

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра хімічних технологій та хімічного машинобудування

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Євген ЗБИКОВСЬКИЙ

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2022 року

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Магістр

на тему: «Підвищення ефективності роботи бункерів для зберігання сипких матеріалів»

Виконав: магістр 2-го курсу, групи ТПМм-21
спеціальності 133 Галузеве машинобудування, спеціалізації «Техніка
переробки сировинних матеріалів»

Денис КАРПЕНКО

(прізвище та
ініціали)

(підпис)

Керівник доц., к.т.н. Андрій ТОПОРОВ

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

*Засвідчую, що у цій кваліфікаційній
роботі немає за-позичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.*

Студент _____

(підпис)

Луцьк – 2022 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Факультет Машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій Кафедра «Хімічних технологій та хімічного машинобудування» Освітній ступінь магістр
Спеціальність 133 Галузеве машинобудування, спеціалізації «Техніка переробки сировинних матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри:

Євген ЗБИКОВСЬКИЙ

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” 2022 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Денису КАРПЕНКО

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: «Підвищення ефективності роботи бункерів для зберігання сипких матеріалів»

керівник роботи Андрій АНАТОЛЬЙОВИЧ, доц., к.т.н.

затверджені наказом по університету від „23_” вересня 2022 р. № 437

1. Строк подання студентом роботи 13.12.2022

2. Вихідні дані до роботи сировина – вугілля, вугільна шихта

Сировини – вугілля, вугільна шихта

Технічні характеристики бункера вуглезавантажувального вагона

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Аналіз форми руху потоку вугілля, його залежність від форми бункера

4. Перелік графічного матеріалу (з точною вказівкою обов'язкових креслень)

Презентація в PowerPoint

5. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Андрій ТОПОРОВ, доц., к.т.н	26.09.2022	
2	Андрій ТОПОРОВ, доц., к.т.н	10.10.2022	
3	Андрій ТОПОРОВ, доц., к.т.н	24.10.2022	
4	Андрій ТОПОРОВ, доц., к.т.н	14.11.2022	
5	Андрій ТОПОРОВ, доц., к.т.н	30.11.2022	
6	Валерій КУЦЕРУБОВ, доц., к.т.н		

6. Дата видачі завдання 26.09.2022

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Написання теоретичної частини (Розділ 1)	26.09.2022	
2	Опис обладнання, теоретичні розрахунки (розділ 2)	10.10.2022	
3	Побудова математичних моделей процесу плинку сипкого матеріалу з бункера (розділ 3)	24.10.2022	
4	Чисельний аналіз основних елементів бункера (розділ 4)	14.11.2022	
5	Розробка заходів по підвищенню ефективності (розділ 5)	30.11.2022	
6	Підготовка презентації	19.12.2022	
7	Оформлення пояснювальної записки	13.12.2022	

Студент _____ Денис КАРПЕНКО
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ Андрій ТОПОРОВ
(підпис) (прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра: 120 сторінок, 54 рисунків, 3 таблиць, 22 посилання, 2 додатки.

Актуальність теми полягає в підвищенні ефективності роботи бункера для сипкого матеріалу за допомогою використання можливостей моделювання роботи обладнання в САЕ-системах.

Об'єкт дослідження: бункер для зберігання сипкого матеріалу.

Предмет дослідження: потік сипкого матеріалу.

Мета роботи: збільшення ефективності роботи бункера.

Методи дослідження – на основі аналізу технологічного обладнання та процесу його роботи створено відповідну модель в САПР з можливістю її розрахунку.

Робота виконана за період навчання в магістратурі з 1 вересня 2021 р. по 31 грудня 2022 р. на кафедрі «Хімічних технологій та хімічного машинобудування» Донецького національного технічного університету.

Тема роботи затверджена наказом по університету від 23.09.2022, №437

СИПКИЙ МАТЕРІАЛ, БУНКЕР, ВОРОНКА, ЗАСТІЙНІ ЗОНИ, КУТ НАХИЛУ КОНУСНОЇ ЧАСТИНИ, ФОРМА РУХУ

ANNOTATION

Qualifications of the master's work: 120 sides, 54 drawings, 3 tables, 22 assignments, 2 supplements.

The actuality of those fields in the improvement of the efficiency of the robotic bunker for greasy material for additional possibilities of modeling robotic control in SAE-systems.

Object of follow-up: a bunker for the storage of raw material.

Subject of inquiry: the flow of dry material.

Meta robots: increasing the efficiency of the robots of the bunker.

Methods of follow-up - on the basis of the analysis of the technological possession and the process of yogo robot, a suitable model in CAD was created with the possibility of rozrahunka.

Vikonan's work for the period of apprenticeship in the magistracy from 1 spring 2021 to March 31, 2022 at the Department of "Chemical Technologies and Chemical Engineering" of the Donetsk National Technical University.

The theme of robots was approved by the order of the university in 23.09.2022, No. 437

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

Список публікацій:

1. Карпенко Д.В., Стовбуров С.Д., Терещенко О.О., Топоров А.А, Застосування комплексного параметричного 3D моделювання при проектуванні штампової остастки та розробці конструкторської документації // Проблеми техніки і технології переробних виробництв: зб. тез доп. VII Міжнародної науково–практичної конференції (Покровськ, 18–19 трав. 2021 р.) / Донецький національний технічний університет. – Покровськ : ДВНЗ «ДонНТУ», 2021. – с. 36 – 39
2. Карпенко Д.В., Стовбуров С. Д., Топоров А.А , Розрахунок сопла лавалля для холодного газодинамічного напилання з порівнянням аналітичного методу та результатами розрахунків пакету програм ansys fluent // Проблеми техніки і технології переробних виробництв: зб. тез доп. VII Міжнародної науково–практичної конференції (Покровськ, 18–19 трав. 2021 р.) / Донецький національний технічний університет. – Покровськ : ДВНЗ «ДонНТУ», 2021. – с. 22 – 25

Зміст

ЗАВДАННЯ	2
РЕФЕРАТ	7
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	8
Вступ.....	11
1 АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ БУНКЕРІВ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ	13
1.1 Актуальність підвищення ефективності роботи бункерів для зберігання сипкого матеріалу.	13
1.2 Бункери, його види та методи використання.....	14
1.3 Вуглезавантажувальний вагон.....	20
1.4 Сипкий матеріал як робоче середовище.....	32
1.5 Фізико-хімічні властивості шихти.	34
1.6 Додаткове обладнання бункера	42
1.7 Постановка задачі дослідження.....	49
2 АНАЛІЗ РУХУ СИПКОГО МАТЕРІАЛУ В БУНКЕРАХ.....	50
2.1 Моделі дискретного середовища пластичного плинущу.....	50
2.2 Потік сипкого матеріалу.....	51
2.3 Швидкості потоку сипкого матеріалу з конусної частини бункера	55
3 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКУ ДИСКРЕТНОГО МАТЕРІАЛУ В БУНКРІ	61
3.1 Побудова 3D моделі для початкових розрахунків.	61
3.3 Проведення розрахунків, та аналіз їх результатів.	73
4 АНАЛІЗ ЗМІНЕННЯ ПОТОКУ ПРИ РІЗНИХ КОНФІГУРАЦІЙ БУНКЕРА	81
4.1 Бункер квадратного профілю.....	81
4.2 Вплив кута нахилу стінки конусної частини на швидкість розвантаження.	86
4.3 Вплив розміру вихідного отвору на швидкість розвантаження.....	88
5 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ	93
5.1 Елемент-бар'єр в центральній частині бункера.....	93
5.2 Гальмівний елемент в центральній частині бункера.....	101

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

Y - 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

$\{\varepsilon\}$ - не повні деформації

$\{d\varepsilon\}$ - швидкості їх приростів

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

$d\lambda$ – множник Лагранжа

σ_1, σ_3 – максимальне і мінімальне головні напруження

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

τ_T – границя текучості матеріалів

α – кут нахилу жолоба (труби до горизонту)

φ_0 – кут тертя сипкого матеріалу о стінки ємності

δ – характерний розмір частинки

a і b – постійні

δ – найбільший розмір частинки сипкого матеріалу

B – постійна, яка залежить від властивостей матеріалу

R_T – 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_T – площа міделевого перерізу частинки сипкого матеріалу

A – площа перерізу потоку

g – прискорення вільного падіння, м/с²

h – висота шару матеріалу в бункері, м

λ – 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

η – 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;

ρ – 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. Допомогає 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 глазурі 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'язали 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 мішківини, 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.

