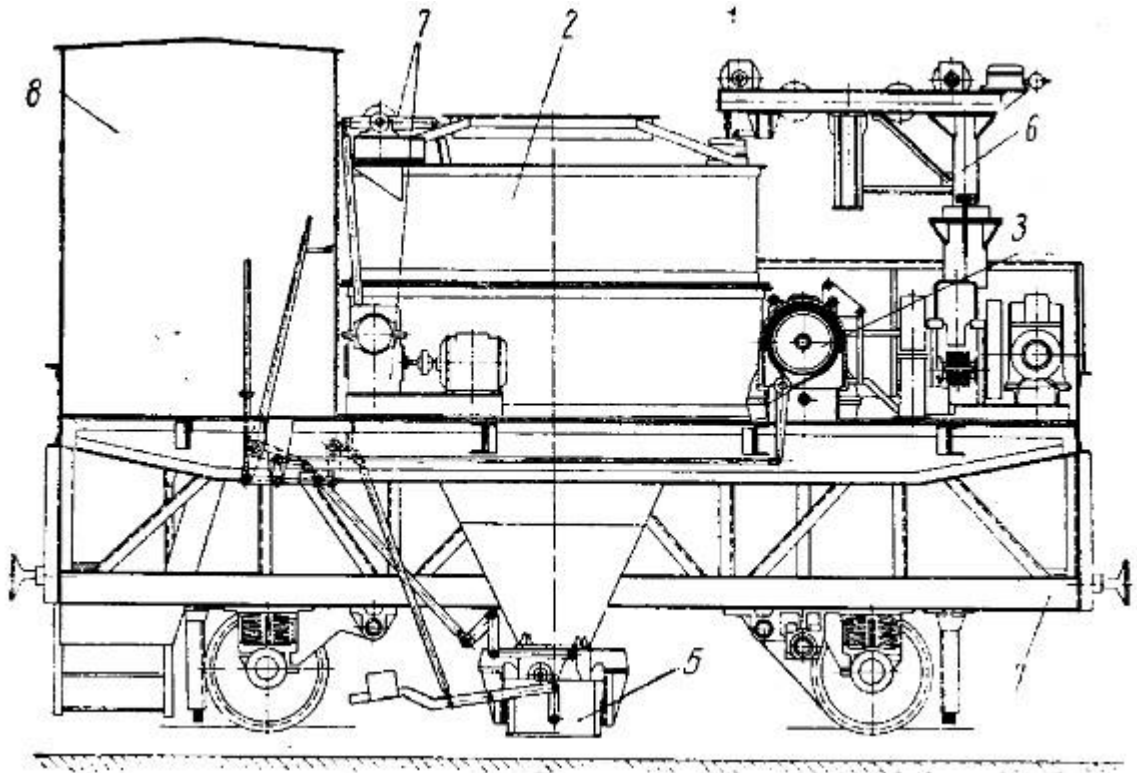


Рисунок 1.6. - Загальний вигляд вуглезавантажувального вагону старого типу.

Механізм пересування вагона був оснащений великою кількістю конічних зубчастих передач, що спричиняло велику вагу та громісткість механізму. Це сприяло низькій надійності. Відкривання та закривання затворів вугільної вежі також відбувалось в ручному режимі. Для чистки стояків, машиніст був повинен виходити з кабіни, та вручну встановлювати поворотну частину механізму очистки.

Трьохбункерний вуглезавантажувальний вагон конструкції конструкторського бюро Главмашмета зображено на рисунках 1.7, 1.8, 1.9. Характеристика типового трьохбункерного вуглезавантажувального вагона конструкції конструкторського бюро Главмашмета

Корисна ємність бункера (максимальна) м <sup>3</sup> .....	26
Розрахунковий час для обслуговування однієї коксової печі, хв .....	10
Швидкість пересування вагона м/хв.....	100
Власна вага вагона (включає електрообладнання та ваговий механізм), т .....	40

Максимальна навантаження на ходові колеса завантаженого вагону, т .....	15
Кількість колес маючих привід .....	2
Загальна кількість ходових колес .....	4
Колія вагона, мм.....	5230
Габарити вагона, мм	
ширина .....	9400
висота .....	5515
довжина (по буферам) .....	6550
Електроживлення вагона V	
при змінному струмі.....	380
при постійному.....	220
Механізм переміщення вагона – індивідуальні електроприводи, шт.....	2
Механізм струшування – електровібратор на кожному бункері, шт .....	1
Ваговий механізм – вантажопідйомність, т .....	до 25
Точність зважування шихти, кг .....	±100
Металоконструкція вагона зварна з профільного та листового металу, загальна вага, т .....	22
Кабіна управління з верхнім розташуванням.....	2
Загальний час відчинення та закривання одного шибера, сек .....	6
Загальний час підйому чи опускання одного телескопа, сек.....	2
Загальний час зняття чи установки кришки люка, сек .....	7
Вантажопідйомність лебідки, кг .....	500
Швидкість підйому вантажу, м/хв.....	23

Вагон має механізм зважування 1, що дає змогу контролювати вагу шихти яка подається в коксову піч. Операція відкривання - закривання шиберів вагона і опускання – підйому телескопів електромеханічним проводом 3. На головних балках 4 металоконструкції вагона розташовані індивідуальні електроприводи 5, зубчасті передачі яких працюють в сталених корпусах, що забезпечує їх надійну роботу.

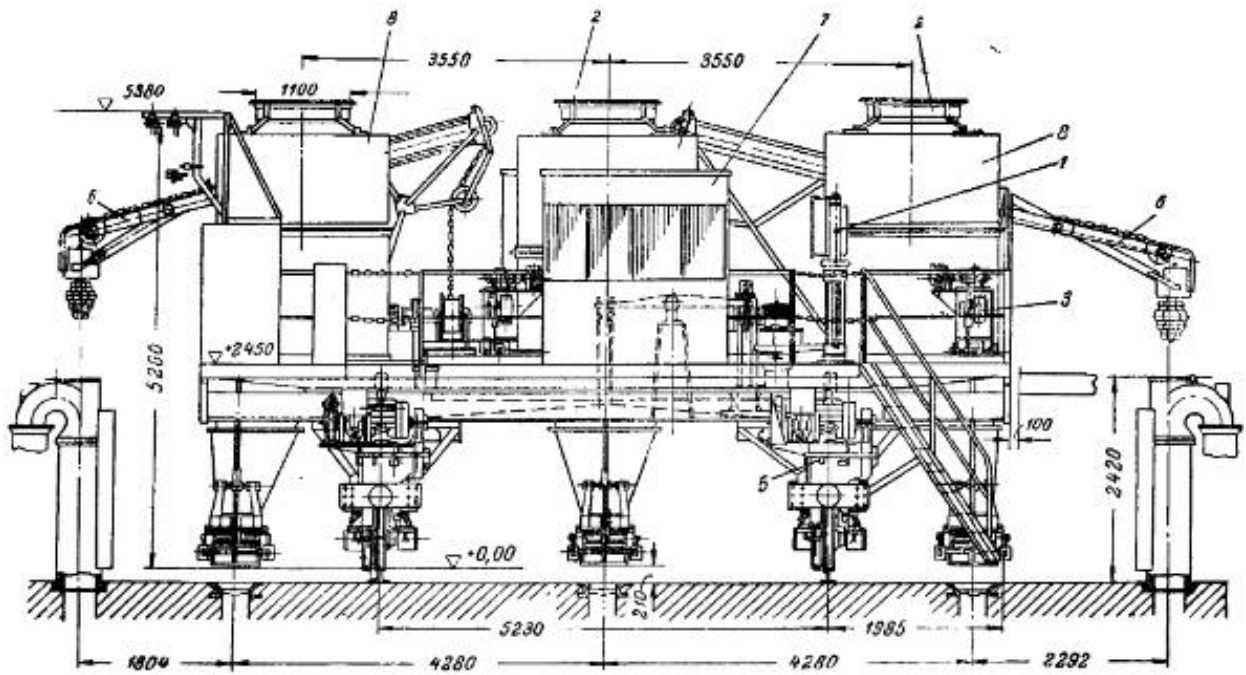


Рисунок 1.7. - Трьохбункерний вуглезавантажувальний вагон конструкції конструкторського бюро Главмашмета. Вид спереду.

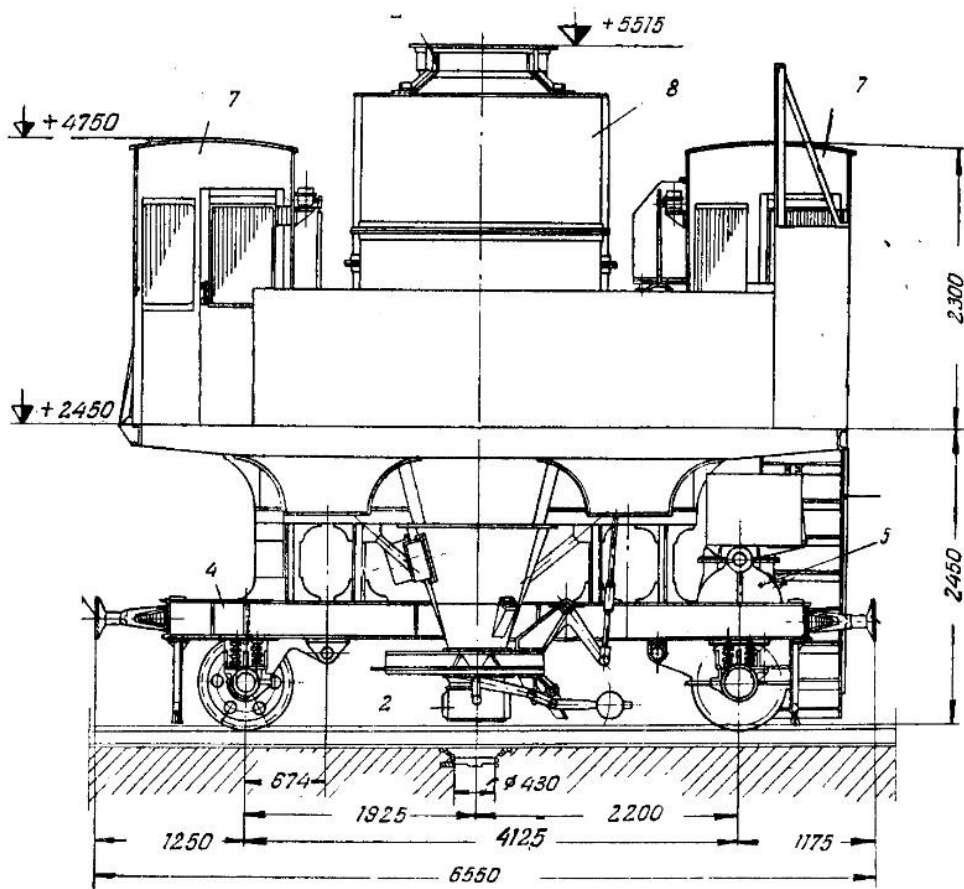


Рисунок 1.8. - Трьохбункерний вуглезавантажувальний вагон конструкції конструкторського бюро Главмашмета. Вид зліва.

Механізми для очистки стояків 6 котрі, котрі дають можливість машиністу не виходячи з кабіни здійснити очистку стояків. Дві кабіни 7, де зосереджено управління всіма механізмами вагона, забезпечують гарну видимість машиністу, при пересуванні машини в обидві сторони, що покращує умови для безпечної роботи. Зверху бункерів 8 встановлені регульовані телескопічні воронки 2. Механізми шибєрів, телескопів і механізми зняття люків обладнанні трьома електромеханічними приладами для окремого кнопкового управління кожним шибєром, телескопом та механізмом зняття люків.

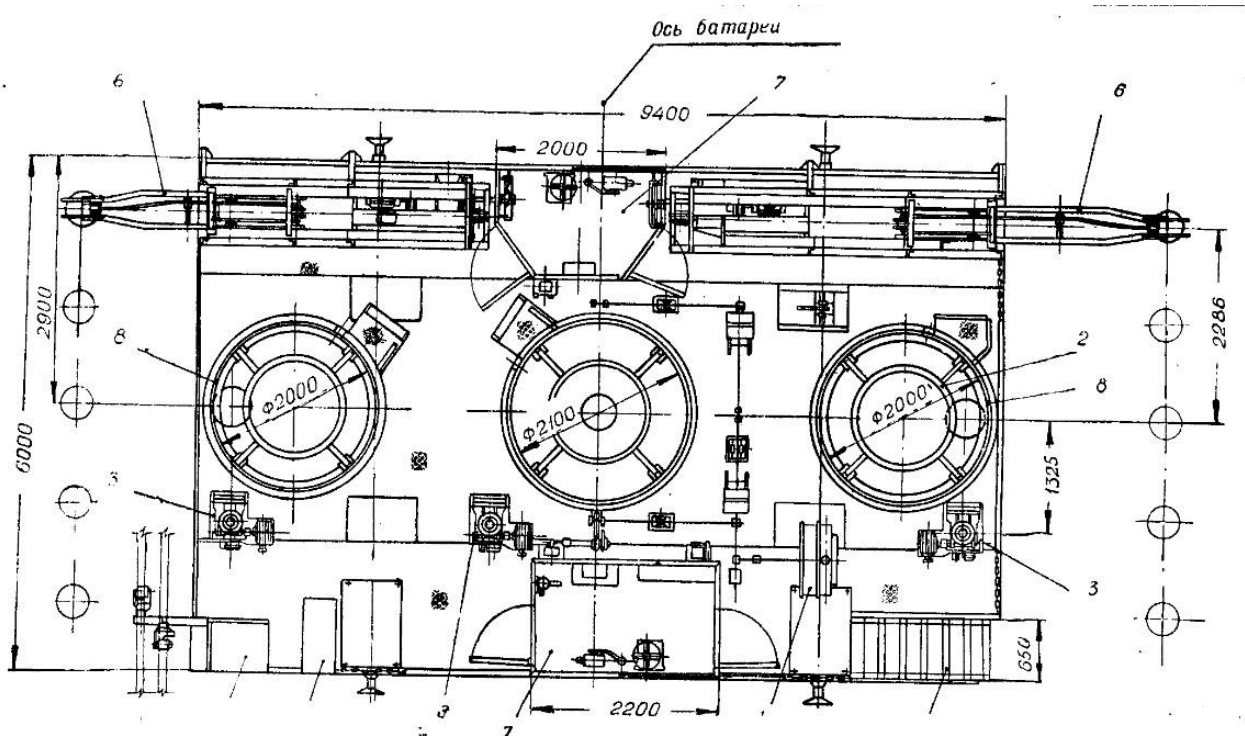


Рисунок 1.9. - Трьохбункерний вуглезавантажувальний вагон конструкції конструкторського бюро Главмашмета. Вид зверху.

Тормозна система механізму пересування – гідроелектрична.

Масило – централізована, від ручного приводу.

Електрообладнання і пускова апаратура – закритого типу.

Цей вагон виконую ті ж операції, що і попередньо описаний. Відрізняється він тим, що механізми шибєрів, телескопів та механізми для зняття люків, працюють за рахунок пневматичних приводів. Ці приводи підключені до встановленого на вагоні електрокомпресора типу Е-400 продуктивністю 670 л/хв при максимальному тиску 8 атмосфер. Робочий тиск у циліндрах 4 кг/см<sup>2</sup>

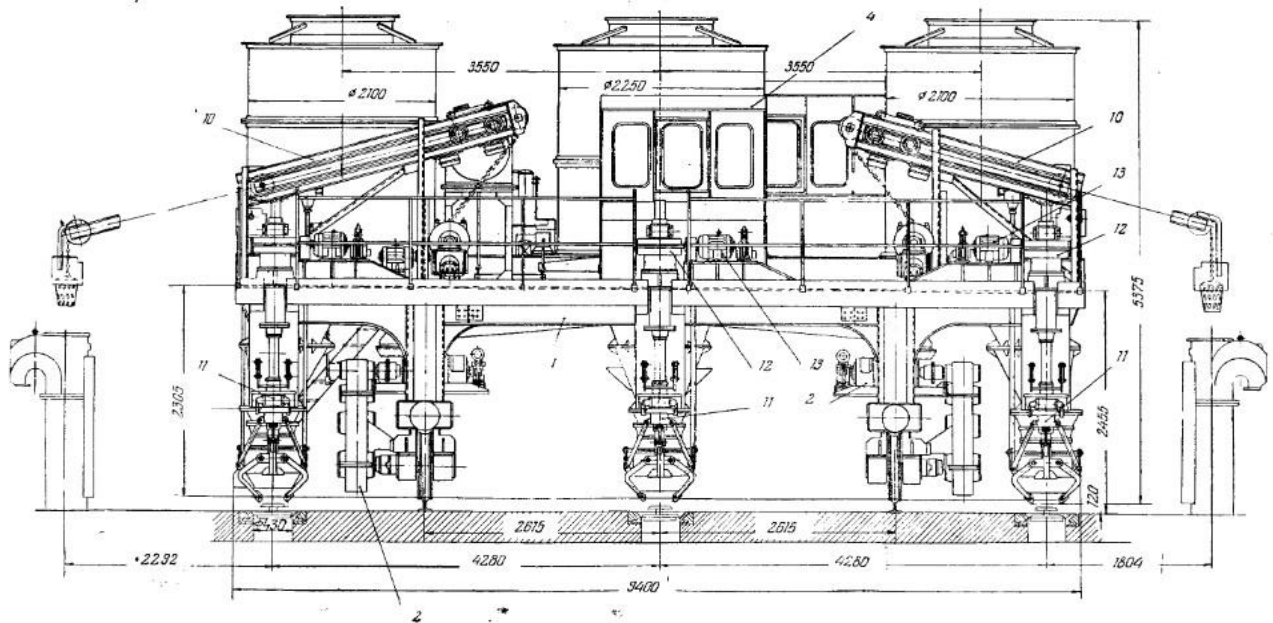
Характеристика трьохбункерного вуглезавантажувального вагона конструкції  
Орського машинобудівельного заводу

Корисна ємність бункера (максимальна) м <sup>3</sup> .....	24
Швидкість пересування вагона м/хв.....	110
Власна вага вагона (включає електрообладнання та ваговий механізм), т .....	42,6
Кількість колес маючих привід .....	2
Загальна кількість ходових колес .....	4
Колія вагона, мм.....	5230
Габарити вагона, мм	
ширина .....	9400
висота .....	5375
довжина (по буферам) .....	7700
Ваговий механізм – вантажопідйомність, т .....	до 20
Кабіна управління з верхнім розташуванням.....	2
Загальний час відчинення та закривання одного шибера, сек .....	6
Загальний час підйому чи опускання одного телескопа, сек.....	2
Загальний час зняття чи установки кришки люка, сек .....	7
Вантажопідйомність лебідки, кг .....	500
Швидкість підйому вантажу, м/хв.....	23

На вагоні встановлено три механізми для зняття люків коксової печі. Кількість механізмів відповідає кількості люків на печі. Кожен з цих механізмів приводиться в дію пневматичним циліндром. Крім цього на кожному з них встановлений електродвигун потужністю 2,2 кВт та черв'ячний редуктором який має передаточне число 30,5. Цей електродвигун забезпечують круговий рух приладу для очистки гнізд люків від присипаної шихти.

Механізм зняття люків та очистки гнізд, встановлений на краю площадки обслуговування. Це змушує машиніста додатково два рази встановлювати вагон в нове робоче положення. Оскільки хоч механізм зняття люків та механізм очистки гнізд мають одну вісь. Їх робота не є одночасною і не виконується одна

за одною. Після зняття люка йде засипання шихти, що змушує машиніста змінювати положення вагона відносно люків. Після чого необхідно знову повернутися у початкове положення, для очистки гнізд, та встановлення люків.