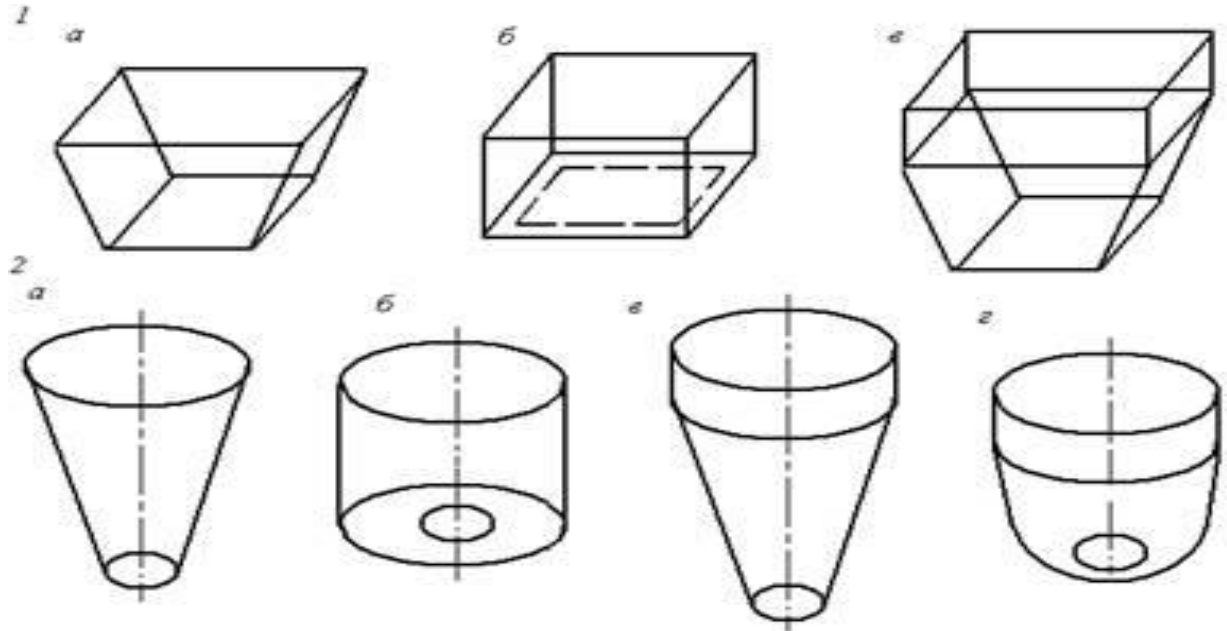
1.2 Бункери, його види та методи використання.

Бункер являє собою певну ємність для зберігання рідких або сипких продуктів виробництва. Він розширює можливості промисловості завдяки спрощенню певних етапів на технологічній лінії виробництва. З його допомогою різні послідовні етапи виробництва можуть мати різну продуктивність, працювати незалежно один від одного, не зупиняти

виробництво при певних невеликих проблемах у постачанні чи відвантаженні продуктів виробництва, зменшує коливання подачі ресурсів. Може бути як елементом окремого пристрою, так і самостійною конструкцією.

Бункери використовують не тільки як стаціонарний об'єкт зберігання, а й для транспортування сировини. Найвідомішим прикладом є перевезення вугілля та зерна залізничними коліями. Як правило такі ресурси потребують перевезення одразу великої кількості, а через невелику ціну вантажу, використання вантажівок є не раціональним, тож для цього використовують здебільшого вантажні вагони та вагон-хоппер. Також транспортування сипких матеріалів використовують на вугільних та рудних шахтах, на металургійних заводах, та в іншій важкій індустрії з великими обсягами виробництва.

Форма бункера може мати різні параметри які залежать від умов використання, сировини у ньому та необхідних від нього технічних параметрів. Але основними видами є :



а - пірамідальні; б - прямокутні; в— комбіновані; г - конічні; д— циліндричні;
е— конічно-циліндричні;

Рисунок 1.1 Види бункерів за формою:

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.

Акумуляуючі 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 бункер-потяг.

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.

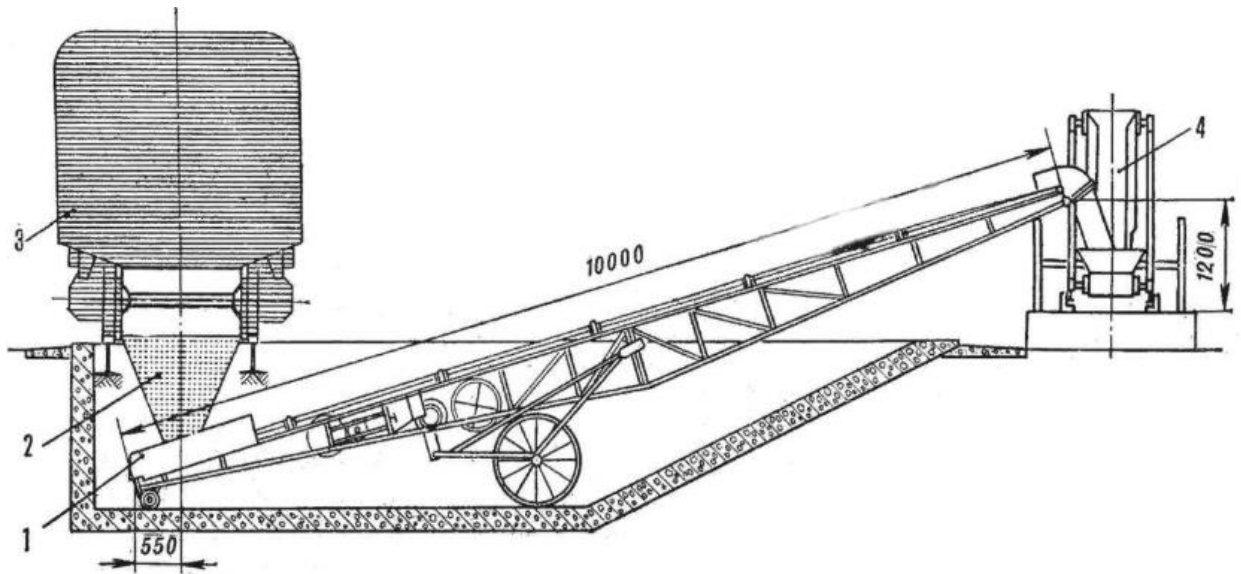


Рисунок 1.2 - Приймальні - для прийняття матеріалу при розвантаженні вагонів, скіпів, самоскидів. [1]

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

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 поломок 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 ± 25 мм. Під час завантаження шихти у піч, телескопи повинні бути опущенні 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 м³.

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 (Рис 1.2.1) складається з опорної рами металевої конструкції 1, бункерів 2, механізму пересування 3 з конічними зубчастими передачами 4, механізму для відкривання та закривання шибєрів 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 шибєрів та опускання підняття телескопів відбувалось вручну.

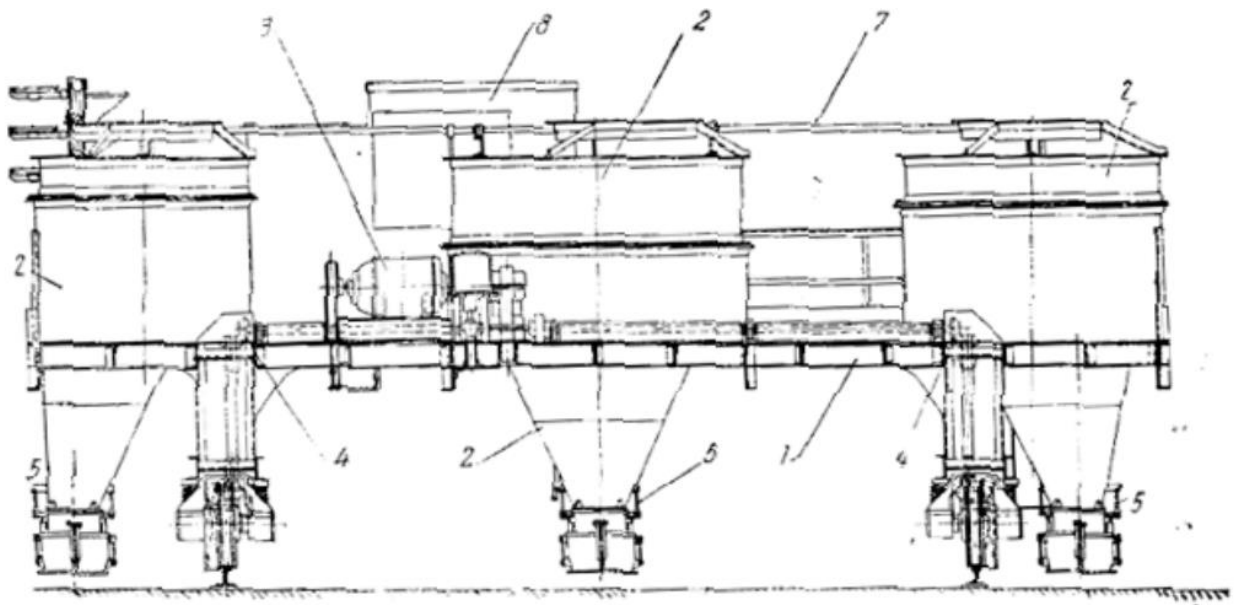


Рисунок 1.3. - Загальний вигляд вуглезавантажувального вагону старого типу.

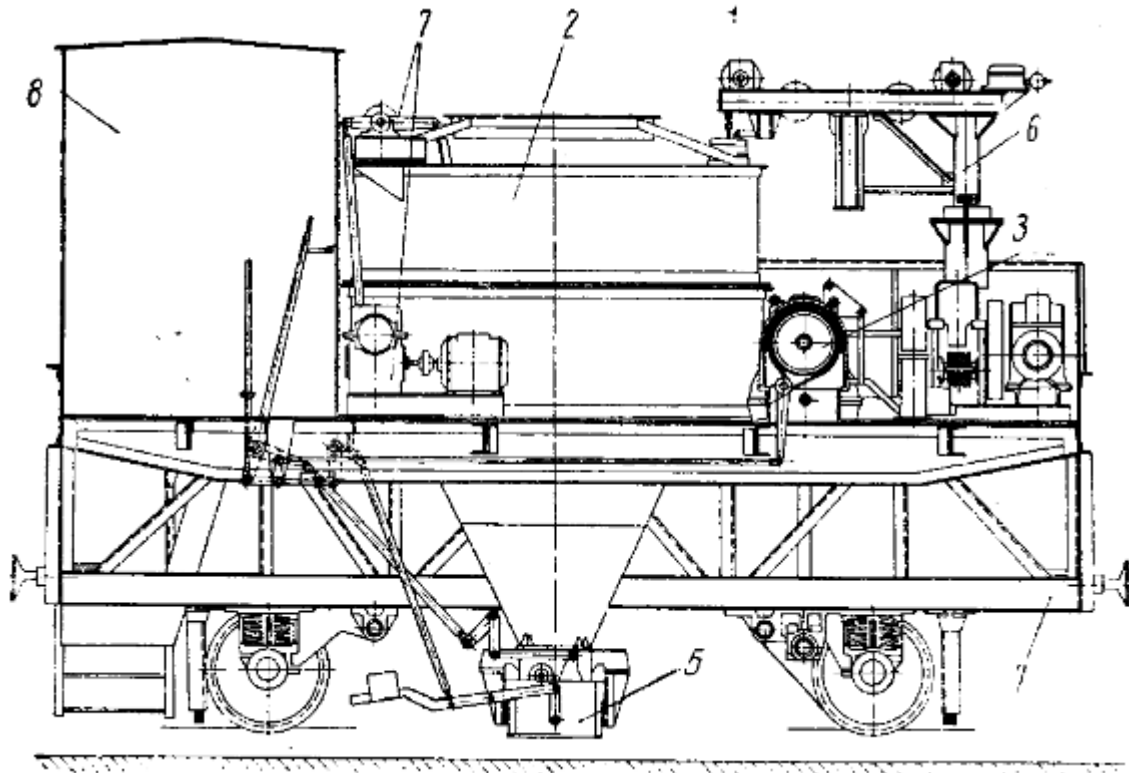


Рисунок 1.4. - Загальний вигляд вуглезавантажувального вагону старого типу.

Механізм пересування вагона була оснащена 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 рис 2.1, 2.2, 2.3.

Характеристика типового трьохбункерного вуглезавантажувального вагона конструкції конструкторського бюро Главмашмета

Корисна ємність бункера (максимальна) м ³	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

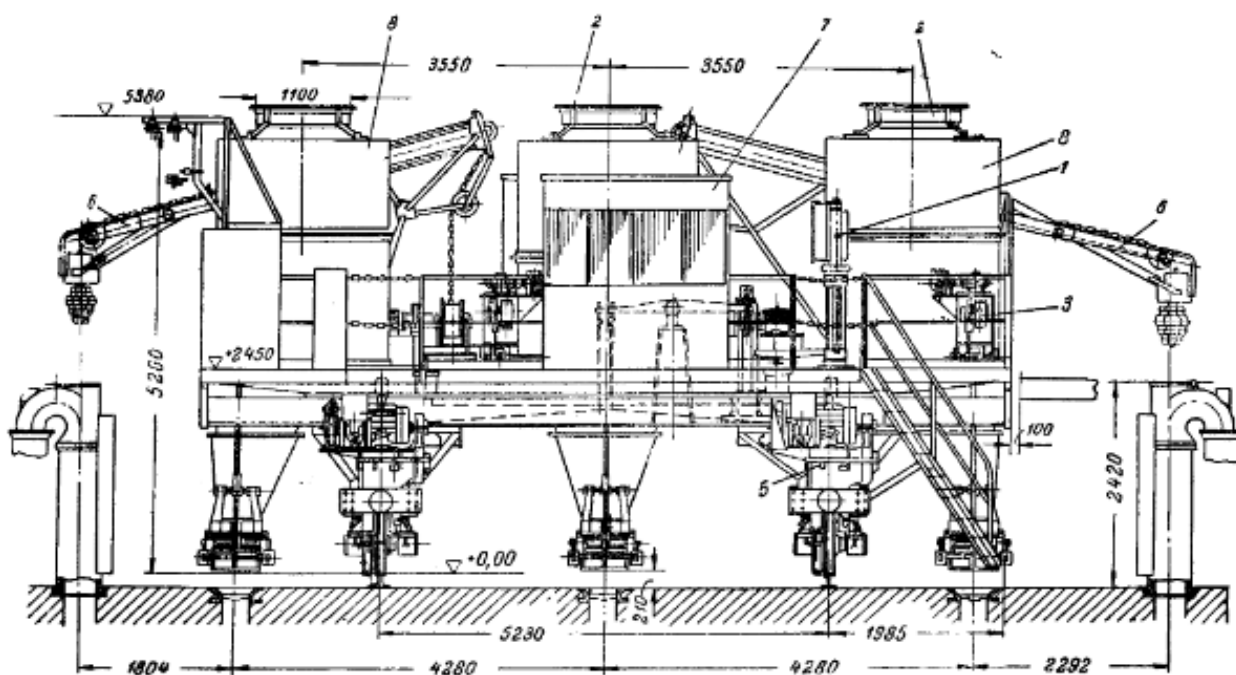


Рисунок 1.5. - Трьохбункерний вуглезавантажувальний вагон конструкції конструкторського бюро Главмашмета. Вид спереду.