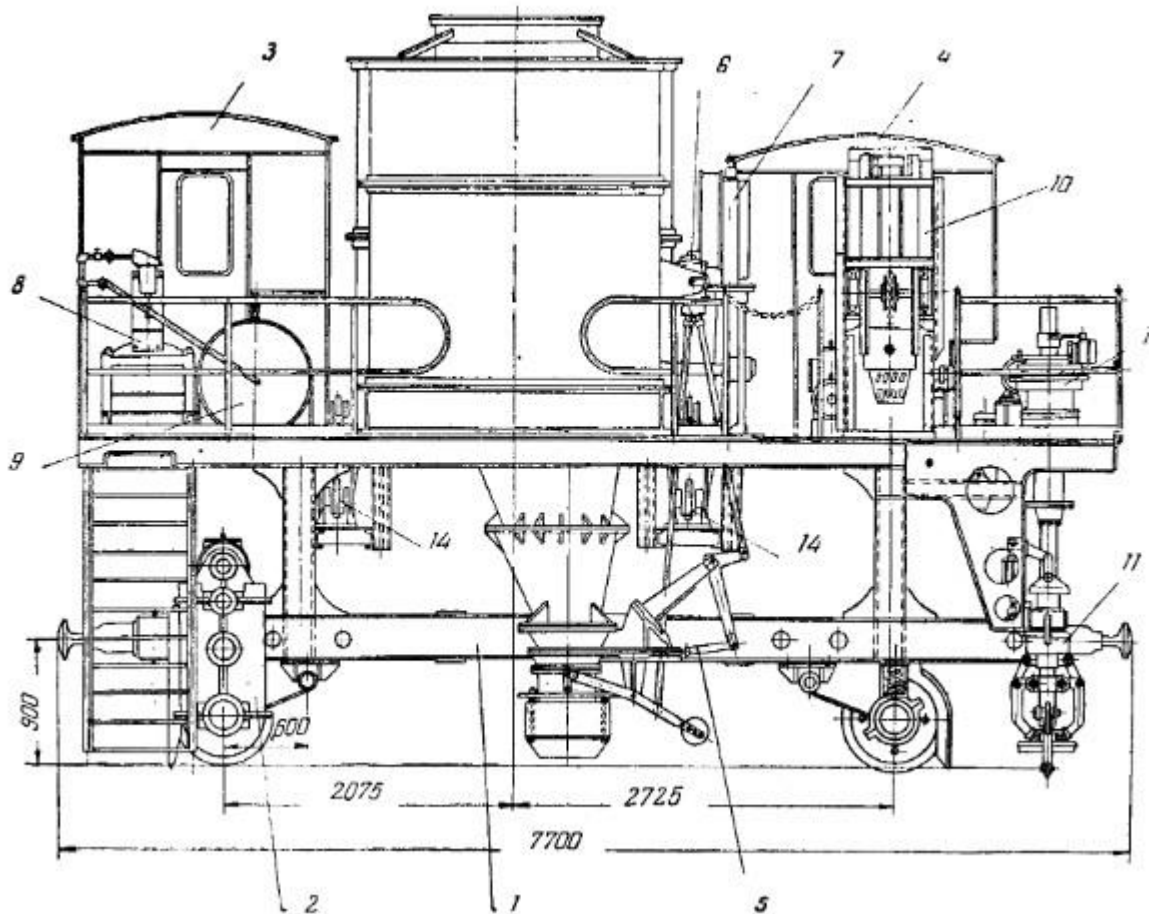
1 – головна рама металоконструкції вагона; 2 – індивідуальні електроприводи механізму пересування; 4 – друга кабіна управління; 10 – механізм для чистки стояків; 11 – механізм для зняття люків та механізм для чистки гнізд люків; 12 – черв'ячний редуктор; 13 – електродвигун механізму чистки люків

Рисунок 1.10. - Трьохбункерний вуглезагрузочний вагон конструкції Орського машинобудівельного заводу. Вид спереду.

З особливостей даної конструкції слід виділити наступні пункти:

- індивідуальний привід від пневматичних циліндрів шибєрів і телескопів;
- індивідуальний привід від пневматичних циліндрів механізму для зняття люків;
- механізм стряхування – пневматичний вібратор;
- тормозна система – колодки, пневматичні гальма.

Аналізуючи вугленавантажувальні вагони різних конструкторських бюро, прослідковується риса спільна всім бункерам. Конусна частина має великий кут нахилу бокової стінки. Таке конструктивне рішення пришвидшує плин матеріалу, зменшує утворення воронки та застійних зон.



1 – головна рама металоконструкції вагона; 2 – індивідуальні електроприводи механізму пересування; 3 – перша кабіна управління; 4 – друга кабіна управління; 5 – механізм шиберів і телескопів; 6 – пневмоциліндр привода шиберів і телескопів; 7 – циферблатна головка вагового механізму; 8 - компресорна станція; 9 – повітрозбірник; 10 – механізм для чистки стояків; 11 – механізм для зняття люків і механізм для очистки гнізд люків; 12 – черв'ячний редуктор механізму чистки гнізд люків; 14 – ваговий механізм вагона

Рисунок 1.11. - Трьохбункерний вуглезавантажувальний вагон конструкції Орського машинобудівельного заводу. Вид спереду.

#### 1.4. Сипкий матеріал як робоче середовище.

Сипкий матеріал це сукупність великої кількості дрібних частинок твердого матеріалу однієї або декількох фракцій.

Вважається, що існують лише три агрегатні стани речовини: тверда, рідка та газоподібна. Сипкий же матеріал часто вважають лише певним випадком твердого стану, проте його властивості відрізняються і не можуть бути описані його законами. Для визначення напружено деформованого стану твердого тіла в

механіці використовують теорії пружності, пластичності та повзучості. В свою чергу для рідин використовують гідромеханіку, а для газів – аеродинаміку. Проте для сипких матеріалів подібних методів розрахунку, досі не було визначено. Одним з факторів який ускладнює цей процес, це велика різноманітність сипкого матеріалу та сильна залежність фізико-механічних властивостей від зовнішніх умов: вологість, температура, наявність великої кількості фракцій різного розміру.

Сипкий матеріал постійно контактує з деталями обладнання значно пришвидшує корозію та зношування деталей з якими він контактує. Він як і рідина може утворювати певний потік. Проте на відміну від рідини, яка при падінні розподіляє свій вплив по контактній поверхні, сипкий матеріал, при достатній міцності, цього не робить і завдає сильних імпульсивних ударів, які значно важче контролювати та компенсувати.

Також під час роботи з перевантаження, обладнання може піддаватися сильному стиранню. Пошкодження захисних покриттів металевих конструкцій посилює дію корозійного середовища пришвидшуючи її зношування.

Обладнання теж впливає на сипкий матеріал. Дробарки та млини піддають його великим навантаженням зменшуючи розмір фракцій, сушарки зніжують концентрацію вологи, класифікатори – розділяють фракції роблячи сипкий матеріал більш однотипним. Також матеріал піддається стиранню при проходженні через жолоби, бункери, шнекові конвеєри.

При розробці обладнання яке буде працювати в таких умовах, постає завдання в оцінці напружено-деформованого стану не лише матеріалу з якого буде виконано обладнання, а й сипкого матеріалу.

Якщо у випадку з обладнанням, розрахувати його напруженодеформований стан стає можливим завдяки моделі механіки твердого деформованого тіла, то у випадку з сипким матеріалом, теорія пружності та пластичності не зможе оцінити його напружено-деформований стан. Через те, що закон деформування сипких матеріалів принципово відрізняється, перед механікою постає нове завдання у розробці реологічних моделей які зможуть вже описати напружено-



деформований стан сипкого матеріалу. Таке завдання наразі намагається вирішити окрема ланка механіки – механіка сипкого (дискретного) матеріалу.

Механіка дискретного середовища розглядає дискретний матеріал як сукупність хаотично розташованих твердих частинок, що взаємодіють між собою односторонніми контактами передаючи одна одній зусилля стискання та зсуву при цьому не сприймаючи зусиль на розтяг. За такою ознакою може здатись враження, що дискретний матеріал являє собою ідеальний сипкий матеріал. Натомість у статистиці сипке середовище розглядається як бездеформаційне. Надалі, будемо вважати, що дискретний матеріал, на відміну від сипкого, деформується за своїми законами.

Першою особливістю деформування дискретного матеріалу вважається вплив внутрішнього кулонового тертя. Другою відмінністю дискретного матеріалу від твердого тіла є дилатація. Дилатація – збільшення об'єму сипкого матеріалу під час руху. Цікавим фактом є те, що чим швидшим потік дискретного матеріалу, що рухається під дією власної ваги, тим більше коефіцієнт зростання об'єму, оскільки прискорення всього потоку стимулює більш хаотичний рух частинок одна відносно одної. Нажаль, обидві особливості, що описані вище, не можливо описати за допомогою класичної моделі механіки твердого деформованого тіла.

В реальних умовах роботи з дискретним матеріалом навантаження на нього не є стабільним і може як зростати та і зменшуватись. Модель дискретного середовища пластинчастого плинину дає можливість описувати лише активну частину деформування матеріалу при постійному навантаженні. Також цей спосіб розрахунку оцінює зміни напружено-деформованого стану при випадковому процесі навантаження, що дозволяє створити певний графік зміни навантаження.

Основними характеристиками сипкого матеріалу є гранулометричний склад, кут нахилу природнього відкосу, вологість, насипна щільність, приведений коефіцієнт Пуассона, модуль Юнга, коефіцієнт відновлення та коефіцієнт ковзання тертя.

Кут природнього відкосу – кут який може утворювати насип сипкого матеріалу відносно горизонту. Враховується, що під час насипання, матеріал не піддавався штучному ущільненні

#### 1.5. Фізико-хімічні властивості шихти.

Вугільна шихта є гарним прикладом сипкого матеріалу. На різних стадіях підготовки вугілля змінює свої характеристики в широкому діапазоні, а саме вологість, гранулометричний склад, насипна щільність, механічні властивості, що залежать від точного складу шихти.

Для виготовлення дійсно якісного коксу, необхідно підбирати відповідні коксуючі види вугілля, дробити їх та змішувати у суворих пропорціях. Неправильно підібране вугілля для шихти чи його пропорції можуть не лише зіпсувати партію коксу, а й навіть сильно ускладнити сам процес запікання та видачі коксового пирога.

Під час вибору необхідного вугілля, в першу чергу дивляться на його спікання та коксування.

Спікання – це властивість вугілля малої фракції при нагріві створювати коксовий пористий залишок який має назву – полукокс. Така властивість вугілля перевіряється лише під дією температур рівним 500-550°C, при цьому забезпечується відсутність доступу до повітря. Також ця характеристика означає здатність вугілля до плавлення та подальше затвердіння.

Коксування – це властивість вугілля утворювати великі на міцні шматки коксу при нагріванні до температур 900-1000°C. Саме розмір цих кусків та їх міцність дають змогу оцінити можливість обраної марки утворювати якісний кокс.

Необхідно враховувати, що коксування не йде окремою характеристикою, ця особливість має високу залежність як від природніх властивостей вугілля так і від технології підготовки його до коксування. Одними з природніх характеристик є в'язкість нагрітої пластинчастої маси, спікання, коефіцієнт

збільшення об'єму нагрітої маси та величина сили надавлювання на стінки коксової печі під час збільшення об'єму. Серед особливостей технологічної підготовки можна виділити такі важливі пункти: насипна щільність шихти, ступінь подрібнення, температура та швидкість коксування.

В загальному випадку склад вугільної шихти ніколи не складається з однієї чи двох марок вугілля. Це завжди сукупність великої кількості марок, і навіть їх подрібнення відбувається окремо одна від одної для підвищення якості кінцевого продукту. Точний склад оцінюється з огляду на властивості спікання та коксування кінцевої суміші марок, а не на кожен окремо, оскільки ці властивості можуть змінюватись під взаємним впливом різних марок.

Різні марки вугілля, можна поділити за наступними класами:

- Довгопламеневі (Д)
- Газові (Г)
- Жирні (Ж)
- Коксові (К)
- Піснувато-спіклене (ПС)
- Худі(Т)
- Антрацити(А)

Слід відмітити, що серед перерахованих марок вугілля, остання не використовується у коксуванні.

Як видно з переліку, марки умовно позначають першими літерами її назви, але крім цього, при характеризуванні конкретної марки вугілля, також використовують додаткові позначення V та Y. Літера V характеризує кількість летючих речовин у %, що виділяються при коксуванні. Величина Y визначається в лабораторних умовах і вказує на нижню границю спікання у вигляді товщини пластинчастого слою, та вимірюється у міліметрах.

У ході наукових досліджень та набутті практичного промислового досвіду стали помітні залежності міцності коксу від величин V та Y. У ході вивчення цих закономірностей стало можливим виведення наступних принципів складання сумішей вугільної шихти:

- Міцність та крупність шматків коксу має обернену залежність від кількості виділених летючих речовин під час запікання. Тобто, якщо при однаковій товщині пластинчастого шару та однакових умовах запікання, зменшити кількість виділених летючих речовин, за рахунок зміни складу шихти, міцність та крупність шматків коксу зростає.

- Збільшення товщини пластинчастого шару підвищує здатність засвоєння присадок та впливає на схильність вугільної шихти до спікання. При цьому міцність коксу не знижуються, а у окремих випадках навіть покращуються. Проте розміри шматків коксу як правило стають меншими.

- При однаковій товщині пластинчастого шару та збільшенні виходу летючих речовин схильність вугільної шихти до засвоєння додаткових присадок зростає.

- Газове вугілля групи Г6 має низьку схильність до спікання при звичайних умовах коксування. Але такі групи вугілля як Г10-Г12 та Г17, того ж класу, мають середню та високу схильність до спікання відповідно. При цьому вони утворюють добре проплавлений кокс, але з низькою характеристикою до спротиву подрібнюючим зусиллям. З цієї причини, газове вугілля необхідно комбінувати з жирними та коксовими.

- Для якісного коксування присадок вугілля з низькою характеристикою спікання, слід додавати до складу шихти марки класу жирних. Вугілля цього класу легко плавиться, що і робить його гарним варіантом для вирішення таких задач. Перевагою жирних марок є те, що стійкість готового коксу з даного вугілля має високу стійкість до стирання. Але недоліком можна виділити легке подрібнення коксу у результаті високого ступеню розвитку поперечних тріщин.

- При коксуванні марок вугілля класу коксові отримуються коксові шматки високої міцності та супротивом подрібнюючим і стираючим зусиллям, а сам коксовий пиріг має добру структуру та однорідний розмір грудок. Головною проблемою, яка унеможлиблює виробництво коксу лише з однієї цієї марки – це її рідкість. Сучасні підприємства коксохімічного відчувають гострий дефіцит

даного класу вугілля, тож змушені шукати альтернативні склади шихти з інших марок.

З 1991 року в Україні було введено новий ГОСТ 25543-88 та розроблено нові технічні умови ДСТУ 3472-96 для вугілля, яке використовується на українських заводах. З цього моменту вугілля почали поділяти за маркою, групою та підгрупою. Критеріями розподіли були такі показники як: органічна маса вугільної речовини, теплота згорання та виділення летючих газів.

Таблиця 3.2.1 Маркування коксуючогося вугілля згідно з ГОСТ 25543-88

Марка	Група	Підгрупа
Пошарове коксування		
КЖ	-	-
К	1К 2К	1КВ, 1КФ 2КВ, 2КФ
Ж	1Ж, 2Ж	-
ГЖ	1ГЖ, 2ГЖ	-
ПС	1ПС 2ПС	1ПСВ, 1ПСФ 2ПСВ, 2ПСФ
ГЖО	1ГЖО 2ГЖО	1ГЖОВ, 1ГЖОФ 2ГЖОВ, 2ГЖОФ
КО	1КО	1КОВ, 1КОФ 2КОВ, 2КОФ
Г	1Г 2Г	1ГВ, 1ГФ 2ГВ, 2ГФ
КС	1КС 2КС	1КСВ, 1КСФ 2КСВ, 2КСФ
КСН	-	КСНВ, КСНФ
ДГ	-	ДГВ, ДГФ
ТС	-	ТСВ, ТСФ
СС	1СС, 2СС, 3СС	-
Спеціальні процеси коксування		
Т	1Т 2Т	1ТВ, 1ТФ 2ТВ, 2ТФ
Д		ДВ

*К – коксовий, Ж – жирний, Г – газовий, КЖ – коксовий жирний, ГЖ – газовий жирний, Д – довгопламевий, Т – худий, С – спікаючийся, СС – слабосікливе, О – пісне, Н – низькометаморфизований, В – витринитовий, Ф – фюзинитовий. З цих позначень формуються всі.*

Було визначено, що для отримання якісного коксу для доменного виробництва необхідно обрати види вугілля які зможуть забезпечити виділення

летючих речовин з готової шихти у процесі коксування не більше 28%, а товщина пластинчастого шару Y не повинна перевищувати 16 мм. У випадку з перевищуванням цих показників до 37% летючих речовин і 28 мм пластинчастого шару, маса стає більш рухомою та пластичною. Результатом таких змін стає великий коефіцієнт спучування, що в свою чергу збільшує тиск на стінки печі. В результаті виходить кокс з великою кількістю пор, значною хрупкістю та високою схильністю до подрібнення.

На сьогоднішній день на виробництвах здебільшого використовуються шихти до складу яких входить вугілля з різними характеристиками, що компенсують одна одну забезпечуючи добрий результат коксування. До такого вугілля може відноситись, як марки з високою характеристикою спікання, що утворюють достатню кількість пластинчастої маси, так і протилежні, забезпечуючи добру в'язкість загальній масі речовини, певну міцність та крупність готового коксу.

Комбінація різних марок вугілля у шихті не є сталим значенням, і має певний допустимий інтервал відношення, яких може залежати навіть від регіону де було видобуто сировину. Таким чином шихта з донецького вугілля може включати в себе наступне співвідношення марок:

- Г – 30-40%;
- Ж – 30-35%;
- К – 13-18%
- ПС – 13-20%
- Т – 0-5%

Не рідким явищем є додавання до шихти певних добавок (коксова дріб, колосниковий пил). Метаю даного процесу є як утилізування відходів виробництва, так і підвищення якості коксу.

Косову дріб здебільшого використовують як паливо для агломерації руд і концентратів, але основну її частину замінюється антрацитом, оскільки, як вже було зазначено раніше, антрацит не використовується для коксування. Коксову дріб, що залишилась, інколи додають до шихти. Додавання її до складу шихти є

цілком доцільним, бо у результаті зменшується відсоток летючих речовин, що сприяє зниженню утворення тріщин.

Склад вугільної шихти є важливим але не єдиним фактором впливаючим на якість кінцевого продукту. Також, не менш важливим, є підготовка шихти, від подрібнення сировини, до контролю змішування та вологості.

Серед основних параметрів можна виділити наступні:

- Насипна щільність;
- Температура;
- Вологість;
- Гранулометричний склад.

Підготовка шихти починається з розгрузки вагонів. Цей процес відбувається автоматично за допомогою вагоно-перекидача. Швидкість розвантаження сягає 20 вагонів за годину, таким чином потяг з масою вугілля 2000 – 3000 т розвантажується за 2 години. Для пришвидшення розвантаження, використовуються вібратори. З вагоно-перекидача вугілля переходить на склад.

У зимовий період року головною проблемою може стати примерзання вугілля до залізних деталей вагона. Для попередження даної проблеми, вагони змащують мастилом. Вугілля під дією сильних морозів та за наявності надлишкової вологи також може піддатися зледенінню утворюючи великі глиби. У даному випадку також використовують мастило додаючи його безпосередньо у вугілля, приблизно 1-1,5% від загальної маси. Якщо попередньо описані дії не допомогли і вугілля примерзло до вагона, використовують спеціальні теплові гаражі. Розморожування проходить одночасно 15-20 вагонів. Температура цих приміщеннях сягає 100-110°C і забезпечується шляхом обігріву їх продуктами горіння доменного або коксового газу. Загальний час розморожування коливається від 1,5 до 3 годин.

Головною метою зберігання вугілля на складах є його прийняття після розвантаження, забезпечення фізико-механічних властивостей, постійний склад шихти по фракціям, своєчасна та стабільна подача сировини на виробництво зважаючи на коливальний тип підвозу вугілля. Об'єми вугільних сховищ мають

певні обмеження які описуються періодом зберігання вугілля та кількістю споживаної сировини підприємством за добу. Частота підвозу матеріалу та кількість вугілля яка необхідна підприємству встановлює нижній поріг загального об'єму сховища, а дозволений час зберігання вугілля його максимальний об'єм. Виходячи з цих параметрів обирається оптимальний розмір сховища.