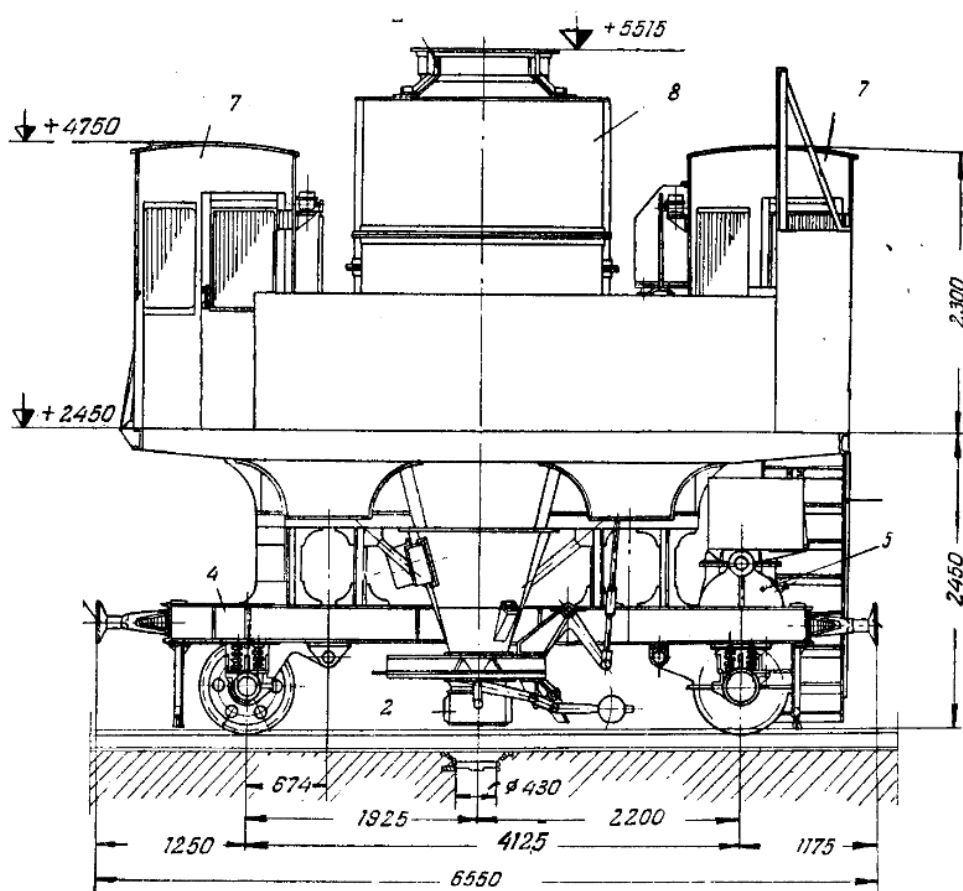


Рисунок 1.6. - Трьохбункерний вуглезавантажувальний вагон конструкції конструкторського бюро Главмашмета. Вид зліва.

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 сталєних корпусах, що забезпечує їх надійну роботу.

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 шиберів, телескопів і механізми зняття люків обладнанні трьома електромеханічними приладами для окремого кнопочового управління кожним шибером, телескопом та механізмом зняття люків.

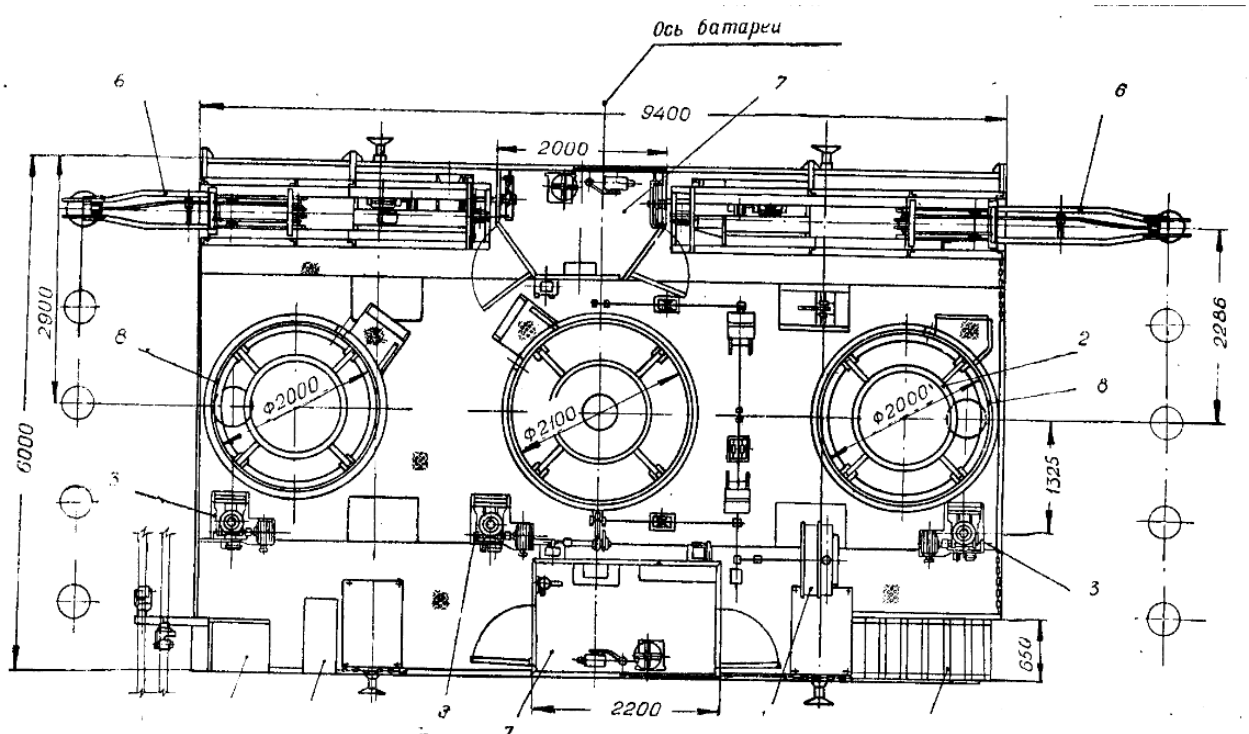


Рисунок 1.7. - Трьохбункерний вуглезавантажувальний вагон конструкції конструкторського бюро Главмашмета. Вид зверху.

Тормозна система механізму пересування – гідроелектрична.

Мастило – 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 шиберів, 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/см²

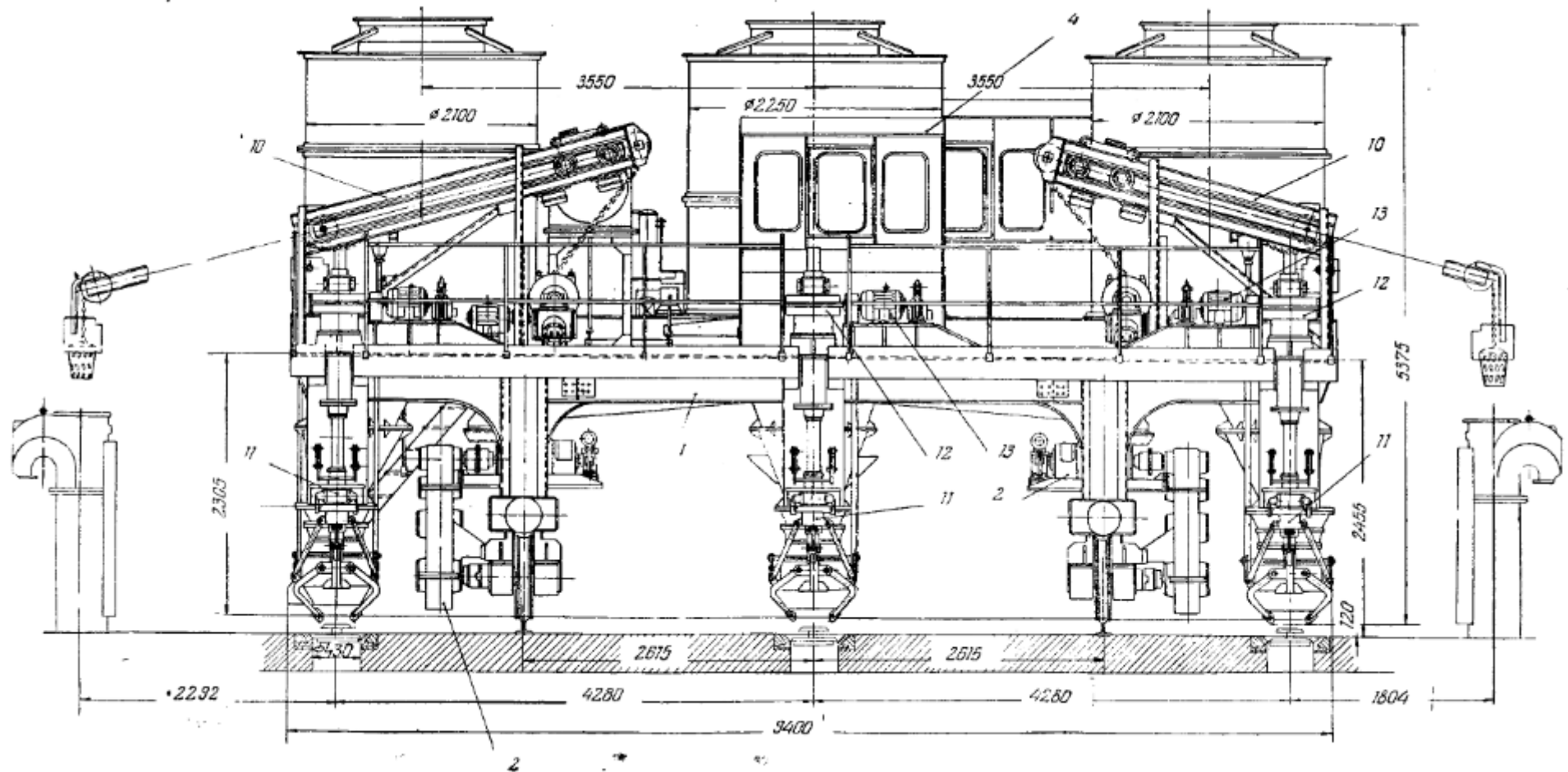
Характеристика трьохбункерного вуглезавантажувального вагона конструкції Орського машинобудівельного заводу

Корисна ємність бункера (максимальна) м ³	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

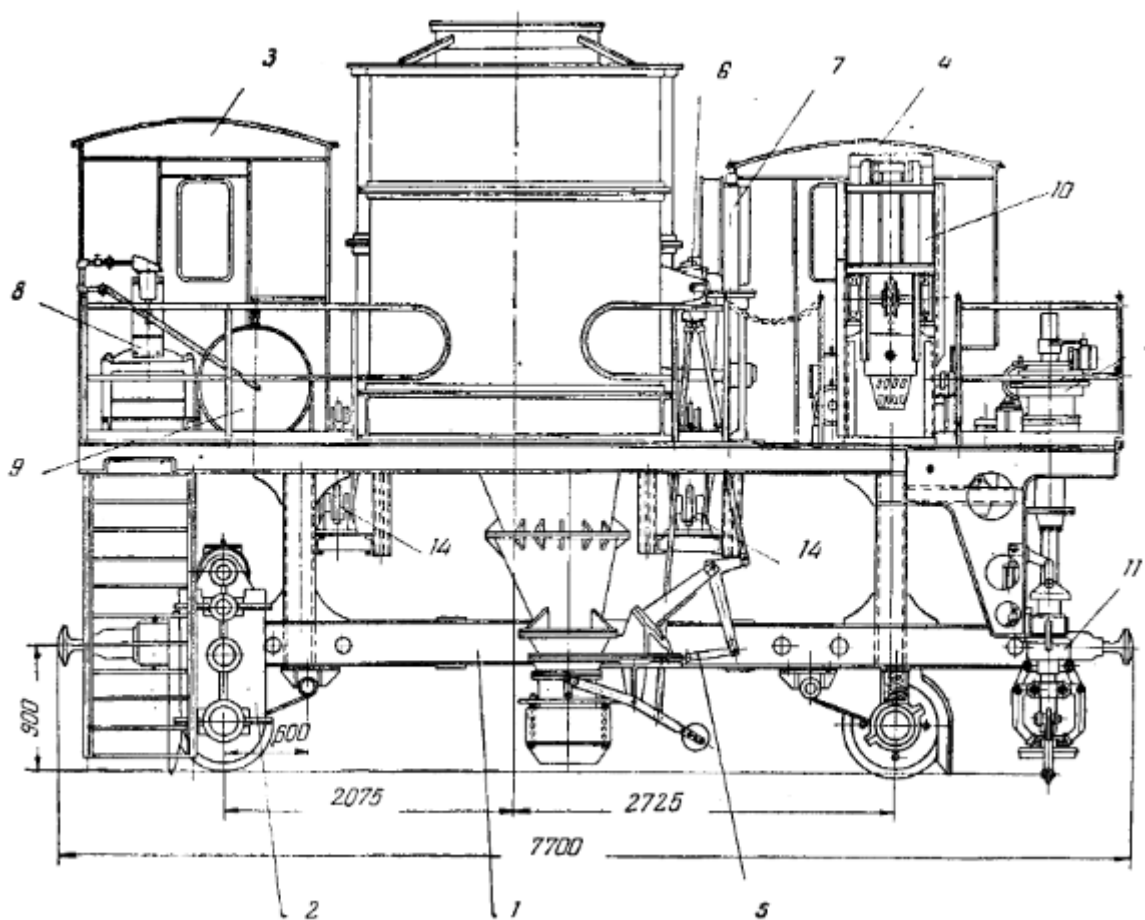
На вагоні встановлено три механізми для зняття люків коксової печі. Кількість механізмів відповідає кількості люків на печі. Кожен з цих механізмів приводиться в дію пневматичним циліндром. Крім цього на кожному з них встановлений електродвигун потужністю 2,2 кВт та черв'ячний редуктор який має передаточне число 30,5. Цей електродвигун забезпечую 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 1.8. - Трьохбункерний вуглезагрузочний вагон конструкції Орського машинобудівельного заводу. Вид спереду.



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 1.9. - Трьохбункерний вуглезавантажувальний вагон конструкції Орського машинобудівельного заводу. Вид спереду.

З особливостей даної конструкції слід виділити наступні пункти:

- індивідуальний привід від пневматичних циліндрів шиберів 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.

1.4 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 напружено-деформований 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 статиці 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 плинну 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 $500-550^{\circ}\text{C}$, 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 $900-1000^{\circ}\text{C}$. 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-спіклоне (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 унеможливорює 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	1КВ, 1КФ
	2К	2КВ, 2КФ
Ж	1Ж, 2Ж	-
ГЖ	1ГЖ, 2ГЖ	-
ПС	1ПС	1ПСВ, 1ПСФ
	2ПС	2ПСВ, 2ПСФ
ГЖО	1ГЖО	1ГЖОВ, 1ГЖОФ
	2ГЖО	2ГЖОВ, 2ГЖОФ
КО	1КО	1КОВ, 1КОФ
		2КОВ, 2КОФ
Г	1Г	1ГВ, 1ГФ
	2Г	2ГВ, 2ГФ
КС	1КС	1КСВ, 1КСФ
	2КС	2КСВ, 2КСФ
КСН	-	КСНВ, КСНФ
ДГ	-	ДГВ, ДГФ
ТС	-	ТСВ, ТСФ
СС	1СС, 2СС, 3СС	-

Спеціальні процеси коксування		
Т	1Т	1ТВ, 1ТФ
	2Т	2ТВ, 2ТФ
Д		ДВ

К – коксовий, Ж – жирний, Г – газовий, КЖ – коксовий жирний, ГЖ – газовий жирний, Д – довгопламеневий, Т – худий, С – спікаючийся, СС – слабоспікливе, 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 залежити 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 утилізуванню 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 0 мм 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 продуктивністю 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/м³ [11]

1.6 Додаткове обладнання бункера

Часто бункери використовують з допоміжним обладнанням для більш контрольованого відвантаження сировини. Таким обладнанням може бути