Шихта вважаються добре підготовленою, якщо коливання параметрів відповідають наступним значенням:

- Коливання компонентів шихти  $\pm 2\%$
- Ступінь подрібнення вугілля  $\pm 2\%$
- Зольність  $\pm 0,5\%$
- Вологість  $\pm 1\%$
- Летючі речовини  $\pm 0,7\%$
- Сірчистість  $\pm 0,05\%$

Перед відправкою вугільної шихти на коксування, вона проходить етап додаткового подрібнення. Ціллю цього етапу є отримання шихти з коректним гранулометричним складом. Добрим результатом вважається відсоткова частина фракцій від 0мм до 3 мм близько 80%-85%. Цей показник не є ідеальним для всіх варіацій шихти та може коливатись від 75% до 90%. При цьому наявність в шихті фракції розміром 0,5 мм та менше є не бажаною, оскільки підвищує концентрацію пилу, особливо під час завантаження шихти у коксову піч. Розмір фракції, до якою подрібнюється марка вугілля залежить від її властивостей спікання та коксування.

Після подрібнення, наступною необхідною процедурою є змішування всіх компонентів шихти до однорідної маси. Це забезпечую однакову якість запікання коксу та його властивості по всьому об'єму печі. Часто для таких завдань використовують змішувачі з продуктивність 1200 т/год.

Глибока сушка шихти видаляю зайву вологу з вугілля для його збагачення. Це зменшує втрати тепла на обігрів печі та пришвидшує процес запікання. Лишу 1% зайвої вологи подовжує час запікання на пів години. Під час сушки, шихта



піддається впливу високих температур, 200-250°C. Після сушіння шихта втрачає близько 90% вологи, та її насипна щільність зростає на 15-20%, що також значною мірою підвищує продуктивність печі.

У загальному випадку шихта володіє наступними властивостями:

- Модуль Юнга - 0,62e+5 МПа [10]
- Коефіцієнт Пуассона - 0,11 [9]
- Коефіцієнт тертя (шихта-сталь) - 0,14 [8]
- Насипна щільність 700-800 кг/м<sup>3</sup> [11]

### 1.6. Додаткове обладнання бункера

Часто бункери використовують з допоміжним обладнанням для більш контрольованого відвантаження сировини. Таким обладнанням може бути стрічковий або шнековий конвеєр, диск, що обертається та ін. Така Такий тандем називається живильником.

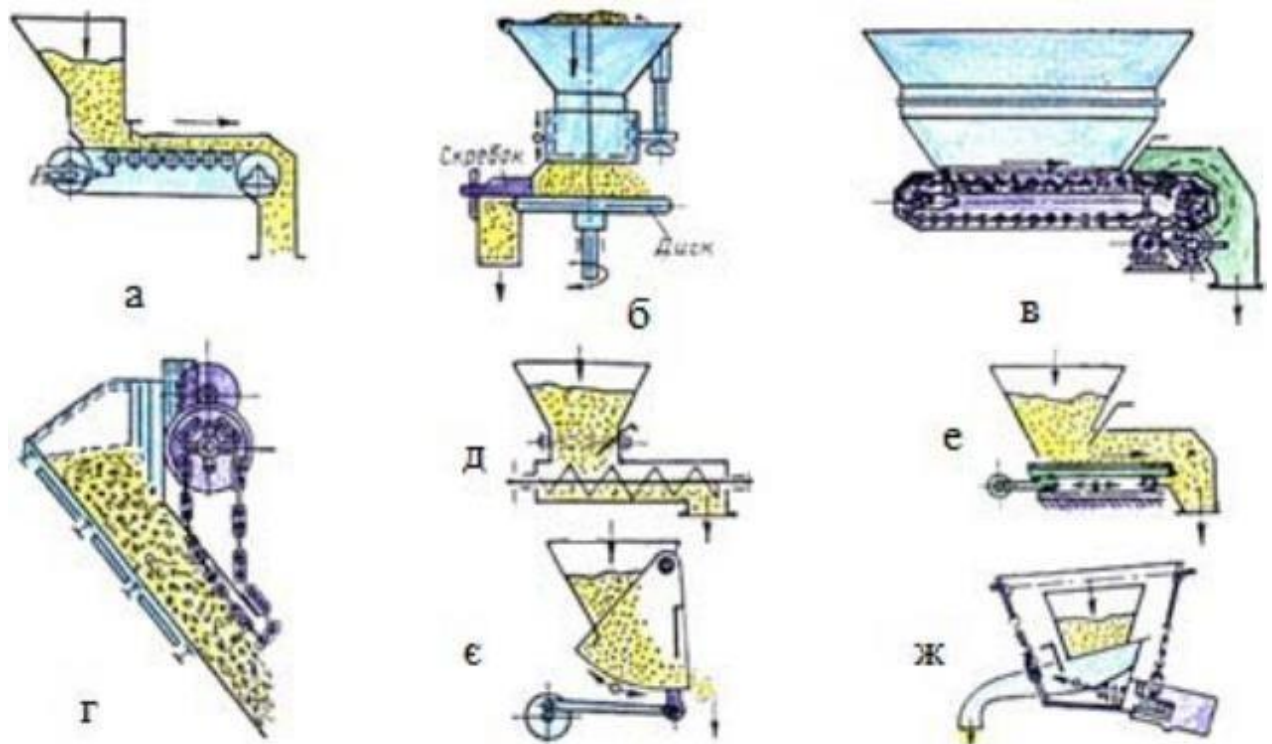
Живильники призначені для рівномірної подачі матеріалу з бункера на технологічну лінію. Забезпечують стабільне та безперервне живлення виробничої лінії, усувають коливання подачі та мають легке регулювання продуктивності.

Дисковий – популярний тип живильників на фабриках збагачення та коксохімічних заводах. До конструкції входить: бункер, диск, патрубок, ніж. Сипкий матеріал під дією власної ваги просипається на диск, що обертається. Висота шару матеріалу на диску регулюється за рахунок патрубків бункера. Спеціальний ніж, знаходячись на краю диска зрізає частину матеріалу та перенаправляє його далі по технологічній схемі. Регулювання подачі матеріалу може здійснюватися одразу трьома факторами, висотою підняття патрубків, швидкістю обертання диску та глибиною занурення ножа у шар матеріалу. Має обмеження щодо максимальних розмірів грудок, 80 мм, та діаметр диску повинен бути у 15-30 раз більшим за максимальний розмір грудок.

Стрічковий – простий в експлуатації, має не складну конструкцію яка складається загалом лише з бункера та стрічкового конвеєра. Регулювання

подачі матеріалу відбувається шляхом піднімання чи опускання спеціальна затвор , тим самим контролюючи висоту шару матеріалу, що подається. Недоліком є швидкий знос стрічки конвеєра по причині тертя об сипкий матеріал, через це бажано використовувати для матеріалів з низькою абразивністю.

Пластинчастий – загалом схожий на стрічковий але більш міцний та зносостійкий[4]. Бункер має товщі стінки, а конвеєр розрахований на роботу з важкими абразивними матеріалами. Замість стрічки він оснащений сталевими пластинами, що і дає йому змогу витримувати важкі умови експлуатації: місця прийому руди, збагачення, випуск породи на шахтах, дроблення та ін[6].



*а – стрічковий; б – дисковий; в – пластинчастий; г – ланцюговий; д – шнековий; е – хитний; є – маятниковий; ж – вібраційний*

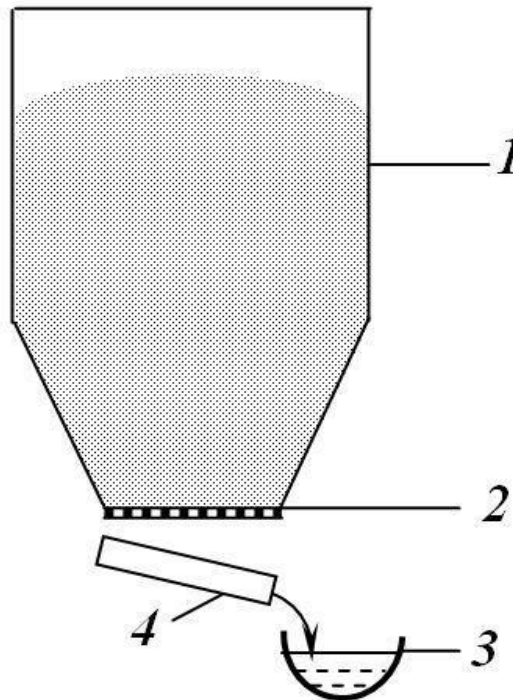
Рисунок 1.12 - Види живильників [5]

Ланцюговий – являє собою продовгуватий жолоб, за переміщення матеріалу вздовж якого відповідають ланцюги. Мають продуктивність 2000 м<sup>3</sup>/год. Та можуть транспортувати ресурси на відстань до 2 км. Завдяки великим міцності тягових ланцюгів. У порівнянні з пластичними дозаторами, ланцюгові також здебільшого використовуються для переміщення важких та громіздких

матеріалів великої фракції. Але також мають можливість переміщувати матеріалу високої температури, через що часто використовуються в металургійній промисловості. У порівнянні з іншими живильниками також можуть транспортувати сировину у вертикальній площині. Проте цей тип дозаторів більш важкий, громіздкий та дорожчий в експлуатації. Через велику кількість пар тертя у ланцюгу, він потребує регулярного змащування. Регулювання продуктивності відбувається за рахунок зміни швидкості з якою проходить ланцюг по бункеру.

Шнековий – застосовується коли під час переміщення матеріалу є необхідність у його перемішуванні, підйому на якусь висоту або ізолюванні від дій навколишнього середовища, наприклад: транспортування пилу поза приміщення[14]. Матеріал подається у шнековий дозатор через вхідний отвір після чого, завдяки обертанню гвинта, просувається вздовж жолоба до вихідного отвору. Принцип дії заснований на використанні осьової рушійної сили. Продуктивність регулюється швидкістю обертання гвинта.

Хитний – так як і пластинчастий живильник дуже схожий на стрічковий, єдина відмінність якого це заміна стрічкового конвеєра на стіл зі зворотно-поступальним рухом. При просуванні столу вперед матеріал переміщується до зони розвантаження, після чого стіл здійснює зворотній рух і матеріал просипається. Повернення матеріалу у початкове положення разом зі столом не відбувається завдяки стінці бункера та постійному притоку нових його порцій. Зворотно-поступальний рух відбувається завдяки ексцентрику. Через це можуть виникати певні імпульси при розгрузці, але на великих швидкостях обертання ексцентрика вплив цього фактору може зменшитись. Продуктивність регулюється шляхом зміни швидкості обертання двигуна та діаметра кола яке описує місце кріплення коромисла до ексцентрика.



*1 - бункерна чарунка; 2 - перфорований шибер; 3- лоток; 4 - піддон*

Рисунок 1.13 - Схема зневоднюючого бункера.

Маятниковий – на відміну від багатьох живильників подає матеріал не постійно, а певними порціями.

Так же як і у випадку з хитним живильником, зворотно-поступальний рух відбувається завдяки ексцентрику, але з більшою амплітудою, та меншою швидкістю. У ролі органу переносу матеріалу виступає саме днище. Налаштування живильника можливо здійснювати трьома елементами. Кількість порцій в одиницю часу – швидкістю обертання ексцентрика, амплітуда – як і з хитним живильником, зміною діаметра кола яке описує місце кріплення коромисла до ексцентрика, місце розвантаження – за рахунок талрепа на важелі. Проте під час налаштування, слід враховувати, що під час руху, днище не повинне виходити за границі отвору бункера. У іншому випадку можливе просипання матеріалу.

Вібраційний – являє собою лоток закріплений під отвором бункера на амортизаторах. Вібраційні коливання забезпечуються електромагнітним

вібратором. Це дає змогу регулювати продуктивність лише зміною напруги. Недоліком є сильна залежність продуктивності від властивостей сипкого матеріалу: розміру його фракцій, вологості, внутрішнього тертя. Через це його необхідно часто регулювати, або використовувати з системами автоматичного регулювання.

Зневоднюючі призначені для відведення зайвої вологи з сипкого матеріалу. Являє собою бункер циліндричного або квадратного профілю з відповідно з конусною або пірамідальною частиною знизу. Замість звичайного люка, на вихідному отворі монтується перфорований шибер. Перфорація має бути меншою за розмір найменших грудок зневоднюючого сипкого матеріалу. Під вихідним отвором знаходиться лоток для збору і відведення води у піддон.

Процес роботи зневоднюючого бункера є циклічним і може займати від 4 до 20 годин, в залежності від типу та кількості матеріалу. Одним з важливих факторів продуктивності бункера, який залежить не від матеріалу, а від його конструкції, це висота бункера. Адже чим він вищий, тим вище шар матеріалу у ньому, а отже і шлях який необхідно пройти рідині від верхніх шарів до вихідного отвору є більшим, а час довшим. Саме зневоднення відбувається за рахунок земного тяжіння, та не потребує додаткових рушійних механізмів.

Для зменшення впливу вібрацій на бункер, та перенесення їх впливу безпосередньо на матеріал використовують вібраційні елементи заглиблені у матеріал.

Винахід відноситься до зберігання та вивантаження сипких матеріалів з бункерів і може бути використане для вивантаження важкосипучих матеріалів із запобіганням їх зависання в бункері[7]. Бункерний пристрій містить бункер 1 і склепіння з підвіскою 2, вібратором 3 і розташованим по осі бункера 1 стрижнем 4, виконаним цільним і забезпечений розсікачами матеріалу у вигляді лопаток 5 і 6, розгорнутих по осі стрижня 4 одна відносно іншої. Верхня частина вібратора 3 сполучена з нижнім кінцем амортизатора 2, а нижня його частина сполучена з верхнім кінцем стрижня 4. Лопатки 5, 6 закріплені в нижній частині стрижня 4 з нахилом до осі.

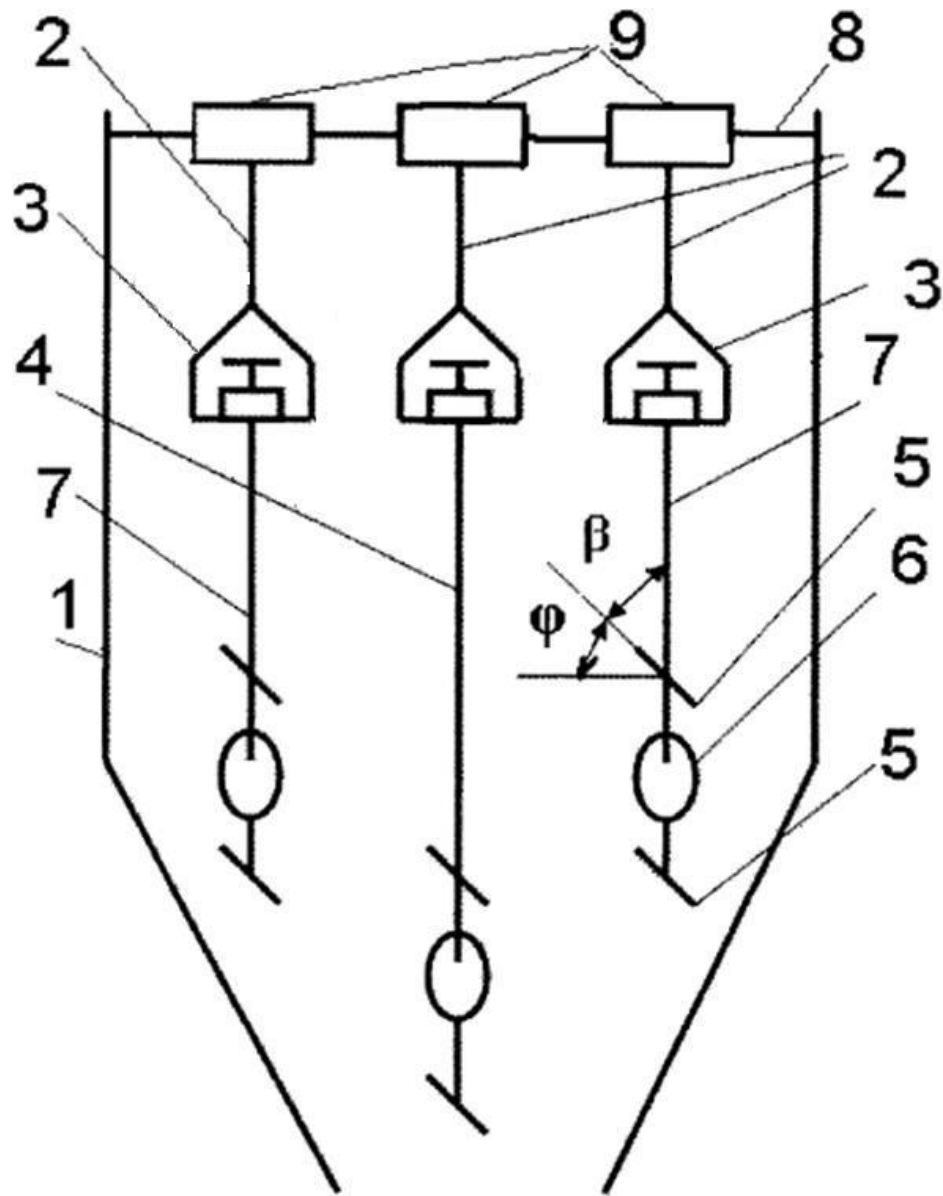


Рисунок 1.14 – Схема бункера з внутрішніми вібраторами.

Кожна лопатка 5, 6 є пластиною, жорстко закріплену на стрижні 4 з кутом нахилу  $\beta = (90^\circ - \varphi)$  щодо осі стрижня 4, де кут  $\varphi$  - кут природного укосу матеріалу. Для важкосипучих матеріалів або при великих об'ємах бункера 1 обрушувач склепінь може бути оснащений додатковими, 4 п'єзоелектричними і встановленими між бічними стрижнями 7 і їх підвісками 2. Причому довжина бічних стрижнів 7 менше довжини стрижня 4, розташованого по осі бункера 1. Підвіски 2 з бічними стрижнями 7 закріплені з можливістю регульованого горизонтального зміщення з наступної 8. 2 бічних стрижнів 7 виконані у вигляді кілець 9. Бункерний пристрій винаходу забезпечує збільшення швидкості

вивантаження, виключення склепіннятворення, можливість переобладнання будь-яких бункерів.

### 1.7. Постановка задачі дослідження

Встановлено, що основним фактором який впливає на якість використання ресурсу бункера є взаємодія стінок бункера з сипким матеріалом всередині нього.

Згідно з теми магістерської роботи, необхідно провести пошук можливих заходів по зміні конструкції бункера, чи її параметрів для підвищення ефективності.

Відповідно до теми магістерської роботи, встановлено наступні задачі.

1. Побудова 3D моделей бункерів різних конструктивних параметрів для наступних розрахунків.
2. Розробка скрипту для подальших досліджень в програмі LIGGGHTS.
3. Проведення чисельних розрахунків потоку сипкого матеріалу в бункері.
4. Аналіз конструкції бункера, та його вплив на характер руху сипкого матеріалу.
5. Аналіз отриманих результатів їх обробка та знаходження головних напрямків вдосконалення.
6. Оцінка результативності та знаходження оптимальних конструктивних параметрів вдосконалень.

## 2. АНАЛІЗ РУХУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ В БУНКЕРАХ

### 2.1. Моделі дискретного середовища пластичного плинну

Існує декілька математичних моделей для дослідження деформування сипкого матеріалу. Згідно однієї моделі, сипкий матеріал розглядається як сукупність дрібних частинок твердого матеріалу, а інша модель, при розмірі частинок на порядок меншим за розмір потоку, допускає цілісність всього потоку та використовує рівняння з теорії пластичності.

Головною метою моделі дискретного середовища [3] є дослідження процесів, що протікають за межами пружного деформування, вона ставить у відповідність напруженням  $\{\sigma\}$  не повні деформації  $\{\varepsilon\}$ , а швидкості їх приростів  $\{d\varepsilon\}$  згідно зі співвідношенням

$$\{d\varepsilon\} = d\lambda \frac{\partial \Phi(\{\sigma\})}{\partial \{\sigma\}}$$

де  $\Phi(\{\sigma\})$  – потенціальна функція,  $d\lambda$  – множник Лагранжа

Для гарантування протікання пластичного деформування, необхідно щоб виконувалась умова пластичності. Якщо розглядається ідеально- пластинчасте тіло, то ця умова описує поверхню текучості і має наступний вигляд.

$$f(\{\sigma\}) = 0$$

У випадки коли на середовище діють сили стискання, в умову додається параметр  $x$ :

$$f(\{\sigma\}, X) = 0$$

Якщо розмір фракцій дискретного матеріалу є на порядок меншим за загальний розмір досліджуваного потоку, то загальний об'єм матеріалу дозволено вважати суцільним. Таке спрощення дає змогу назвати потік квазісуцільним (уявно цілим), та дозволяє застосувати з теорії пластичності рівняння рівноваги і нерозривності.