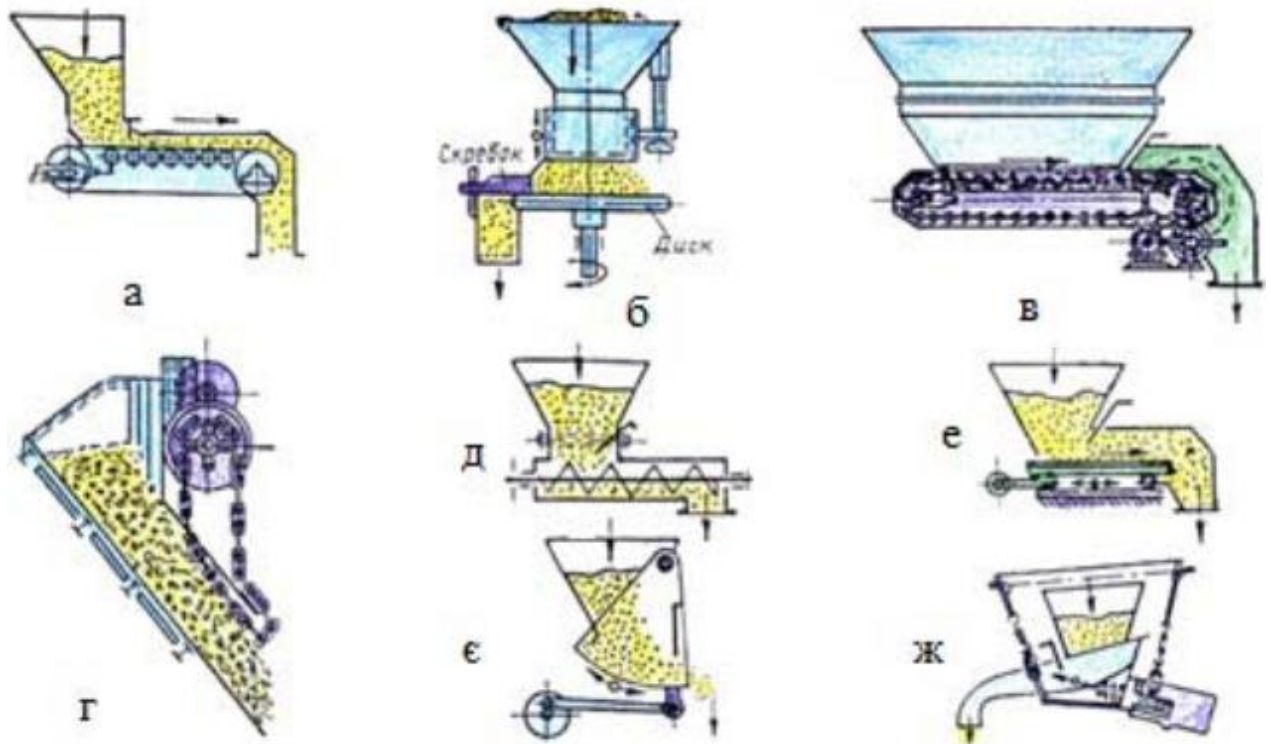
стрічковий або шнековий конвеєр, диск, що обертається та ін. Така Такий тандем називається живильником.

Живильники призначені для рівномірної подачі матеріалу з бункера на технологічну лінії. 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 патрубку 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 патрубку, 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 складаються 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;

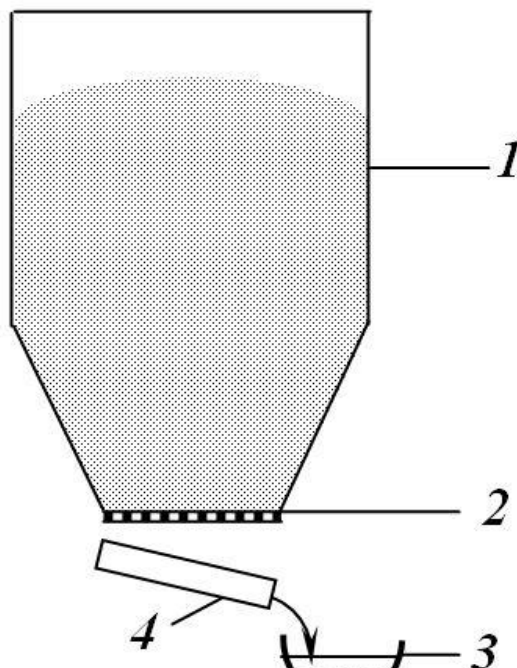
д – шнековий; е – хитний; е – маятниковий; ж – вібраційний

Рисунок 1.10 - Види живильник[5]

Ланцюговий – являє собою продовгуватий жолоб, за переміщення матеріалу вздовж якого відповідають ланцюги. Мають продуктивність 2000 м³/год. Та можуть транспортувати ресурси на відстань до 2 км. Завдяки великій 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



1 – бункерна чарунка; 2 – перфорований шибер; 3 – лоток; 4 – піддон.

Рисунок 1.11 - Схема зневоднюючого бункера.

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.

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.

вигляді кілець 9. Бункерний пристрій винаходу забезпечує збільшення швидкості вивантаження, виключення сводоутворення, 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 плин

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 σ_1, σ_3 – максимальне і мінімальне головні напруження;

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

τ_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 трубах 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 α – кут нахилу жолоба (труби до горизонту);

φ_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.

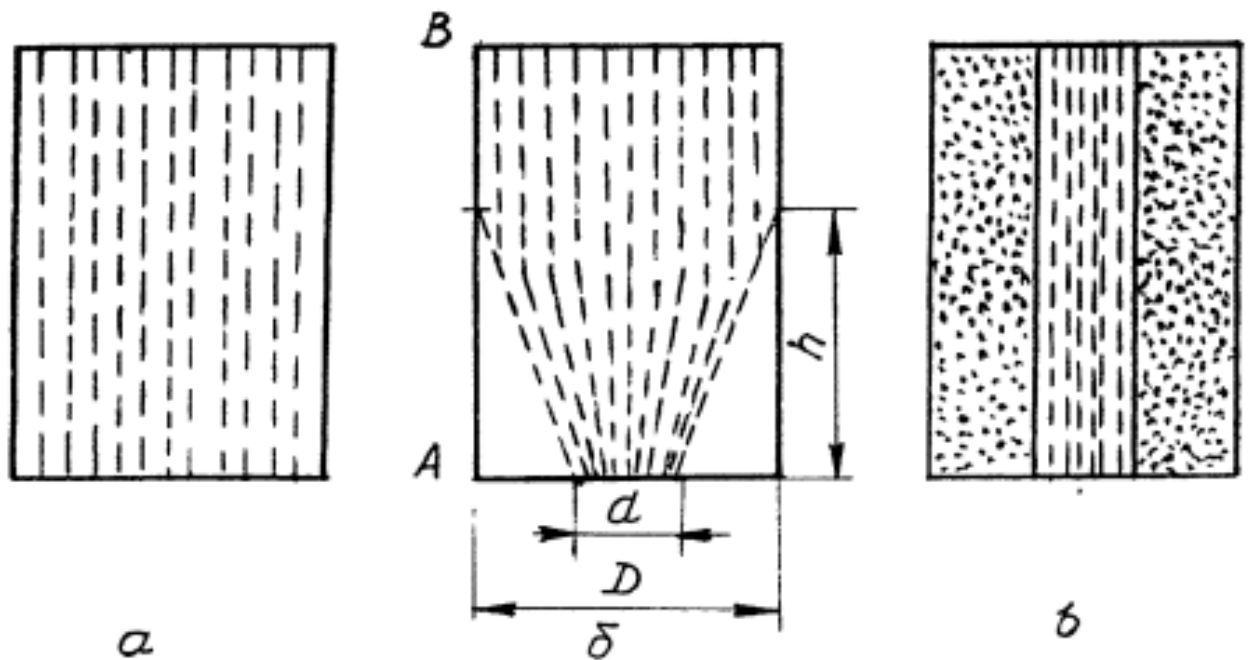
При нещільній укладці матеріалу та невеликому діаметрі бункера ($D < 200 \delta$, де δ – характерний розмір частинки) незв'язна форма потоку проходить швидко. Структура матеріалу перебудовується швидше. В протилежному випадку, при щільній укладці та великих діаметрах бункера ($D > 200 \delta$), час протікання 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.



а - 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 a і b – постійні;

δ – найбільший розмір частинки сипкого матеріалу, мм.

Розрив потоку виникає при швидкості його руху більше критичної

$$v_{кр} \geq B\sqrt{R_r}$$

де B – постійна, яка залежить від властивостей матеріалу;

R_r – гідравлічний радіус ємності, м.