Між деформування дискретного матеріалу та твердим тіло можна провести певні аналогії. Під час деформування твердого тіла, відбувається зсув



макрокристалів вздовж певної площини. Протидіють цьому зсуву максимальні дотичні напруження які утворюються завдяки зв'язності матеріалу. Деформування потоку дискретного матеріалу відбувається за схожим принципом, лише у іншому масштабі. Під деформацією вважають взаємно проковзування частинок матеріалу, а максимальні дотичні сили утворюються за рахунок сили тертя між частинками, та силою притискання, що утворюється під вагою загального потоку. Виходячи з таких порівнянь можливо зробити висновок, що деформування твердих тіл і дискретного матеріалу мають схожу природу.

Закономірності пластичного потенціалу встановлюються експериментально. Через велику складність проведення експериментів з урахуванням довільного складного напруженого стану, дослідження проводять при простому напруженому стані з еквівалентними значеннями. Після чого роблять перенос, за гіпотезою Людвіка, на довільний складний напружений стан.

При плоского стану частіше за все використовують умову Сен-Венана:

$$\tau_{max} = 0,5(\sigma_1 - \sigma_2) = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} = \tau_T$$

де  $\sigma_1, \sigma_2$  – максимальне і мінімальне головні напруження;

$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  – напруження в площині деформування;

$\tau_T$  – границя текучості матеріалів.

## 2.2. Потік сипкого матеріалу

Види потоків сипкого матеріалу діляться на 3 типи з наступними ознаками:

- рух під кутом по каналах і трубках з частковим заповненням площі поперечного перерізу;
- рух по вертикальних каналах і трубах з повним заповненням площі поперечного перерізу;
- просипання матеріалу через технологічні отвори у днищі або боковій стінці.

Форма руху потоку буває зв'язною, незв'язною та змішаною. При зв'язному русі, зв'язки, що діють між частинками, утримують їх у стані спокою відносно одна одної. Швидкість кожної частинки в поперечному перерізі буде мати однакову величину, а загальний об'єм потоку є сталим. У випадку незв'язної форми руху, сили взаємодії частинок не втримують їх у стані спокою, відносно одна одної, та вони починають переміщуватись у довільних напрямках. У поперечному перерізі потоку кожна частинка має власну швидкість та інколи власний напрямок руху. Через це по ходу протікання матеріалу, об'єм однієї ж і тієї ділянки потоку змінюється. У випадку, коли в потоці спостерігаються обидві, попередньо описані, форми потоку, його називають – змішаною формою

Розглянемо кожен вид руху окремо. Потік матеріалу по жолобах і трубах є можливим лише у випадку, коли кут нахилу ємності є більшим за кут нахилу природнього відкосу (дивись підрозділ 1.4) сипкого матеріалу. У випадку з трубами, переріз повинен бути заповнений не повністю.

$$\alpha > \varphi_0,$$

де  $\alpha$  – кут нахилу жолоба (труби до горизонту);

$\varphi_0$  – кут тертя сипкого матеріалу о стінки ємності.

Якщо кут нахилу жолоба (труби) коливається у діапазоні між величиною кута природнього відкосу сипкого матеріалу і кутом тертя його о стінки, то порушення зв'язків між частинками не відбувається. У випадки коли кут нахилу буде більшим за кут відкосу і кут тертя – спостерігається рух частинок відносно всього потоку.

При русі матеріалу по вертикальних бункерах заповнюється вся поперечна площа, частинки матеріалу контактують по всьому периметру і потік змінює свою форму руху. В залежності від властивостей матеріалу потік може набувати зв'язної, незв'язної або змішаної форми. В незалежності від форми бункера початковою формою потоку завжди буде незв'язна. Час її дії залежить від форми бункера та щільності укладки.

Укладка матеріалу в бункерах вказує на щільність прилягання частинок та кількість повітря між ними. Укладка може змінюватись по вертикалі бункера

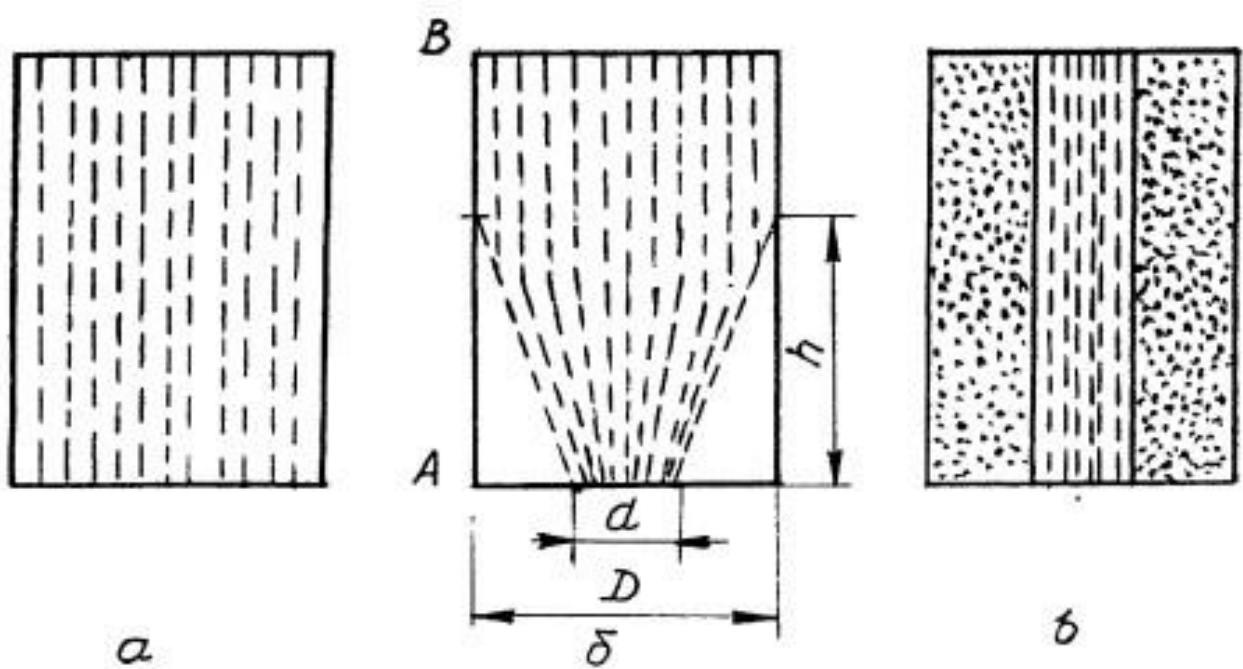
через спресовування нижніх шарів матеріалу під дією ваги верхніх шарів. Також залежить від властивостей сипкого матеріалу та характеру завантаження його у бункер.

При нещільній укладці матеріалу та невеликому діаметрі бункера ( $D < 200\delta$ , де  $\delta$  – характерний розмір частинки) незв'язна форма потоку проходить швидко. Структура матеріалу перебудовується швидше. В протилежному випадку, при щільній укладці та великих діаметрах бункера ( $D > 200\delta$ ), час протікання незв'язної форми потоку йде довше, і чим більш щільніша укладка та розміри бункера, тим довше буде протікати ця форма руху.

Коли щільність укладки матеріалу стає критично, і він вже не може затримуватись у бункері, форму потоку переходить у зв'язну. В залежності від умов спустошення бункера та його розмірів, зв'язний рух може протікати по всій площині перерізу бункера (рис 2.1 а), в центрі ((рис 2.1 в) та у верхній частині бункера.

При змішаній формі потоку, одночасно існують зв'язна і незв'язна форма. Оскільки їх характер руху різний, на їх межі виникає пульсація. Коли зв'язна форма набуває максимальної несучої здатності, за рахунок внутрішнього склепіння, вона наштовхується на незв'язну і зупиняється, передаючи її частину свого матеріалу. Так відбувається поки весь зв'язний потік не перейде у незв'язний.

Зростання частоти пульсацій, спричинені руйнуванням внутрішніх склепінь, пов'язане зі зростанням швидкістю потоку.



*a* - по всій висоті потоку; *б* - в верхній частині потоку; *в* - в центральній частині потоку

Рисунок 2.1 Зв'язні форми руху сипкого матеріалу[12]

Зв'язна форма руху в центральній частині бункера пов'язана з перенесенням поверхні тертя в глиб потоку матеріалу. Таку перенесення зокрема забезпечують внутрішні ребра при висоті ребра  $C$  ( $10 \delta < C < 0,02 D$ ), а відстань між ребрами:

$$t = \frac{D}{4} \operatorname{tg} \left( \frac{\pi}{2} - \varphi'_{\max} \right)$$

Приведена вище закономірність спостерігається в потоках за умови його нерозривності, яка забезпечується мінімальним діаметром бункера та максимально допустимою швидкістю потоку.

$$D_{\text{кр}} \geq \alpha e^{b\delta}$$

де  $\alpha$  і  $b$  – постійні;

$\delta$  – найбільший розмір частинки сипкого матеріалу, мм.

Розрив потоку виникає при швидкості його руху більше критичної

$$v_{\text{кр}} \geq B \sqrt{R_{\text{r}}}$$

де  $B$  – постійна, яка залежить від властивостей матеріалу;  $R_T$  – гідравлічний радіус ємності, м.

В деяких апаратах вертикальної конструкції спостерігається більш важким. Це обумовлено введенням в об'єм потоку конструкційних елементів, та зменшенням площини поперечного перерізу.

Дослідженнями встановлено, що розрив потоку не виникає, якщо виконується умова:

$$\frac{A}{A_0} > 20 \quad \frac{A_0}{A_T} > 20$$

де  $A_0$  – площа міделевого перерізу введених в потік конструктивних елементів (проекція площі перерізу конструктивного елемента на площину перпендикулярну напрямку руху сипкого потоку);

$A_T$  – площа міделевого перерізу частинки сипкого матеріалу;

$A$  – площа перерізу потоку.

### 2.3. Швидкості потоку сипкого матеріалу з конусної частини бункера

Основними вимогами до роботи бункерного обладнання є:

- забезпечення необхідної продуктивності;
- мінімізація пульсацій потоку;
- забезпечення відсутності розривів потоку;
- зниження вірогідності утворення склепіння.

Для виконання зазначених вимог необхідне створення математичної моделі для описання руху сипкого матеріалу на виході з бункера. Ця модель повинна враховувати як конструкцію бункера, так і основні властивості частинок матеріалу.

Існує декілька варіантів знаходження швидкості частинок на виході з бункера.

Закон Торічеллі та Пуазейля застосовуються для розрахунку плинущ рідини[16 17]. І у випадки гідравлічного витікання матеріалу, стає можливим, з певними допущеннями, використання цих законів

За законом Торічеллі [2] швидкість потоку матеріалу визначається за формулою:

$$v = \lambda \sqrt{2gh},$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$h$  – висота шару матеріалу в бункері, м;

$\lambda$  – коефіцієнт витікання (0,55..0,65 для легкосипких матеріалів; 0,3..0,5 для кускових матеріалів неправильної форми; 0,2..0,25 для пилоподібних матеріалів).

Закон Пуазейля [1] допомагає знайти кількість матеріалу, що протікає по трубці під дією різниці сил тиску.

$$Q(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l} (P_2(t) - P_1(t)),$$

$P_1(t) = 0$  – тиск в нижній точці трубки, Па;

$P_2(t)$  – тиск в верхній точці трубки, який визначається рівнем рідини, що знаходиться у ємності ( $h$ );

$l$  – довжина трубки, м;

$\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості;

$r$  – радіус трубки, м

При розрахунку висипання матеріалу з бункера, тиск знаходиться шляхом визначення кількості матеріалу вище отвору. Це дає розуміння, що при обчисленні по законам Торічеллі і Пуазейля, швидкість потоку залежить від висоти матеріалу у бункері.

Визначення балансу матеріалу допоможе визначити характер руху потоку:

$$Q(t) = \frac{dV(t)}{dt}$$

де  $V$  – об'єм матеріалу в бункері.

Оскільки частіше за все бункери мають циліндричну та конусну частини, складемо диференційне рівняння для кожної з них:

Для циліндричної частини рівняння має наступний вигляд:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{\pi r^4}{8\eta l} P2(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \rho g h(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \rho g h(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \rho g \frac{V(t)}{\pi R^2}$$

$dV(t)$      $\pi r^4$              $\pi r^4$              $\pi r^4$              $\pi r^4$      $V(t)$

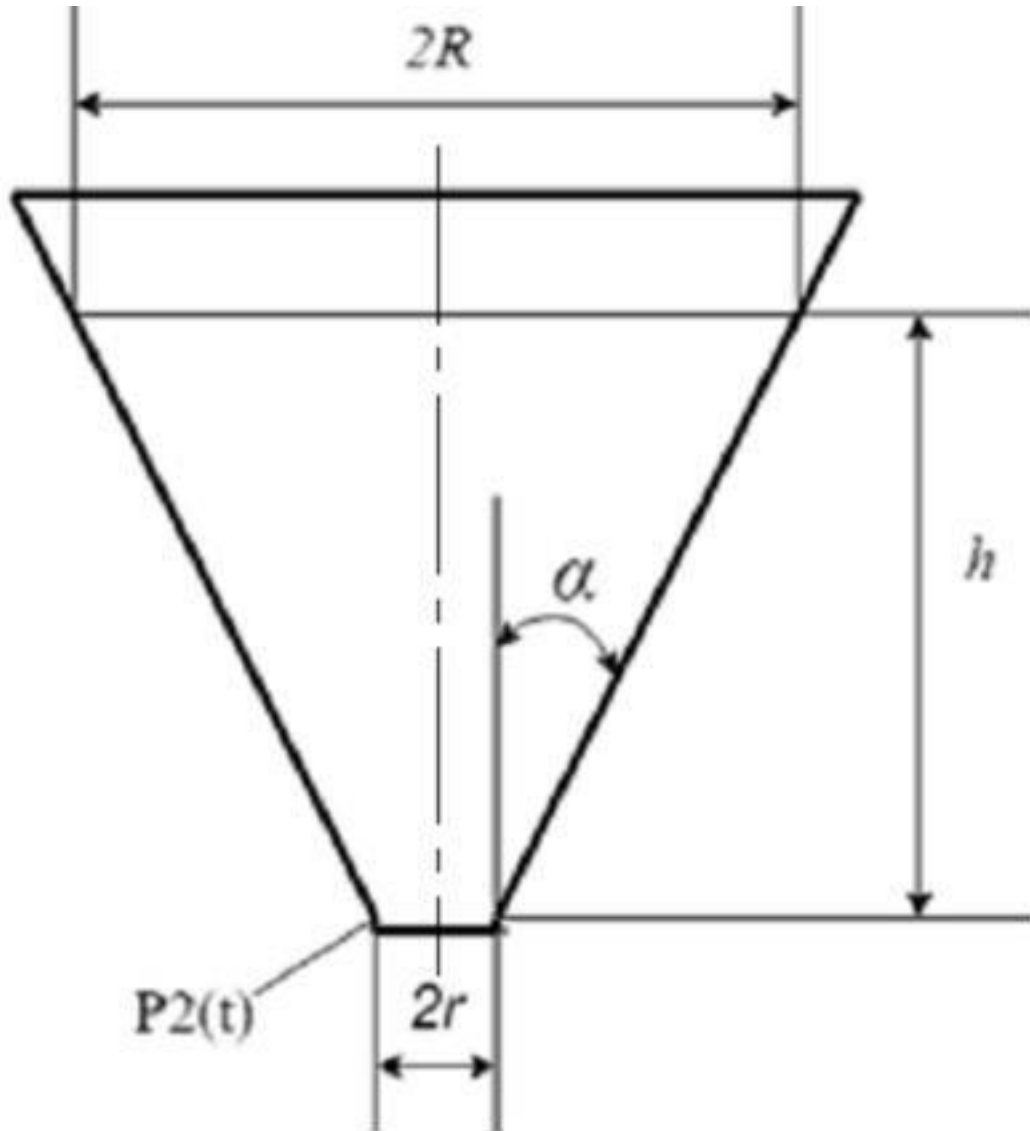


Рисунок 2.2 - Бункер з конусною нижньою частиною[15]

Його розв'язанням є експоненціальна залежність, розв'язок якої наведено в графічному вигляді на рисунку 2.3

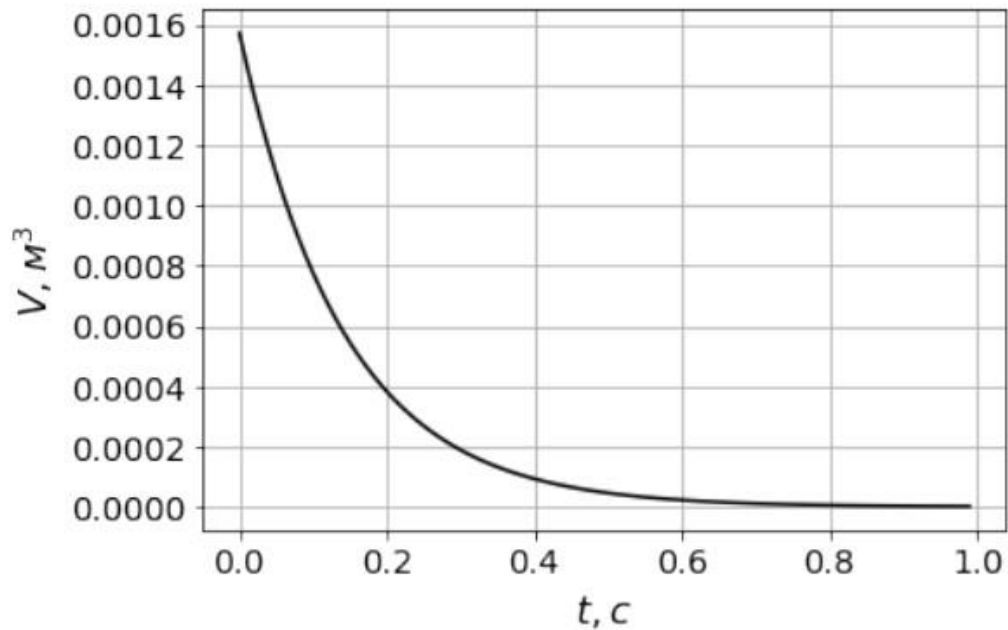


Рисунок 2.3 - Зміна об'єму матеріалу в бункері циліндричної форми[15]

При складанні рівняння для конусної частини, необхідно враховувати, що він має змінний по довжині поперечний перетин. Запишемо формулу знаходження об'єму усіченого конуса.

$$V(t) = \frac{1}{3} \pi h (r^2 + rR(t) + R(t)^2)$$

де  $R = tg\alpha h + r$

Отже диференціальне рівняння має наступний вигляд

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \rho g h(t)$$

де  $h(t)$  - визначається як розв'язок наступного рівняння

$$\pi tg^2 ah^3 + 3\pi tg\alpha r h^2 + 3\pi r^2 h - 3V = 0$$

Характер витрати матеріалу у конусній частині є близьким до лінійного (рисунок 2.4).

Також відома [18] формула, що дозволяє визначити швидкість у випадку нормального витікання:

$$v = \lambda \sqrt{3.2gR},$$

де  $R$  – гідравлічний радіус отвору, м



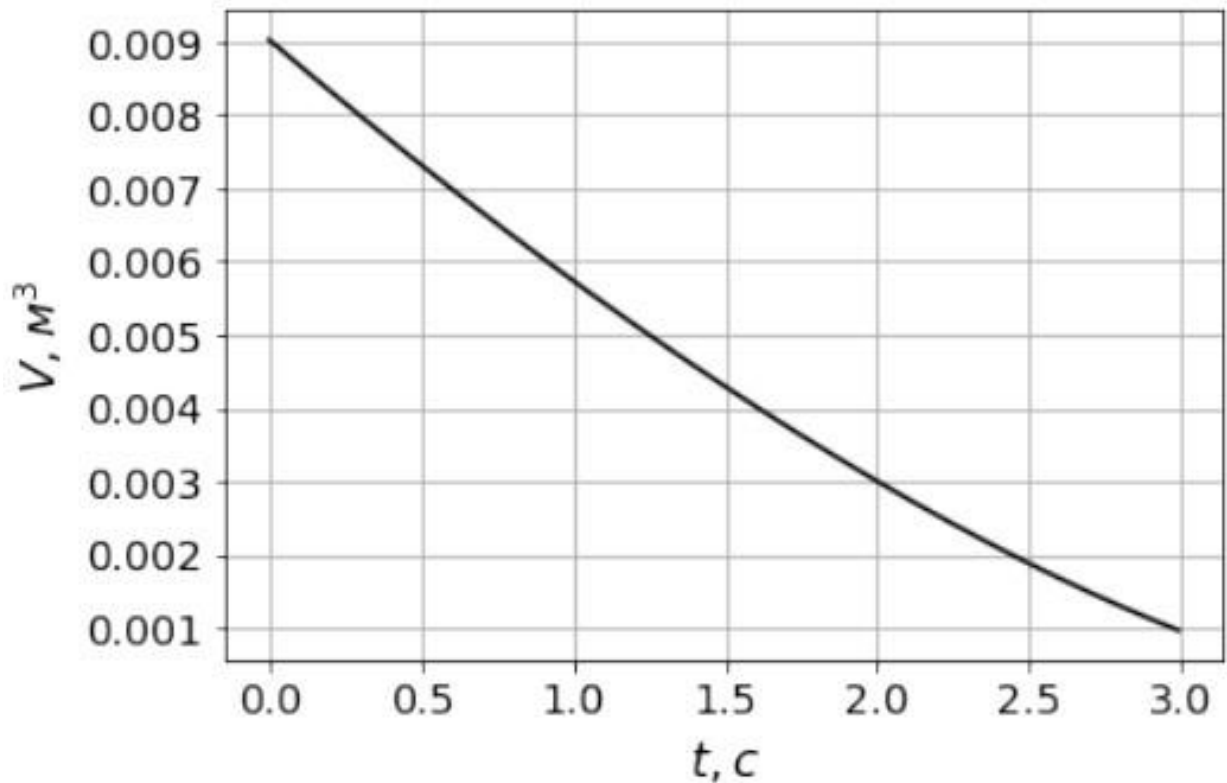


Рис.2.4 - Зміна об'єму матеріалу в бункері конічної форми[15]

Коефіцієнт  $\lambda$  слугує для врахування властивостей сипкого матеріалу. В свою чергу, коефіцієнт  $R$  – враховує величину діаметра отвору, та розмір фракцій матеріалу.

Коефіцієнт  $R$  для круглих отворів знаходиться за формулою:

$$R = \frac{D - a}{4}$$

де  $a$  – розмір частинки;

$D$  – діаметр отвору бункера.

Так як рівняння балансу матеріалу є постійним, для випадку нормальної течії отримаємо диференціальне рівняння у вигляді:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \pi R^2 v = \pi R^2 \lambda \sqrt{3.2gR}$$

Права частина рівняння складається лише зі сталих величин та не має залежності від часу. Отже, розв'язком рівняння є лінійна залежність

$$\int_0^t dV = \pi R^2 \lambda \sqrt{3.2gR} \int_0^t dt$$

$$V = \pi R^2 \lambda \sqrt{3.2gR} t$$

Відповідно, вираз для визначення часу витікання матеріалу з бункеру можна записати у наступному вигляді:

$$t_{max} = \frac{m}{\pi R^2 \lambda \sqrt{3.2gR} \rho}$$

де  $m$  – маса матеріалу в бункері;  $\rho$  – насипна щільність матеріалу.

Всі приведені розрахунки є емпіричними та мають узагальнюючий вигляд. Параметри сипкого матеріалу враховуються коефіцієнтами  $R$  і  $\lambda$ , які мають певну наближеність. На практиці швидкість плину матеріалу залежить від геометричних розмірів частинок, властивостей матеріалу, вологості, та великої кількості інших параметрів.

Будь який бункер завантажений будь яким видом сипкого матеріалу має спільний характер руху розвантаження. Це незв'язний рух на початку розвантаження та зв'язний після нього. Геометрія бункер і властивості матеріалу впливають лише на час протікання кожної з цих форм руху і можливість їх існування одночасно. Якщо бункер складається з двох частин, конусної та циліндричної то форма руху в них може бути різної. В конусній частині, при тупому внутрішньому куті нахилу стінки перевищуючому  $115^\circ 120^\circ$ , рух здебільшого набуває незв'язної форми руху, а при куті меншим за  $115^\circ$  переважає зв'язна форма. В циліндричній же частині переважає зв'язний рух, різницею є його рух по всьому поперечному перерізі чи лише в центральній його частині бункера.

### 3. АНАЛІЗ ЗМІНЕННЯ ПОТОКУ ПРИ РІЗНИХ КОНФІГУРАЦІЯХ БУНКЕРА

#### 3.1. Бункер квадратного перетину

Оскільки у попередньому розділі було виявлено утворення застійних зон та воронки, з'являється необхідність у визначенні конструкційних параметрів бункера, що основною мірою впливають на ці явища. Для цього змінюватимемо наступні параметри:

- Профіль бункера;
- Кут нахилу конусної частини;
- Розмір вихідного отвору.

Другим найпопулярнішим профілем бункера для сипких матеріалів є квадратний профіль. У випадках коли габарити бункера обмежені каркасом, конструкційними особливостями обладнання де він використовується або простором між сусіднім устаткуванням на підприємстві, при цьому зберігається необхідність у великій ємності бункера, використання квадратного профілю є більш раціональним.

Кут нахилу конусної частини впливає на силу тертя частинок сипкого матеріалу о його стінки. Тож збільшення його кута повинно зменшити застійні зони та пришвидшити розвантаження. Але зміна цього параметру значною мірою впливає на об'єм бункер при його незмінній висоті. А збереження об'єму збільшує загальну висоту бункера, що може стати проблемою у випадку його використання в закритих павільйонах, цехах.

Розмір вихідного отвору також сильно впливає на швидкість спустошення бункера навіть при збереженні кута нахилу конусної частини. Навіть якщо утворення воронки залишається, збільшення вихідного отвору тягне за собою збільшення діаметру і самої воронки. Нажаль збільшення розмірів отвору також має межі. Вони залежать від обладнання, що йде після бункера та його продуктивності.

В першу чергу дослідимо бункер квадратного профілю.

Для експерименту було обрано бункер з квадратним профілем основної частини та пірамідальною нижньою (рис 3.1). Площа перерізу бункера та вихідного отвору є такими ж як і у бункера з розділу 3. Властивості сипкого матеріалу збережені (рис 3.2). Для пришвидшення розрахунків було прийнято рішення виключити з моделювання опори та підлогу. Це збільшило швидкість розрахунки в три рази

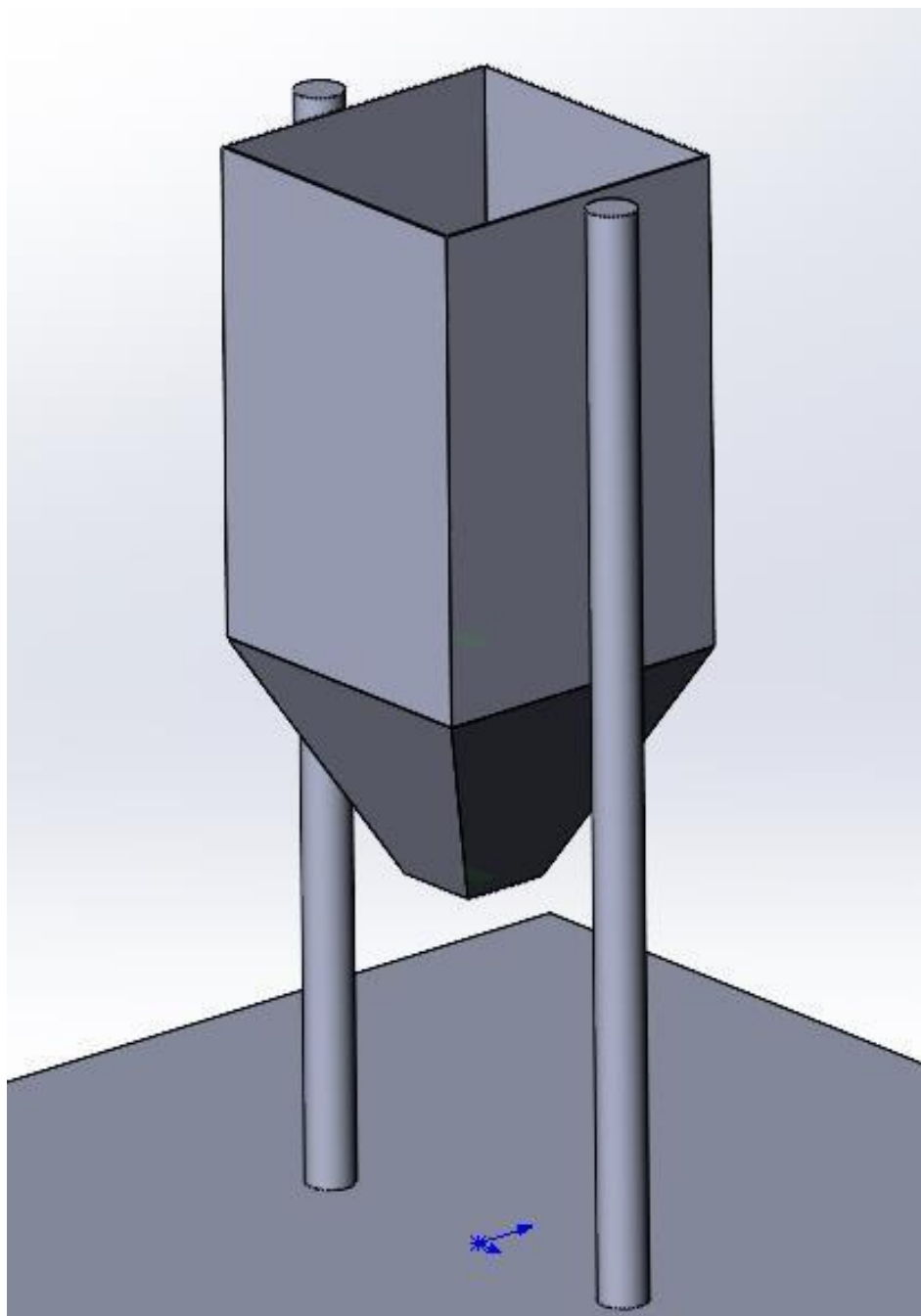
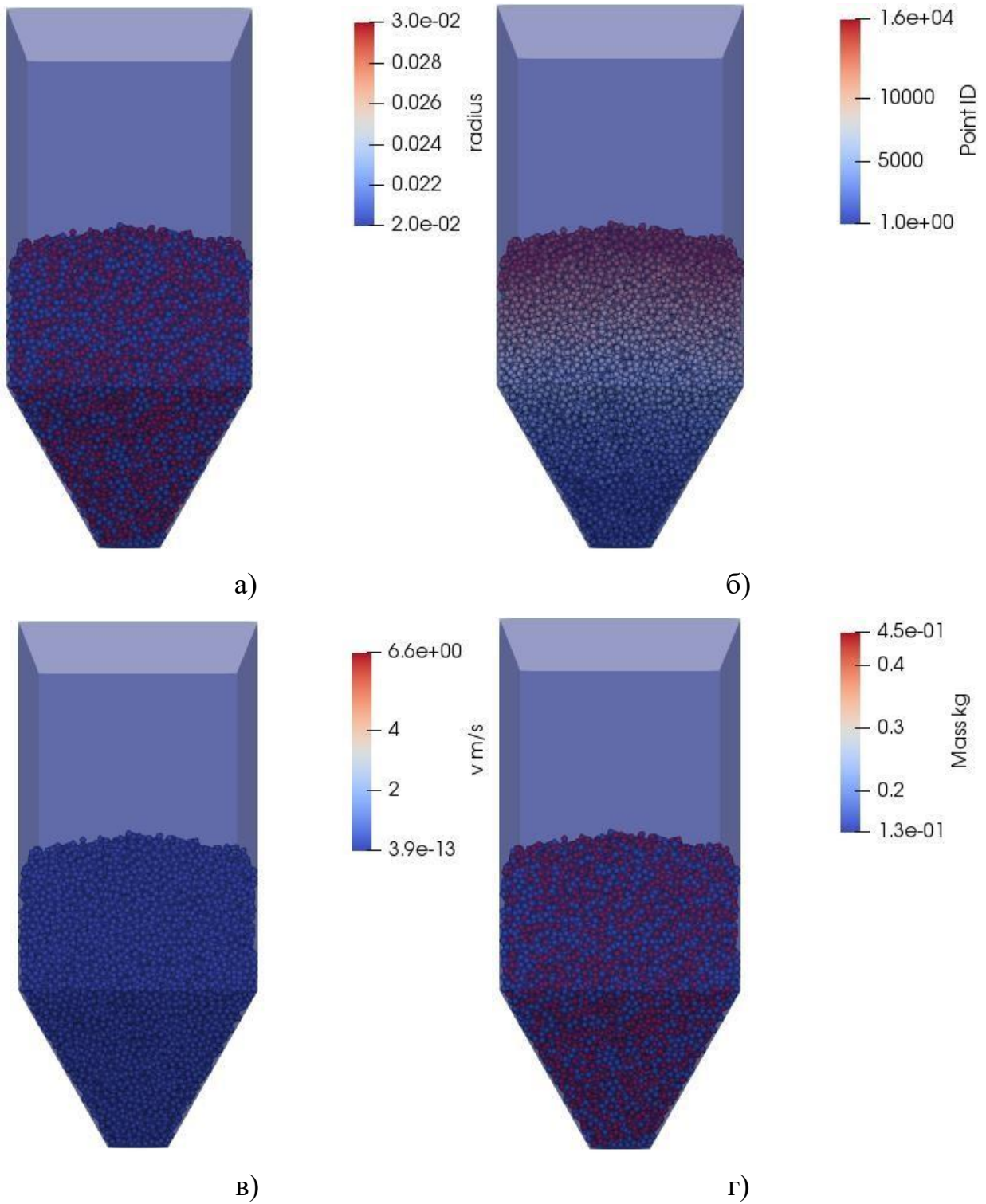


Рисунок 3.1 – Бункер квадратного профілю



*а – розмір частинок; б – шари заповнення; в – швидкість руху частинок;  
г – маса частинок.*

Рисунок 3.2 – Матеріал в бункері квадратного перерізу у стані спокою.

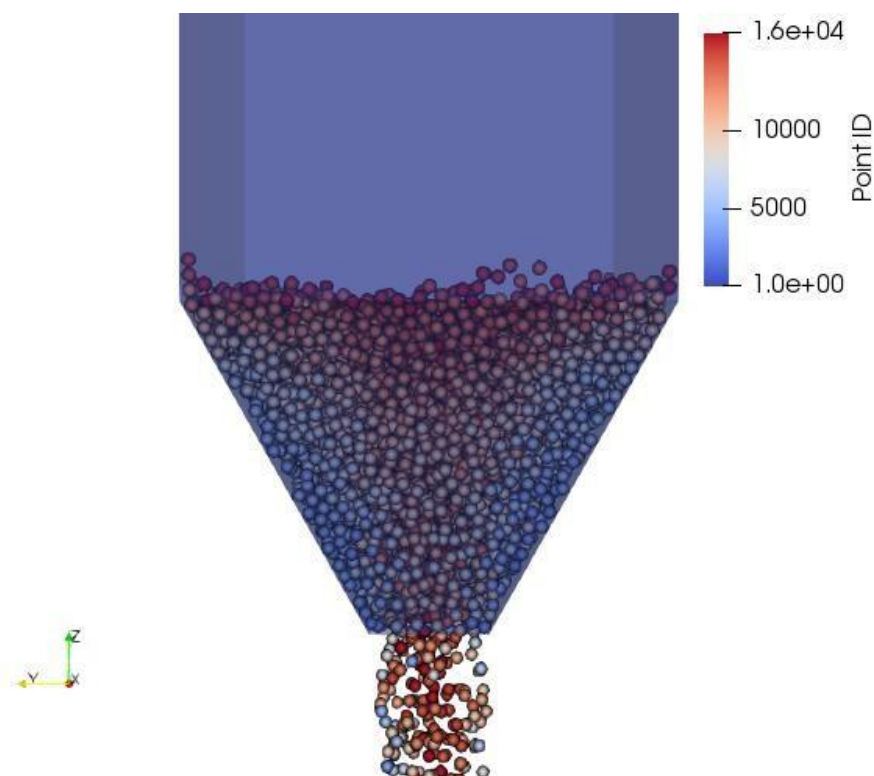


Рисунок 3.3 – Розвантаження бункера квадратного профілю з утворенням воронки.



Рисунок 3.4 – Графік руху застійних зон

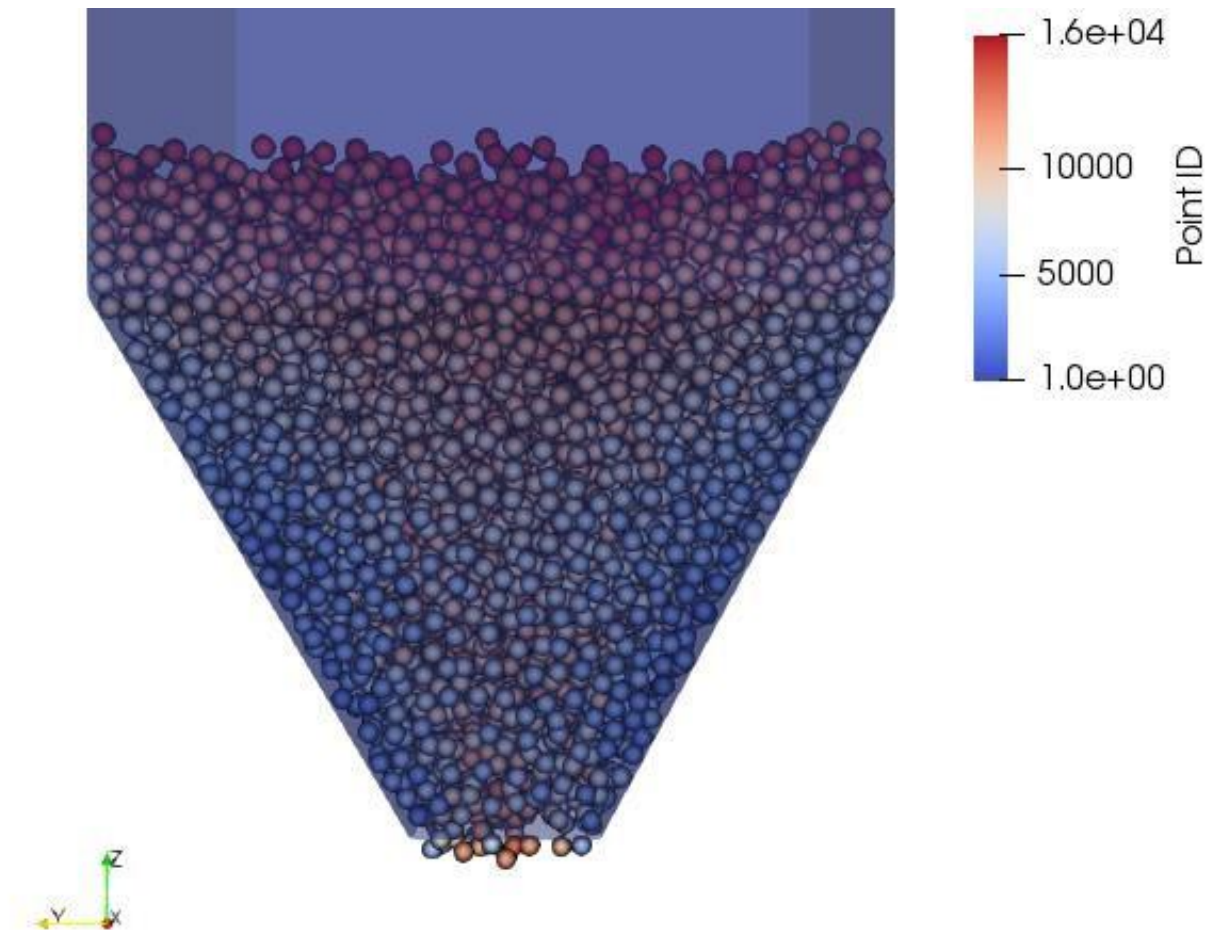


Рисунок 3.5 Моделювання зі зміненою зоною розрахунку

Як і у випадку з круглим бункером, розвантаження відбувається з утворенням воронки (рис 3.3). Але у цьому випадку воронка є більш вираженою, а застійні зони знаходяться вздовж граней пірамідальної частини і рухаються значно повільніше (рис 3.4). При однаковій кількості матеріалу, останні частинки залишають бункер на 18 кадрів пізніше або майже на 1 секунду, а загальний час спустошення сягає 21,85 секунди.