В деяких апаратах вертикальної конструкції спостерігається більш важким. Це обумовлено введенням в об'єм потоку конструкційних елементів, та зменшення 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 міделового перерізу введених в потік конструктивних елементів (проекція площі перерізу конструктивного елементу на площину перпендикулярну напрямку руху сипкого потоку);

A_T – площа міделового 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;
- мінімізування 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 плинності 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/с² ;

h – висота шару матеріалу в бункері, м;

λ – коефіцієнт витікання (0,55..0,65 для легкоспіких 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;

η – 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 диференціальне рівняння для кожної з них:

Для циліндричної частини рівняння має наступний вигляд:

$$\frac{dV(t)}{dt} = \frac{\pi r^4}{8\eta l} P_2(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \rho g h(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \rho g h(t) = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \rho g \frac{V(t)}{\pi R^2}$$

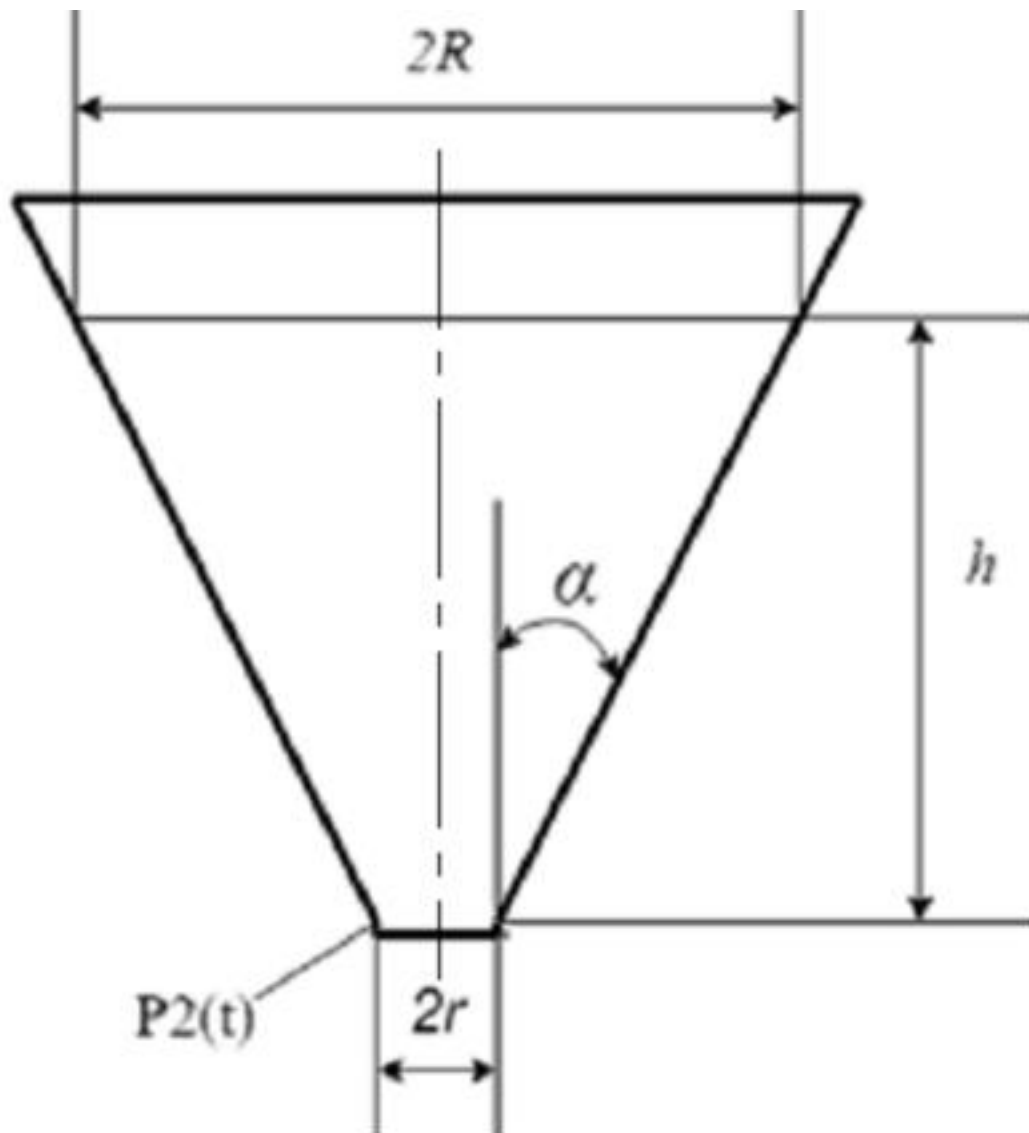


Рисунок 2.2 - Бункер з конусною нижньою частиною[15]

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

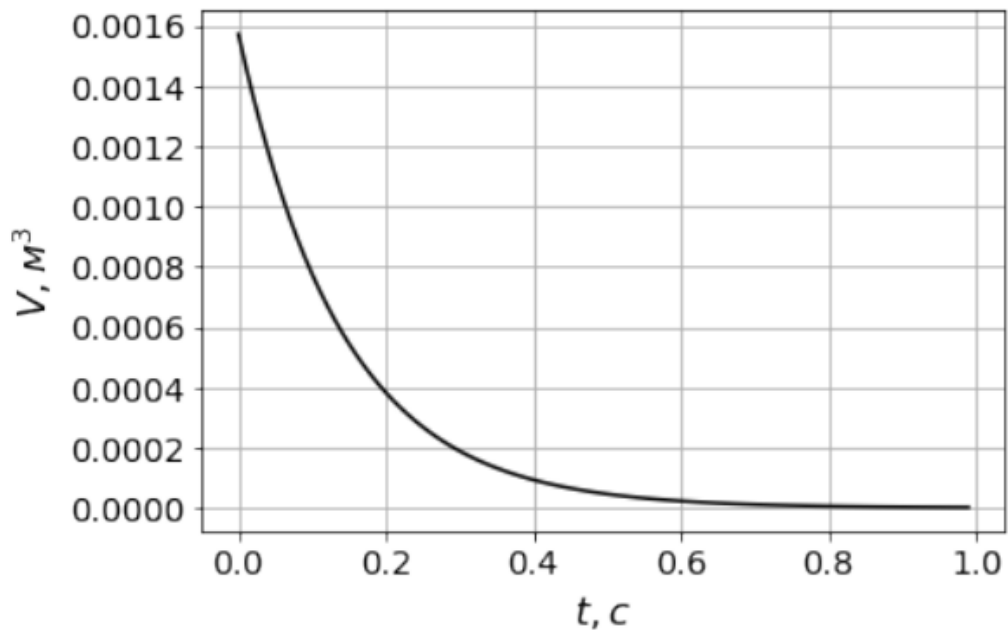


Рисунок 2.3 - Зміна об'єму матеріалу в бункері циліндричної форми[15]

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 (рис 6).