Виходячи з таких результатів робимо висновок, що бункер квадратного профілю не є альтернативою круглому по швидкості спустошення, але його використання є доцільним, якщо більш важливим параметром є об'єм бункера.

### 3.2. Вплив кута нахилу стінки конусної частини на швидкість розвантаження.

Кут нахилу стінки конусної частини бункера як правило обирається більшим за кут нахилу природнього відкосу сипкого матеріалу, що планується в ньому зберігати. Також на обраний розмір цього параметру може вплинути вологість, в'язкість чи схильність матеріалу до злежування.

Для визначення впливу кута нахилу, було взято бункер з розділу 3. При моделюванні кут змінювався від  $125^\circ$  до  $105^\circ$  (рис. 3.6) Як видно з моделей, кут нахилу також сильно впливає на загальний об'єм бункера.

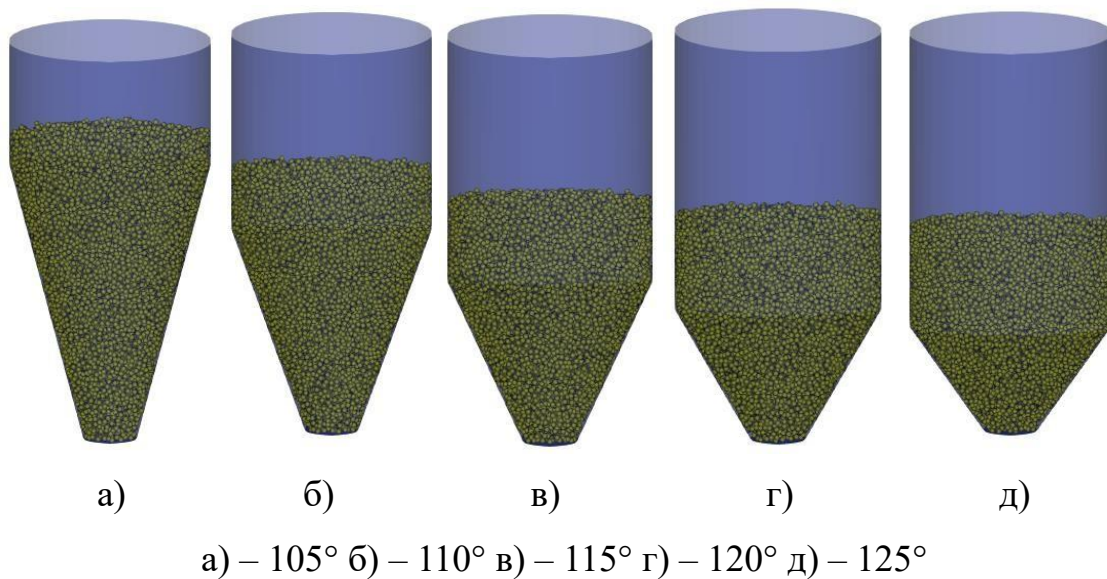


Рисунок 3.6 – Прийняті кути нахилу стінки конусної частини для розрахунку.

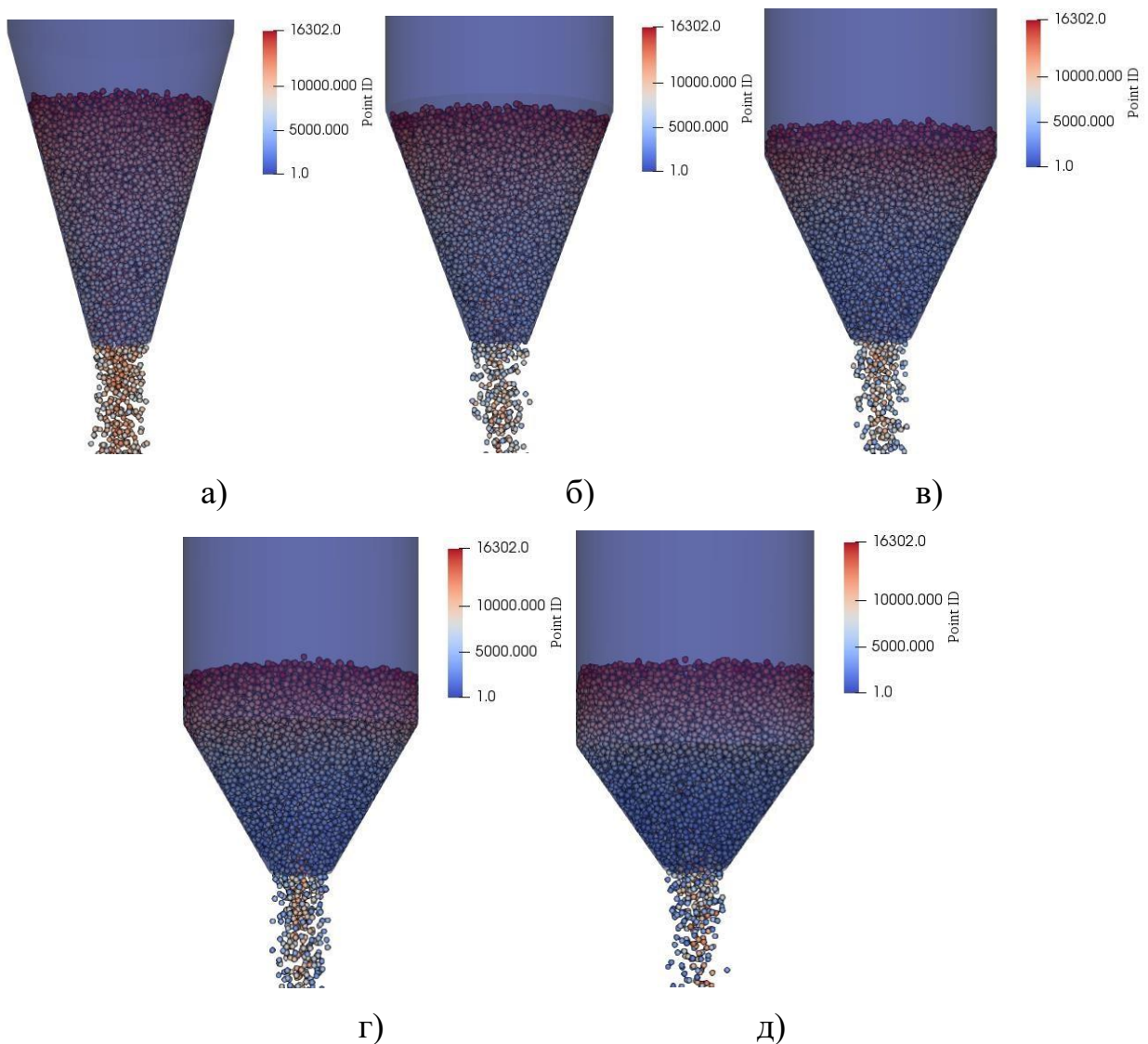
В результаті ми отримуємо залежність часу спустошення бункера.

При порівнянні бункерів різних конфігурацій (рис 3.7), помітно, що на один і той же момент часу, з початку спустошення, на виході помітні частинки одного кольору. Але зі збільшення кута нахилу конуса, помітна перевага синіх кольорів у самому бункері. Це є візуальним підтвердженням утворення застійних зон та воронки.

Таблиця 3.1 – Зміна швидкості спустошення при різних кутах нахилу конуса.



Кут нахилу конусної частини	Кадр на момент повного розвантаження	Загальна кількість кадрів на спустошення	Час у секундах
105°	408	282	14,1
110°	462	336	16,8
115°	504	378	18,9
120°	544	418	20,9
125°	578	452	22,6



а) – 105° б) – 110° в) – 115° г) – 120° д) – 125°

Рисунок 3.7 – Порівняння різних бункерів на один момент часу

Побудуємо графік руху застійних зон.

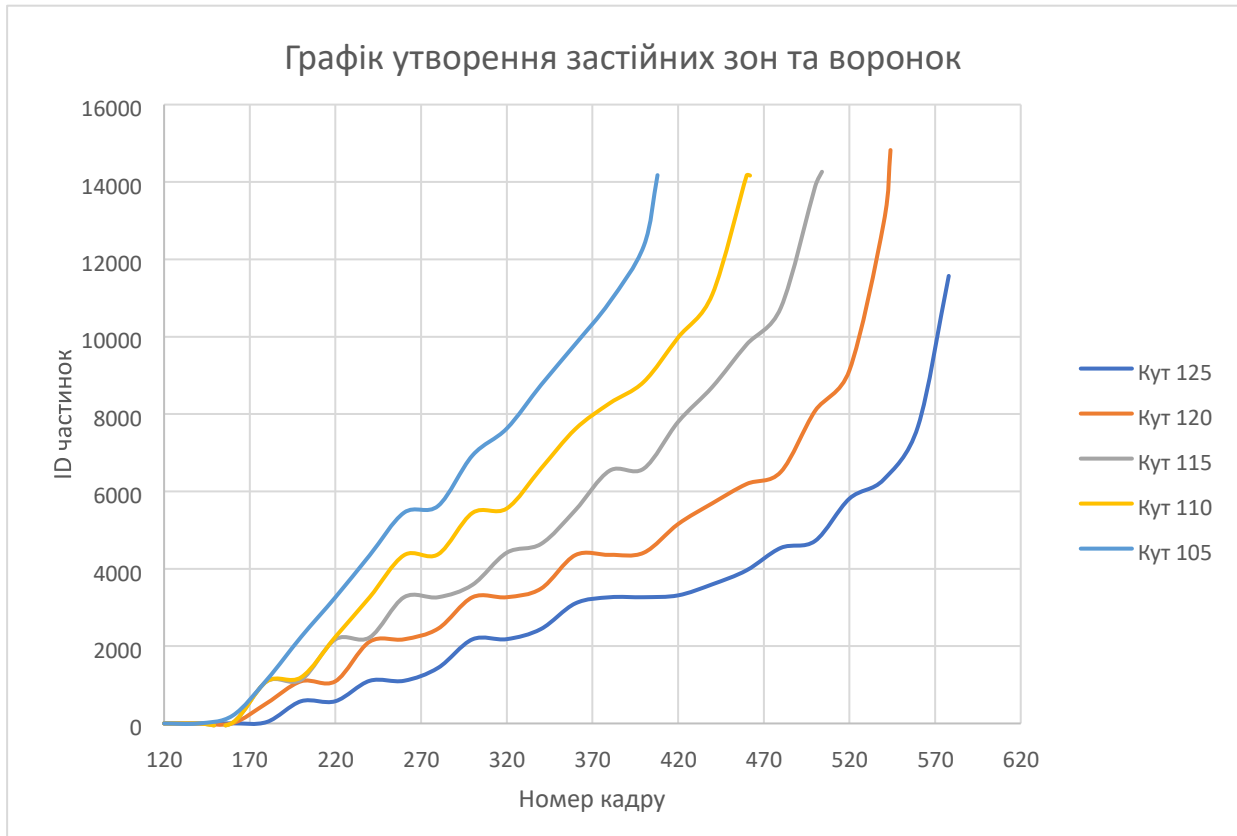


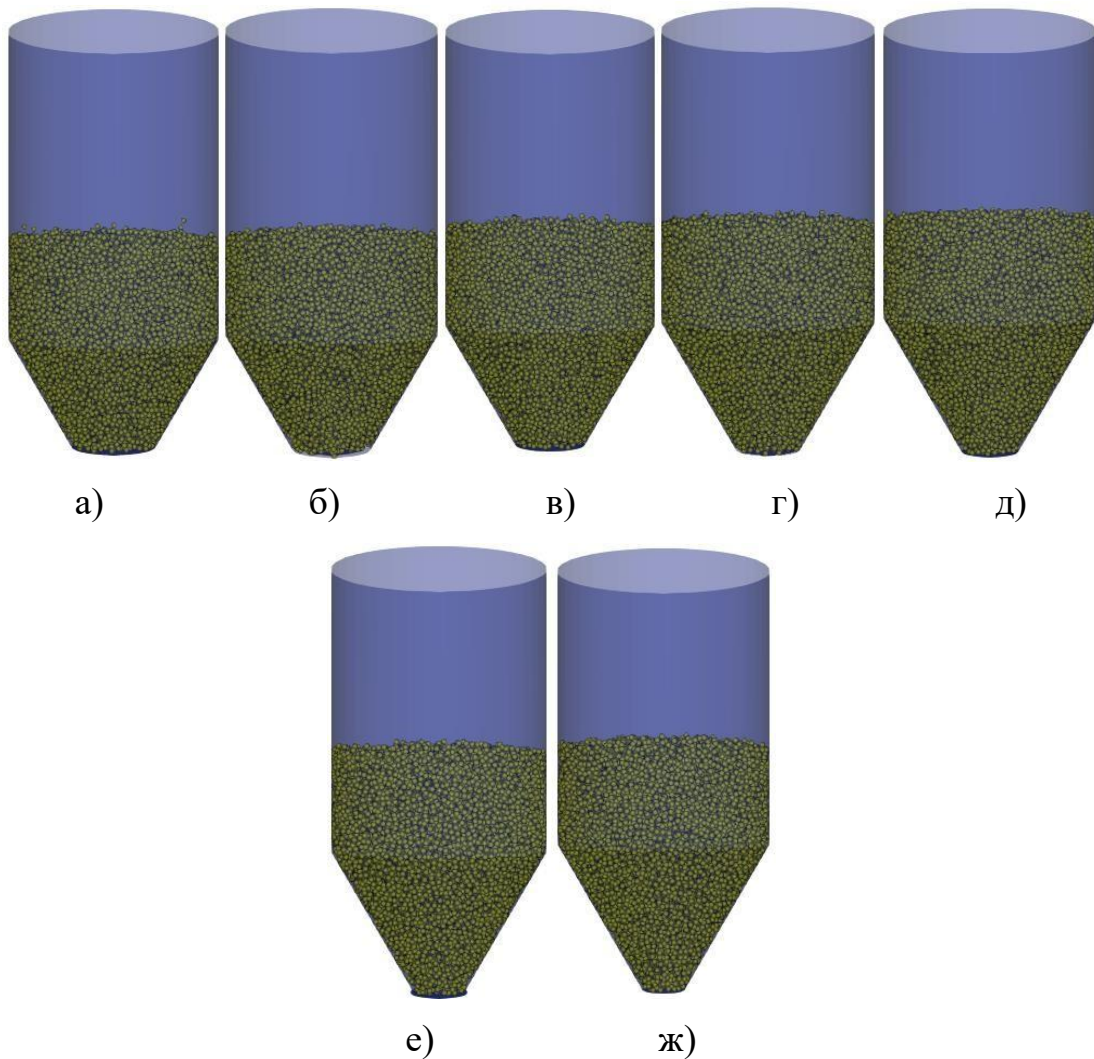
Рисунок 3.8 – Графік утворення застійних зон та воронки

На графіках добре видно, що зі збільшенням кута збільшується і час спустошення бункера. Також прослідковується тенденція нерівномірного зростання найменшого ID частинки. Це пов'язано з тим, що при великих кутах нахилу, значно збільшуються застійні зони і розміри воронки, і частинки з нижніх шарів залишаються у бункері довше.

У висновку ми бачимо залежність кута нахилу конуса з утворенням воронки та часом спустошення бункера, і чим більше воронка утворюється, тим більше необхідно часу на розвантаження.

### 3.3. Вплив розміру вихідного отвору на швидкість розвантаження.

Розмір вихідного отвору більш за все впливає на швидкість плину матеріалу з бункера. Його мінімальний діаметр обирається в залежності від максимального розміру фракцій сипкого матеріалу, що буде зберігатись у бункері.



Діаметр отвору: а) – 600мм; б) – 550мм; в) – 500мм; г) – 450мм; д) – 400мм;  
 е) – 350мм; ж) – 300мм.

Рисунок 3.9 – Прийняті розміри отворів для розрахунку.

А максимальний – залежить від технологічної лінії, де буде використовуватись цей бункер.

Для визначення впливу діаметра отвору, було взято бункер з розділу 3. При моделюванні діаметр змінювався від 600 мм до 300мм (рис. 3.9).

Таблиця 3.2 - Зміна швидкості спустошення при різних розмірах вихідного отвору.

Діаметр отвору	Кадр на момент повного розвантаження	Загальна кількість кадрів на спустошення	Час у секундах	Площа вихідного отвору
600	259	133	6,65	1,1309734
550	290	164	8,2	0,9503318
500	343	217	10,85	0,7853982
450	420	294	14,7	0,6361725
400	536	410	20,5	0,5026548
350	752	626	31,3	0,3848451
300				0,2827433

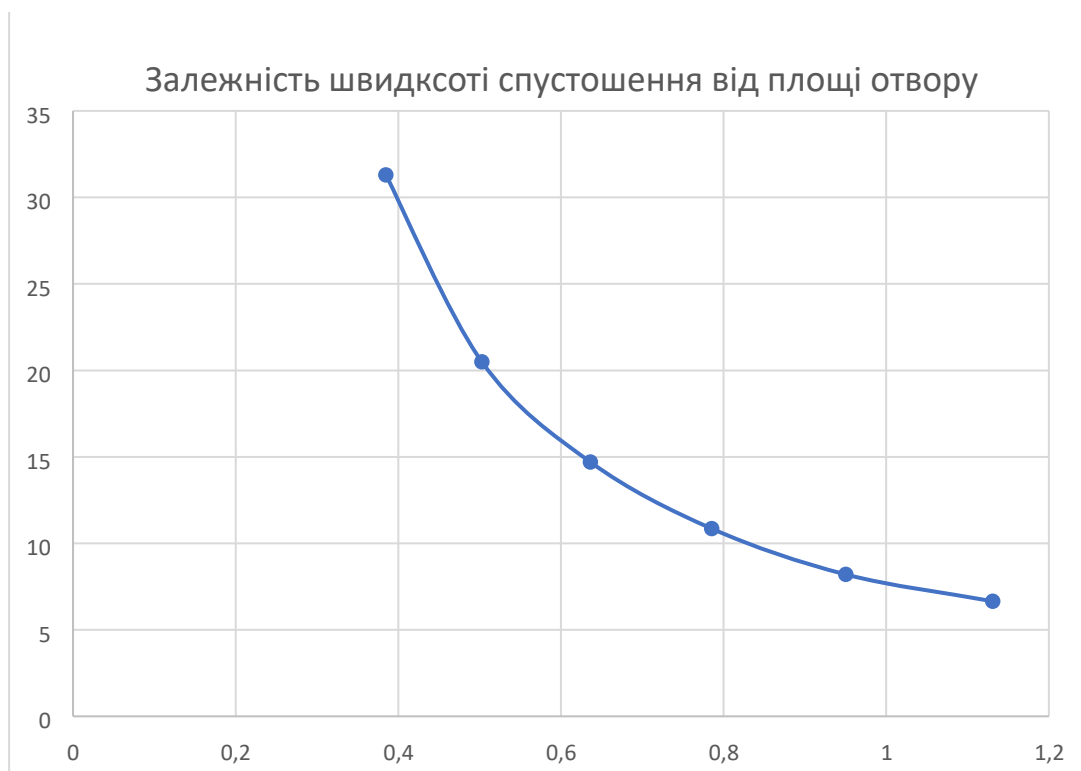


Рисунок 3.10 – Графік залежності швидкості спустошення бункера від площі отвору.

Як видно на графіку (рис. 3.10), залежність часу розвантаження від площі отвору не є лінійною. Фактично при збільшенні отвору до максимальних значень

(рівним діаметру всього бункера) швидкість спустошення буде ставати сталою і подальше збільшення діаметру не пришвидшуватиме цей процес, а графік буде йти горизонтально. Окрім того, при зменшенні отвору до 300мм в діаметрі, утворилося склепіння і отримати результати не вдалося (табл. 3.2).

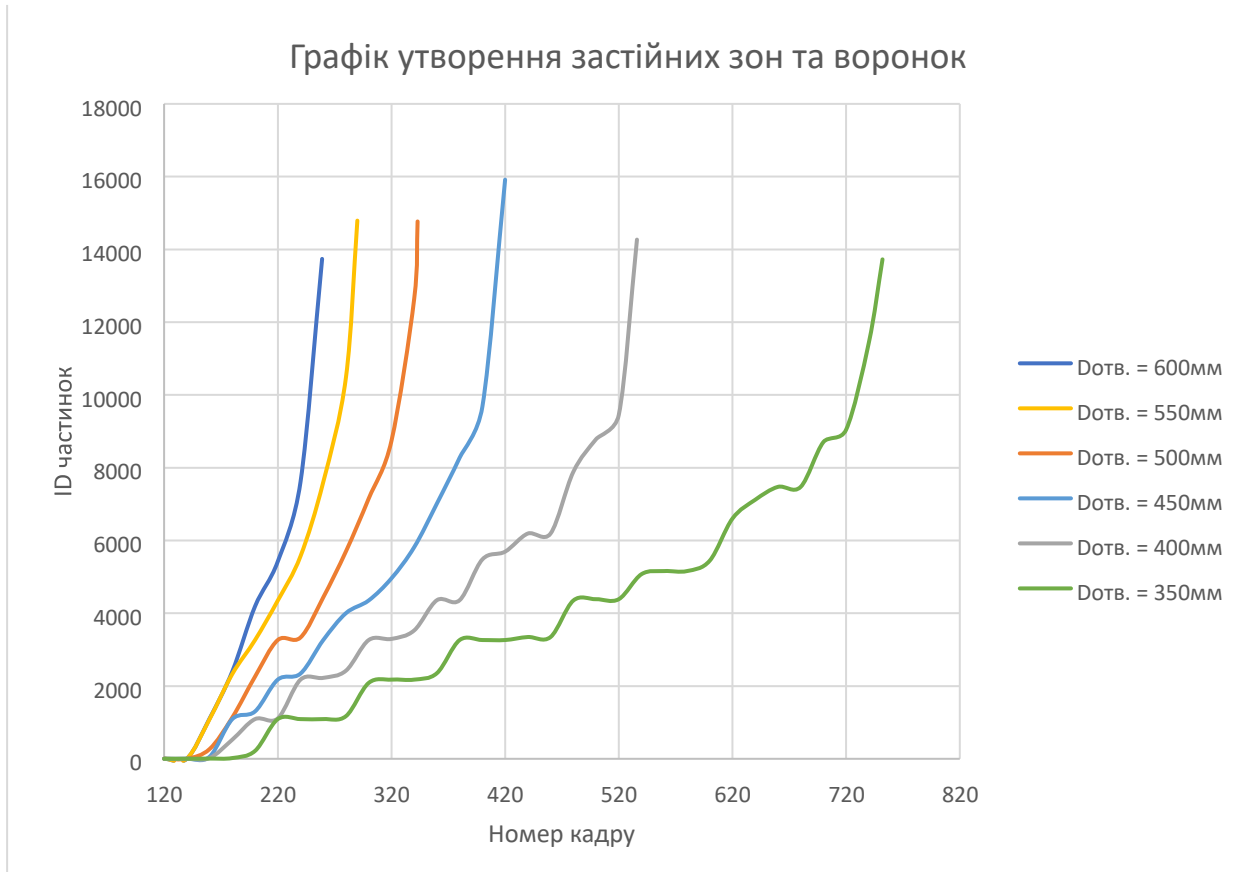


Рисунок 3.11 – Графік утворення застійних зон та воронкок

Графік на рисунку 3.11 показує утворення застійних зон при різних діаметрах отвору та час застоювання шарів матеріалу в них. Цей графік додатково до рисунку 3.10 вказує на нелінійну залежність характеру розвантаження зі зміною діаметра бункера. При зменшенні діаметра та наближенні до критичного розміру (розміру при якому значно підвищується вірогідність виникнення склепінь.) застійні зони збільшуються у розмірі і матеріалу у них рухається з певною пульсацією.

У висновку можна зазначити значну залежність руху сипкого матеріалу від конструкційних параметрів бункера. Так зменшення кута нахилу конусної

частини зі  $120$  до  $105^\circ$  пришвидшило спустошення бункера з  $20,9$  до  $14,1$  секунди.

Основою такого результату стало зменшення сили тертя, що вповільнював просування частинок біля стінок. Це змінило форму руху з незв'язної на зв'язну. Хоча і в цьому випадку прослідковувались невеликі пульсації. Застійні зони та воронка не утворювались.

Недоліком такої зміни конструкції є підвищення рівня сипкого матеріалу в бункері та зменшення загального об'єму бункера.

Зміна розмірів вихідного отвору також значно вплинули на плин матеріалу. Так при збільшенні діаметру вихідного отвору з  $400$  до  $600$  мм, площа отвору зросла на  $126\%$ , а швидкість розвантаження бункера на  $208\%$ . Проте такі збільшення можуть бути не можливими в залежності від технологічної лінії.

Зменшення ж отвору навпаки, призвели до утворення склепін та унеможливлення подальшого спустошення бункера.

Квадратний бункер показав схожі з круглим бункером результати по швидкості розвантаження. Але на графіку руху застійних зон видно значне їх сповільнення, що призвело до утворення більшої воронки.

## 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

### 4.1. Характеристика ступеня безпеки обраних технологічних процесів, рівня їхньої механізації та автоматизації.

Шихта для коксування подається в печі у розвантажувальному вагоні. Під час завантаження печі шихта розрівнюється за допомогою планіра, встановленого на коксовиштовхувач. Після закінчення завантаження планір видаляють із печі, закривають і ущільнюють кришки завантажувальних люків і повертають завантажувальний вагон під вугільну вежу, де його знову заповнюють шихтою для наступної печі.

Коли завантажена в піч шихта в результаті нагрівання без доступу повітря перетворюється на кокс, - за допомогою коксовиштовхувача і дверей знімної машини знімають з печі двері, встановлюють штангу, що виштовхує, і напрямний пристрій виштовхує коксовий «пиріг» з печі. Після видачі коксу двері з обох боків закривають, ущільнюють та завантажують пекти новою порцією шихти.

Виданий з печі кокс відвозиться в тушильному вагоні не під тушильну вежу, де зрошується водою. Потім кокс вивантажується на рампу і транспортером прямує на коксортування.

Газ, що утворюється під час коксування, виходить через стояки у газозбірник, а звідти відсмоктується газодувками у хімічні цехи.

Коксові печі обігріваються коксовим, доменним чи генераторним газом, які у суміші з повітрям згоряють в обігрівальних каналах. Продукти горіння через димар видаляються в атмосферу.

На дверознімній машині працює дві людини: машиніст і дверний.

У машиніста механізована праця, а дверна професія ручної праці.

Розрахунок рівня механізації праці робітників цеху провадиться за формулою:

$$B = M/M+K*100\%$$

де B – рівень механізації праці %,

M – сума осіб – годин механізованої праці,

К – сума людина – годин ручної праці,

Результати розрахунку зведені у таблиці 4.1

Таблиця 4.1 - до розрахунку рівня механізації праці.

№ п/п	Професія робітників	Штат робітників	Кіль - у відпрацьованих Людей. Годин на добу			% механізованої праці
			вручну	за допомогою машин	всього	
1	Машиніст дверей	2	2	5	7	30
2	Дверевий	2	7	7	7	100

#### 4.2. Аналіз потенційних небезпечних та шкідливих факторів виробничого середовища

Машиніст і дверцята в процесі своєї роботи піддаються таким шкідливим факторам як:

Пил коксовий кам'яновугільний, аміак, фенол, бензол, вуглець оксид

№ п/п	Фактори виробничого середовища та трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	Тривалість дії фактору за зміну %
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м <sup>3</sup>			
	Аміак	20	3,5	85
	Пил к/к. вугільна	6	6	85
	Фенол	0,3	0,31	85
	Бензол	15	2,8	85
2	Вуглецю оксид	20	12	85
	Мікроклімат у машині			
	Температура повітря, °	26	30	85
3	Відносна вологість повітря, %	60	48	
	Атмосферний тиск	0,1	0,1	
4	Температура зовнішнього повітря			
	Влітку	+27		
	Взимку	-10		



### 4.3. Санітарно-гігієнічні умови праці

Працюючі на коксових печах піддаються впливу високої температури, теплового випромінювання, шкідливих газів і парів, а також вугільного та коксового пилу.

Висока температура на робочих місцях є наслідком виділення великої кількості тепла гарячими поверхнями печей.

На верху печей джерелами виділення тепла є : цегляна кладка, кришки та рами завантажувальних люків, стояки та газозбірники . Середня температура повітря на робочому місці люкового при температурі зовнішнього повітря  $+17...+24^{\circ}$  та швидкості руху повітря 3 м/с сягає  $+56...+61^{\circ}$ , а при температурі  $-2...-5^{\circ}$  і швидкості 2 м/с  $+24...+31^{\circ}$ .

На бічних обслуговуючих майданчиках джерелами виділення тепла є анкерні колони та двері коксових камер. Середня температура повітря на робочому місці дверного при температурі зовнішнього повітря  $+18...+27^{\circ}$  і швидкості руху повітря 2 м/с сягає  $+34...+38^{\circ}$ , а при температурі  $+1...+5^{\circ}$  і швидкості 3 м/с  $+23...+26^{\circ}$ .

У тунелях джерелами виділення тепла є дзеркала регенераторів та газоповітряна арматура. Середня температура повітря на робочому місці тунельника при температурі зовнішнього повітря  $+18...+22^{\circ}$  і швидкості руху повітря 2 м/с досягає  $+46...+49^{\circ}$ .

Джерелами теплового випромінювання є: займистий газ, що виходить із стояка і з камери печі під час завантаження її шихтою; відкрита камера печі та розпечений кокс (під час видачі його з печі та транспортування у тушильному вагоні під вежу).

За даними вимірювань, що проводилися за допомогою актинометра при температурі зовнішнього повітря  $+ 25^{\circ}$  на відстані 1—2 м від джерела випромінювання, на напругу випромінювання досягає: при займанні газу під час завантаження печі —  $14 \text{ кал/см}^2 \text{ хв}$ ; при відкритих камерах під час збирання

«кінців» та торкретування головок-13 кал/см<sup>2</sup> хв; при проходженні тушильного вагона з розпеченим коксом - 12 кал/см<sup>2</sup> хв.

Вплив високої температури і теплового випромінювання піддаються:

- 1) люкові - при завантаженні камер печей шихтою та обробці люка;
- 2) робітники, що обслуговують газозбірник, - при обробці горловини та кришки стояка;
- 3) температурники — при вимірі температури у вертикалах та підведеному
- 4) просторі камер;
- 5) муляри--при очищенні косих ходів і пальників у вертикалах, а також при
- 6) заміні пальників;
- 7) дверні - при очищенні рам і дверей від графіту та смоли, при закиданні
- 8) «кінців» у камеру печі та очищення порогів камери після видачі коксу;
- 9) слюсарі за ущільненням – під час ущільнення дверей камер печей;
- 10) торкретувальники - під час торкретування головок камер печей після
- 11) видачі коксу.

Висока температура та; теплове випромінювання створюють тяжкі умови роботи, призводять до зниження продуктивності праці, підвищення стомлюваності, викликають посилене потовиділення, порушення водно-сольового обміну, підвищення температури тіла і можуть стати причиною різних захворювань.

Шкідливий вплив на організм робітника надає також забруднення повітря газами, парами і коксовим пилом. Джерелами забруднення повітря можуть бути:

- на верху печі — місця з'єднання стояків з камерами печей, місця з'єднання стояків з клапанними коробками та клапанних коробок з газозбірником, завантажувальні люки, отвори в газозбірниках для згонки фусів;
- на обслуговуючих майданчиках — двері коксових камер при недостатньому приляганні їх до армуючих рам, планірні лючки та дзеркала головок над рамами;

- на рампі - недостатньо згашений кокс і кокс, гасіння якого вироблялося фенольною водою зі значним вмістом аміаку, фенолів і олій.
- У тунелях і кантувальних приміщеннях коксових печей джерелами забруднення повітря можуть бути нещільності в газопроводах і в газовій арматурі, а також у гумових трубках, що з'єднують газопровід з контрольно-вимірювальними приладами.

Концентрація окису вуглецю в повітрі на робочому місці тунельника влітку при температурі зовнішнього повітря  $+8...+22^{\circ}$  і швидкості руху повітря 2 м/с становить 0,009-0,027 мг/л, а взимку при температурі  $-5...-8^{\circ}$  і швидкості 1 м/с 0,2 - 0,035 мг/л.

У коксортувальних приміщеннях з недостатньо відпареного на рампі коксу виділяються пари аміаку, сірчистого газу і фенолів, а також водяна пара (вологість повітря нерідко досягає 70%), які мають шкідливий вплив на працюючих.

При поділі коксу на класи та транспортуванні його виділяється коксовий пил. Якщо в приміщенні коксортування немає вентиляції або вона недостатньо ефективна, концентрація коксового пилу в повітрі може бути дуже великою. Так, у приміщенні, де встановлені валкові гуркоти, вона досягає  $200 \text{ мг/м}^3$ .

Заходи боротьби з впливом високої температури і теплового випромінювання на робочих коксових цехів можна розбити на три групи:

- а) технічні,
- б) санітарні,
- в) індивідуального захисту.

Технічні заходи пов'язані з механізмом трудомістких процесів, поліпшенням ізоляції нагрітих поверхонь і місцевим відведенням надлишкового тепла.

Вплив температури нагрітих поверхонь на людину може бути знижений шляхом встановлення перешкод (екранів) між джерелом випромінювання та робочим місцем. Цей метод використовується зменшення тепло віддачі від стояків коксових печей, якими гарячий газ із камер печей надходить у газозбірник.

Температура поверхні стояка дорівнює  $165^{\circ}$ , а на зовнішній поверхні екрана - лише  $75^{\circ}$ .

Щит-екран складається з двох листів заліза, між якими прокладено шар азбестового картону.

Для нормальної циркуляції повітря між стояком і екраном має бути відстань у 150—200 мм.

Для захисту робітників від теплового випромінювання при торкретуванні камер печей необхідно застосовувати переносні екрани, які навішуються на анкерні колони відкритої камери печі.

Необхідно систематично слідкувати за станом футерування на внутрішній частині дверей коксових камер. Не можна встановлювати двері навіть за часткової відсутності футерувальної цегли.

Проблема механізації трудомістких робіт у коксових цехах повністю ще не вирішена.

До санітарних заходів належить установка повітряних душів для місцевої припливної вентиляції та водяних напівдушів.

Потік повітря, створюваний повітряними душами, має заздалегідь задані параметри (температуру, швидкість, котрий іноді вологість).

Це дає можливість створити сприятливе для роботи повітряне середовище для регулювання струменя повітря. Стаціонарні повітряні душі встановлюють на коксовиштовхувачах для подачі свіжого повітря на робоче місце дверного. На верху коксових печей і на міжбатарейних обслуговуючих майданчиках повинні бути встановлені кабінки для відпочинку робітників, захищені від потрапляння в них пилу та газу. Свіже повітря потрапляє в кабінку вентиляційною трубою.

Широко застосовуються в коксових цехах пересувні повітряні душі різних конструкцій. Вони встановлюються на верху печей, на обслуговуючих майданчиках і в тунелях. Необхідно широко застосовувати повітряні душі при торкретуванні кладки камер, гарячих ремонтах печей, а також при роботах у тунелях, пов'язаних із заміною насадки регенераторів.

У коксових цехах крім повітряних душів повинні бути і водяні напівдуші для обмивання робітників до поясу. При високій температурі повітряного повітря, щоб запобігати перегріванню організму, необхідно робити коротко - тимчасові перерви в роботі для люкових або організувати для них підзміни.

До заходів щодо індивідуального захисту відносяться: медико-профілактичний відбір та регулярні медичні огляди робочих коксових цехів; застосування захисного спецодягу та спецвзуття, а також організація раціонального питного режиму. Кожен трудящий, який надходить до коксового або хімічного цеху, піддається медико-профілактичному огляду лікарями всіх спеціальностей для того, щоб з'ясувати, чи не протипоказана йому робота в цеху. З цією ж метою робітники коксових та хімічних цехів не рідше одного разу на рік проходять медичне освіту

Захисним спецодягом дерев'яних і робітників, що обслуговують верх печей, є брезентові костюми і рукавиці, черевики на дерев'яній підшві (для люкових) та повстяні капелюхи.

Каменярі, зайняті на гарячому ремонті печей та торкретуванні кладки камер, повинні працювати в костюмі, шоломі та рукавицях з азбестового полотна, а також носити захисні окуляри з теплостійким склом.

Працівників газового господарства, в обов'язки яких входить огляд камер печей, корнюрів і визначення температури обігрівальних простінків, потрібно забезпечувати окулярами з кольоровим склом для захисту очей.

У коксових цехах дуже важливо встановити правильний питний режим.

Для відновлення водно-сольового балансу, який порушується внаслідок втрати організмом води (у вигляді поту) і солі, робітники коксових печей повинні забезпечуватися підсоленою газованою водою з розрахунку 4—5 л на людину за зміну. Вода має містити 0,5% кухонної солі. Проте газована підсолена вода, як тепер встановлено, не за всіх умов і не повністю запобігає наслідкам впливу високої температури та променистого тепла на організм людини. У зв'язку з цим проводяться подальші дослідження, спрямовані на покращення питного режиму у гарячих цехах.

#### 4.3.1. Освітлення.

Обслуговуючі, кінцеві та проміжні майданчики потрібно висвітлювати світильниками, відстань між якими має бути не більше 5 м. Світильники для освітлення кінцевих і проміжних майданчиків слід укладати в скляні ковпаки, оскільки вони піддаються дії пара та високою температурою.

Висвітлення обслуговуючих майданчиків і шляхів тушильного вагона з коксової сторони повинно здійснюватися світильниками, встановленими на колонках, розташованих уздовж фронту коксових батарей і на перекритті рамп. Хороша освітленість обслуговуючих майданчиків, розташованих за межами рампи, досягається шляхом встановлення прожекторів на перекритті похилих мостів галерей.

Як правило, на всіх коксових машинах з обох сторін повинні встановлюватися прожектори для освітлення шляхів.

На дверних машинах також з обох боків встановлені прожектори з лампами розжарювання 500 Вт.

Освітленість на робочому місці машиніста та дверного становить 170 лк . Розряд зорової роботи 7.

#### 4.3.2. Заходи з техніки безпеки.

Забороняється уцілювати двері під час планування вугілля, оскільки при цьому тиск у печі підвищується, і полум'я може вибитися через нещільність між дверима та армуючою рамою.

Через направляючу раму дверей машини кокс з печі надходить у тушильний вагон. Електровоз з тушильним вагоном переміщується по коліях, прокладених уздовж фронту печей, в умовах поганої видимості через велику кількість пари.

Машиніст електровоза, приймаючи зміну, повинен ретельно оглянути сигнали, гальма, повітряну магістраль, струмоприймачі, зовнішнє та внутрішнє освітлення, перевірити наявність електрозахисних засобів (килимків та гумових рукавичок) та жетону на право керування електровозом.

Під час руху тушильного вагона по напрямку до вежі гасіння втрачається видимість, тому необхідно встановити на тушильному вагоні автоматично сигналізацію, щоб протягом усього шляху до вежі гасіння з електровоза подавалися безперервні звукові сигнали.

Під час руху тушильного вагона від вежі у бік рампи машиніст зобов'язаний, крім подачі сигналів, спостерігати шляхи. Ходіння по коліях тушильного вагона категорично забороняється.

Під час руху тушильного вагона з коксом можливі випадки мимовільного відкривання фартухів, внаслідок чого кокс просипається на майданчик біля колій. Тому ходіння з коксової сторони дозволяється не ближче, ніж за 4-5 м від колії тушильного вагона. Машиніст перед прийомом коксу повинен перевірити, чи надійно закриті фартухи і чи достатньо тиск стисненого повітря І того повітря.

Коли проводиться ремонт транспортерів однієї з рамп, згашений кокс з обох тушильних вагонів вивантажується на іншу (діючу) рампу.

Це пов'язане з небезпекою зіткнення електровозів. Тому переїзд тушильного вагона з одного блоку на інший має бути правильно організований начальником зміни, який зобов'язаний особисто керувати рухом обох вагонів гасіння.

При роботі двох електровозів на одній рампі швидкість їх руху повинна бути зменшена.

Місце виходу людей на шляху з приміщень, що розташовані під вугільною вежею, потрібно обладнати звуковою та світловою сигналізацією, які автоматично включаються під час переїзду коксів штовхача з одного блоку печей на інший.

Шляхи тушильного вагона необхідно періодично очищати від коксу, що прокидався. Як правило, очищення шляхів повинно проводитися тільки в період циклічних зупинок, коли кокс із печей не видається. Перед початком очищення колій машиніст ставить електровоз із гасильним вагоном у гараж, а ключ-реверс

(жетон на право управління) передає керівнику робіт з очищення колій, після чого з тролеїв знімається напруга.

Після закінчення робіт з очищення колій машиніст і майстер повинні переконатися у відсутності людей на путях, якими рухається тушільний вагон. Потім включається напруга і машиніст повертається жетон.

#### 4.4. Пожежна безпека.

Пожежна небезпека коксових цехів обумовлюється властивостями горючих газів (коковий газ, доменний газ), твердих речовин (кам'яновугільна шихта, кокс). При неправильному пристрої газорозподільних приладів можлива - загазованість території коксових цехів, а за наявності джерел запалювання - спалахи та швидке поширення вогню по території цеху.

Характерними джерелами запалювання є: відкрите полум'я газових форсунок; іскри під час проведення газозварювальних ремонтних робіт; кокс, нагрітий до температури вище за температуру самозаймання; розряди статичної та атмосферної електрики; іскри механічного походження (удари сталевих предметів тощо); іскри електричного походження (коротке замикання, великі перехідні опори тощо).

Основною умовою попередження пожеж, вибухів та отруєнь є герметизація всіх апаратів, газопроводів, газової арматури тощо. Виявлені нещільності повинні бути своєчасно, ліквідовані, причому підтягування болтів різної апаратури здійснюється інструментом, що не дає іскри при ударі по сталі, а карбування заклепувальних швів виробляють обмідненим інструментом.

У печах з нижнім підведенням газу в підбатарейному приміщенні, де розташовуються газопроводи та опалювальна арматура, щоб уникнути утворення вибухонебезпечних концентрацій передбачається провітрювання всього приміщення за рахунок раціонального підведення повітря на опалення печей.

На газопроводах батарей для їх відключення встановлюються за двигуни та передбачається можливість встановлення заглушок по ходу газу.



Для випуску в атмосферу надлишку очищеного коксового газу - встановлюється газоскидний пристрій, що автоматично вмикається при підвищенні надлишкового тиску в газопроводі. Газоскидні пристрої встановлюються на відстані не менше 30 м по горизонталі від сусідніх споруд. Якщо ця вимога не виконана, то гирло пристрою виводиться на висоту, що перевищує сусідню будівлю та обслуговуючі майданчики не менше ніж на 15 м. Висота газоскидного пристрою передбачається не нижче 30 м від рівня землі при розрахунковій кількості газу, що скидається до  $50000 \text{ м}^3 \cdot \text{год}^{-1}$  і не нижче 45 м при великих кількостях скидається газу.

Діаметри свічок на газозбірниках коксових батарей розраховуються на забезпечення необхідного тиску при повному припиненні відсмоктування та автоматичного відкривання при перевищенні зазначеного тиску. На всіх батареях висота газоскидних свічок передбачається не менше 4 м від майданчика обслуговування газозбірника .

Дверозйомні машини можна віднести до категорії пожежонебезпечності В - П I , так як на машині використовується гідравліка і є бак з маслом більше 60 літрів. То на машині має бути вогнегасник пінний або порошковий, а для гасіння електропроводки застосовують вуглекислотні вогнегасники.

На контрфорсах батареї передбачено пожежний щит та розведення пожежно -питної води, а також ящики з піском.

Розрахунок витяжної парасольки.

У процесі вилучення коксу з батареї спостерігається викид пилу, концентрація якого досягає  $50 \text{ мг/м}^3$  і тепла. При виборі типу укриття враховується:

- Вид технологічного обладнання чи процесу.
- Клас небезпеки шкідливостей, що виділяються.
- Енергія розповсюдження шкідливостей.

В даному випадку використовуємо місцевий відсмоктування відкритого типу у вигляді парасольки.

Для створення рівномірної швидкості повітря у всмоктувальному перерізі парасольки центральний кут розкриття приймається рівним  $60^\circ$ .

Це забезпечує відношення швидкості до осі парасольки до середньої швидкості 1,0 – 1,1.

Вихідні дані до розрахунку.

$Q_k$  – кількість тепловиділень від коксу ккал/год;

$h$  – висота установки парасольки, м;

$D_{\text{екв}}$  - еквівалентний (за площею) діаметр джерела, м ( $D_{\text{екв}} = 1,13 F_{\text{ц}}$ ),

де  $F_{\text{ц}}$  - площа поверхні теплоджерела,  $\text{м}^2$ .

Знаходимо тепловиділення від коксу, що остигає, Дж/с.

$$Q = P * C(t_{\text{нач}} - t_{\text{кон}})$$

де  $P$  – продуктивність коксової батареї кг/год, приймаємо  $P = 10000$  кг/год;

$C$  - теплоємність коксу, що остигає;  $C = 0,11$  Вт/кг\*к

$t_{\text{поч}}$  - початкова температура коксу,  $t_{\text{поч}} = 900^\circ\text{C} = 1173$  К.;

$t_{\text{кон}}$  - кінцева температура коксу;  $t_{\text{кін}} = 100^\circ\text{C} = 373$  К.;

$$Q = 10000 * 0,11(1173 - 373) = 880000 \text{ Вт/ч} = 210000 \text{ ккал/ч} = 210 \text{ ккал/ч}$$

Площа тепловиділяючої поверхні  $F_k = 10$   $\text{м}^2$  тоді:

$$D_{\text{екв}} = 1,13 * 8 = 9,04 \text{ м}$$

1. Визначаємо відносні розміри джерела  $D_{\text{екв}}$  та відсмоктування (парасольки)  $d_{\text{екв}}$

$$D_{\text{екв}} = \frac{D_{\text{екв}}}{h} \quad d_{\text{екв}} = \frac{d_{\text{екв}}}{h}$$

Враховуючи можливість підсмоктування за межами зони тепловиділення зазвичай

$$d_{\text{екв}} = 1,2 D_{\text{екв}} \text{ тобто } d_{\text{экв}} = 1,2 * 9,04 = 10,85 \text{ м}$$

Висоту підвісу парасольки приймаємо  $h = 3$  м, тоді отримаємо:

$$D_{\text{экв}} = \frac{9,04}{3} = 3,01 \text{ м} \quad d_{\text{экв}} = \frac{10,85}{3} = 3,62 \text{ м}$$

2. Знаходимо необхідну швидкість всмоктування:

$$\omega = \kappa * V_m = 1,3 * 0,17 = 0,22$$

де  $\kappa$  – коефіцієнт, що залежить від конструктивного виконання отвору всмоктування. За наявності різкого звуження  $\kappa = 1,2 - 1,5$ , приймаємо  $\kappa = 1,3$ ;

$V_m$  – осьова швидкість конвективного струменя на рівні відсмоктування, м/с.

Для джерела, що має у плані форму витягнутої полоси:

$$Q_m = 0,041 * Q_k^{1/3} * \left(\frac{h}{2B}\right)^{0,38}$$

де  $Y$  – півширина теплоджерела, приймаємо  $B = 4$  м.

$$V_m = 0,041 * 210^{1/3} \left(\frac{3}{2 * 4}\right)^{0,38} = 0,17 \text{ м/с}$$

3. Знаходимо необхідну продуктивність відсмоктування:

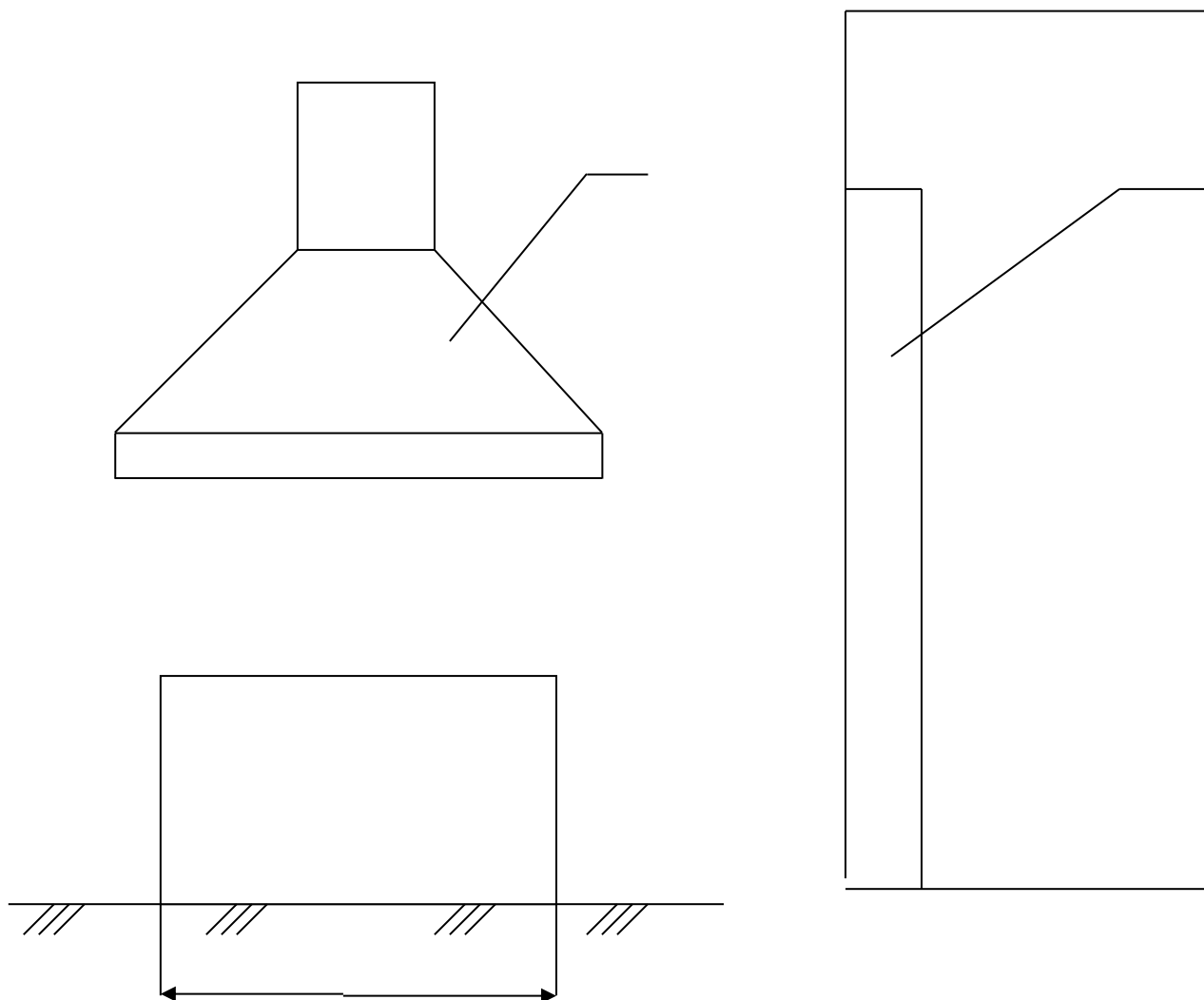
$$L_{om} = 3600 * F_{om} * \omega * n * y$$

де  $n$  – коефіцієнт, що враховує рухливість повітря. Визначаємо за графічними залежностями,  $n = 0,9$   $y$  – коефіцієнт, що враховує вплив огорож на продуктивність відсмоктування,  $y = 1,2$ .

$F_{\text{від}}$  – площа перерізу парасольки,

$$F = \frac{\omega * d_{\text{экв}}}{4} = 7,39 \text{ м}^2$$

$$L_{om} = 3600 * 7,39 * 0,22 * 0,9 * 1,2 = 6012 \text{ м}^3 / \text{ч}$$



*1. – коксова батарея; 2. – двері; 3. – парасолька.*

Рис 4.1 – Схема витяжної вентиляції для видалення пилю та тепла.

## Висновок

Відповідно до завдання магістерської роботи за темою «Розробка напрямів підвищення ефективності роботи бункерів для сипкого матеріалу» виконано та проаналізовано наступні питання.

Наведено, основні питання однієї із поставлених задач виробництва - вирішення проблеми утворення застійних зон при розвантаженні бункера. Поставлені питання були вирішені в якості аналізу, обґрунтування та пошуку шляхів підвищення ефективності роботи обладнання.

Проведено аналіз процесу плинусипкого матеріалу з бункера під дією власної ваги, а також розглянуто вплив на форму руху потоку різних конструктивних параметрів бункера.

Будь який бункер завантажений будь яким видом сипкого матеріалу має спільний характер руху розвантаження. Це незв'язний рух на початку розвантаження та зв'язний після нього. Геометрія бункера і властивості матеріалу впливають лише на час протікання кожної з цих форм руху і можливість їх існування одночасно. Якщо бункер складається з двох частин, конусної та циліндричної то форма руху в них може бути різної. В конусній частині, при тупому внутрішньому куті нахилу стінки перевищуючому  $115^{\circ}$  $120^{\circ}$ , рух здебільшого набуває незв'язної форми руху, а при куті меншим за  $115^{\circ}$  переважає зв'язна форма. В циліндричній же частині переважає зв'язний рух, різницею є його рух по всьому поперечному перерізі чи лише в центральній його частині бункера.

Можна зазначити значну залежність руху сипкого матеріалу від конструкційних параметрів бункера. Так зменшення кута нахилу конусної частини зі  $120^{\circ}$  до  $105^{\circ}$  пришвидшило спустошення бункера з 20,9 до 14,1 секунди.

Основою такого результату стало зменшення сили тертя, що вповільнював просування частинок біля стінок. Це змінило форму руху з незв'язної на зв'язну. Хоча і в цьому випадку прослідковувались невеликі пульсації. Застійні зони та воронка не утворювались.

Недоліком такої зміни конструкції є підвищення рівня сипкого матеріалу в бункері та зменшення загального об'єму бункера.

Зміна розмірів вихідного отвору також значно вплинули на плин матеріалу. Так при збільшенні діаметру вихідного отвору з 400 до 600 мм, площа отвору зросла на 126%, а швидкість розвантаження бункера на 208%. Проте такі збільшення можуть бути не можливими в залежності від технологічної лінії.

Зменшення ж отвору навпаки, призвели до утворення склепінь та унеможливлення подальшого спустошення бункера.

Квадратний бункер показав схожі з круглим бункером результати по швидкості розвантаження. Але на графіку руху застійних зон видно значне їх сповільнення, що призвело до утворення більшої воронки.

У якості вдосконалень було обрано бар'єрний та гальмівний елемент в центральній частині бункера.

При використанні бар'єрного елемента потік матеріалу почав захоплювати застійні зони та пришвидшив їх рух. Його використання дало позитивний результат, після чого його конуструкція була оптимізована. Негативним моментом такого вдосконалення є підвищення можливості утворення склепінь

Гальмівний елемент з 6 ребрами дає помітний результат по збільшенню рухомості застійних зон. Такий результат обумовлено не лише збільшенням площі контакту елемента з частинками але й гострим кутом між ребрами. Гострий кут діє як лещата. Під вагою верхніх шарів сипкого матеріалу, частинки впираються в ці кути і гальмуються під дією одразу двох стінок.

В результаті були проведені більш точні розрахунки які підтвердили позитивний вплив вдосконалення на застійні зони у бункеру.

## ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Вишневецький С. М. Пуазейля Закон Фізична енциклопедія:
2. [в 5 т.] / Гл. ред. А. М. Прохоров. - М.: Радянська енциклопедія (т. 1—2), 1988—1999. — ISBN 5-85270034-7.
3. Торічеллі формула. Статті в Фізичній енциклопедії та Фізичному енциклопедичному словник.
4. Ковтун В.В. Дорофєєв О.А. Основи механіки дискретних матеріалів. - Хмельницький, 2018. - 131 с.
5. Крупський А. А. Розрахунок та розробка барабана ПП.1.18.120. – НТУ Дніпропетровська політехніка. – 2020. – 2 с.
6. Маланчук З. Р., Корнієнко В. Я., Марчук М. М., Сорока В. С., Васильчук О. Ю. – Транспортні системи гірничих підприємств (шахти та збагачувальні фабрики). – Рівне 2020. – 157 с.
7. Казак І.О. Особливості застосування і конструкції пластинчастого живильника. – к.п.н. доцент, доцент кафедри хімічного полімерного і силікатного машинобудування Казак І.О. – Київ 2020. – 3 с.
8. Бункерное устройство [Електронний ресурс]  
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37496351>
9. Коэффициенты трения скольжения [Електронний ресурс]  
<https://minkor.ru/upload/spravochnik/170310-2.pdf>
10. Володимир Атапін, Олександр Пель, Анатолій Темніков. Опір матеріалів. Базовий курс. Дополнительные главы. — Litres, 2021-03-16. — 507 с. — ISBN 978-5-04-112997-2. Архивная копия от 30 декабря 2021 на Wayback Machine
11. Головний редактор А. М. Прохоров. Фізичний енциклопедичний словник. - М.: Радянська енциклопедія. - 1983. - Статті у Фізичному енциклопедичному словнику та Фізичній енциклопедії.
12. Процеси підготовки вугілля до коксування [Електронний ресурс]
13. <https://studfile.net/preview/8901892/page:5/>

- 14.Г. С. Головченко, О. М. Калнагуз, Кінематика руху сипкого матеріалу. - Сумський національний аграрний університет 2019. – 3 с.
- 15.В.В. Стаценко Дослідження плинущого матеріалу в бункерних пристроях. - Київський національний університет технологій та дизайну 2017. - 2 с.
- 16.Казак І. О. Аналіз особливостей конструкції гвинтового живильника з метою удосконалення його роботи. - Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського – 2021. – 9 с.
- 17.Стаценко В. В., Аналіз руху сипкого матеріалу на виході з бункерів / Біла Т. Я., Бурмістенков О. П. - Київський національний університет технологій та дизайну 2017 – 10 с.
- 18.Гячев Л. В. Основы теории бункеров и силосов. – Барнаул: АПИ, 1986. – 84с.
- 19.Стаценко В. В. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів: монографія / В.В. Стаценко, О.П. Бурмістенков, Т.Я. Біла. – Київ: КНУТД, 2017. – 220с.
- 20.Глобин А. Н. Дозатори: монографія / А. Н. Глобин, И. Н. Краснов.– Берлін: Директ-Медіа, 2016. – 384с.
- 21.Сталевий В. П. Підвищення ефективності процесу вивантаження вологих зернових матеріалів із бункерів сільськогосподарського призначення – зерноград 2004 – 20 с.
- 22.Zaselskiy, V., Popolov, D., Zaytsev, H., and Shepelenko, M. Upgrade of Conveyor Line for Coal Charge Preparation with the Use of Modern Grading and Mixing Equipment. Sci. in nov. 2021. V. 17, no. 3. P. 67—77.
- 23.Chapter-7 Mechanics of Bulk Solids 2016 Particle Technology and Engineerin [Електронний ресурс]  
[Chapter7MechanicsofBulkSolids2016ParticleTechnologyandEngineerin](#)
- 24.Коваленко І. В. Розрахунки основних процесів, машин та апаратів хімічних виробництв: Навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / І. В. Коваленко, В. В.



Малиновський. – К.: Норіта-плюс, 2007. – 216 с.: іл. – Бібліогр.: С. 209.  
ISBN 978-966-2975-07-9.

25. Коваленко І. В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв.  
– К.: Інрес : Воля, 2006. – 264 с.: іл – Бібліогр.: 253-255.