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

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

де R – гідравлічний радіус отвору, м

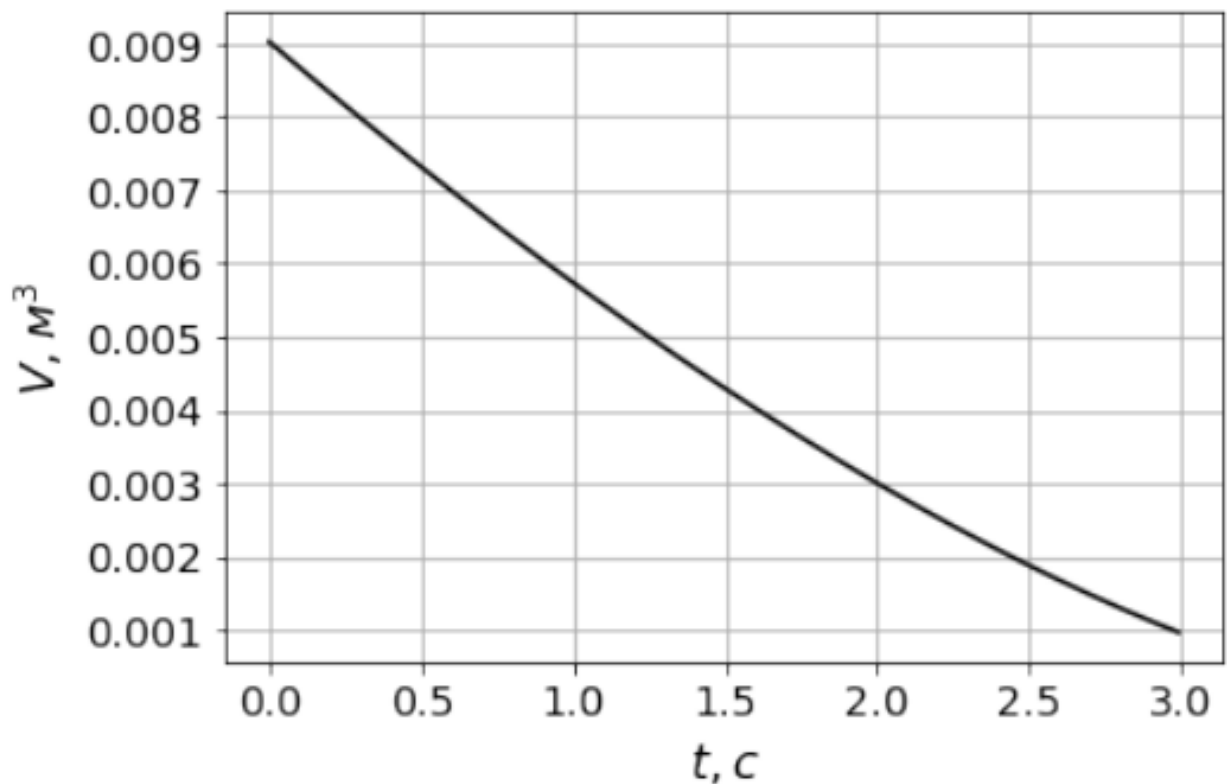


Рис.2.4 - Зміна об'єму матеріалу в бункері конічної форми[15]

Коефіцієнт λ 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;

ρ – насипна щільність матеріалу.

Всі приведені розрахунки є емпіричними та мають узагальнюючий вигляд. Параметри сипкого матеріалу враховуються коефіцієнтами R і λ , 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° - 120° , рух здебільшого набуває незв'язної форми руху, а при куті меншим за 115° 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 ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОТОКУ ДИСКРЕТНОГО МАТЕРІАЛУ В БУНКРІ

3.1 Побудова 3D моделі для початкових розрахунків.

Побудова 3D моделі може відбуватися у будь якій програмі з моделювання. Головними вимогами до процесу моделювання є правильно розташування деталей відносно вісей координат та одне одного, кінцевий формат моделі має мати формат stl.

В першу чергу відбувається саме моделювання рис (3.1).

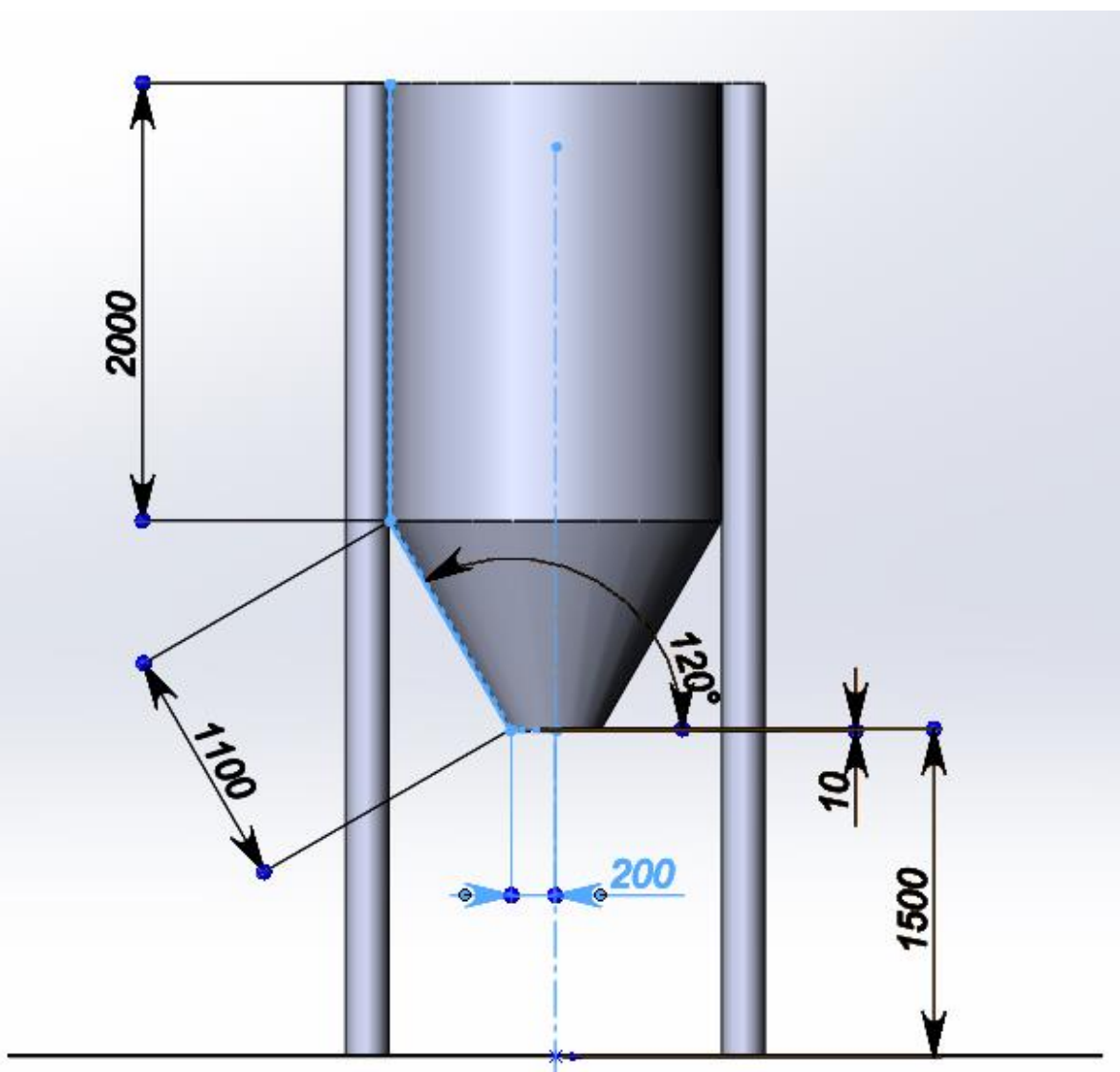


Рисунок 3.1 – 3D-Модель досліджуваного бункера.

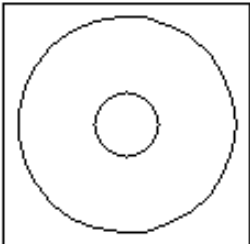
Модель може бути побудована як однією деталлю, та і декількома, це залежить від можливостей обраного програмного забезпечення конвертувати свої файли у формат stl.

Таким чином, якщо моделювання відбувається у програмі для інженерного моделювання, є можливість виділення необхідних поверхонь з наступним їх конвертуванням. Якщо ж модель будується у програмі для полігонального моделювання, то всі деталі повинні бути окремим. Також у цих програмах відсутня необхідність у налаштуванні конвертування, оскільки їх рідні файли дуже схожі на формат stl, але у інженерних програмах, при конвертуванні, слід вказувати якість кінцевого файлу (рис 3.2). При конвертуванні важливо вказувати розмірність моделі, та враховувати це під час написання скрипту.

Формат файла:
STL

Формат вывода
☐ двоичный ☒ ASCII
 Единица: Миллиметры

Разрешение
☐ грубо
☒ точно
☐ настройка



Отклонение
 Допуск: 3.83311425мм

Угол
 Допуск: 10.00000градусов

☒ отобразить информацию о STL перед сохранением файла
☒ Предпросмотр перед сохранением файла
 треугольники: 304
 размер файла: 86056 (Байты)

☐ Определить макс. размер фасета
 Макс. размер
 Допуск: 8356.18906016мм

☒ Не переводить вывод данных STL в позитивное пространство
☐ Сохранить все компоненты сборки в одном файле
☐ Проверить интерференцию

Рисунок 3.2 – Налаштування конвертування для інженерних програм.

Якість конвертування залежить від того, чи буде контактувати потік матеріалу з деталлю, чи ні. Так на рисунку 3.3, можна помітити, що вертикальні опори бункера складаються з меншої кількості фрагментів, ніж сам бункер, оскільки вони в розрахунку не будуть приймати участь.

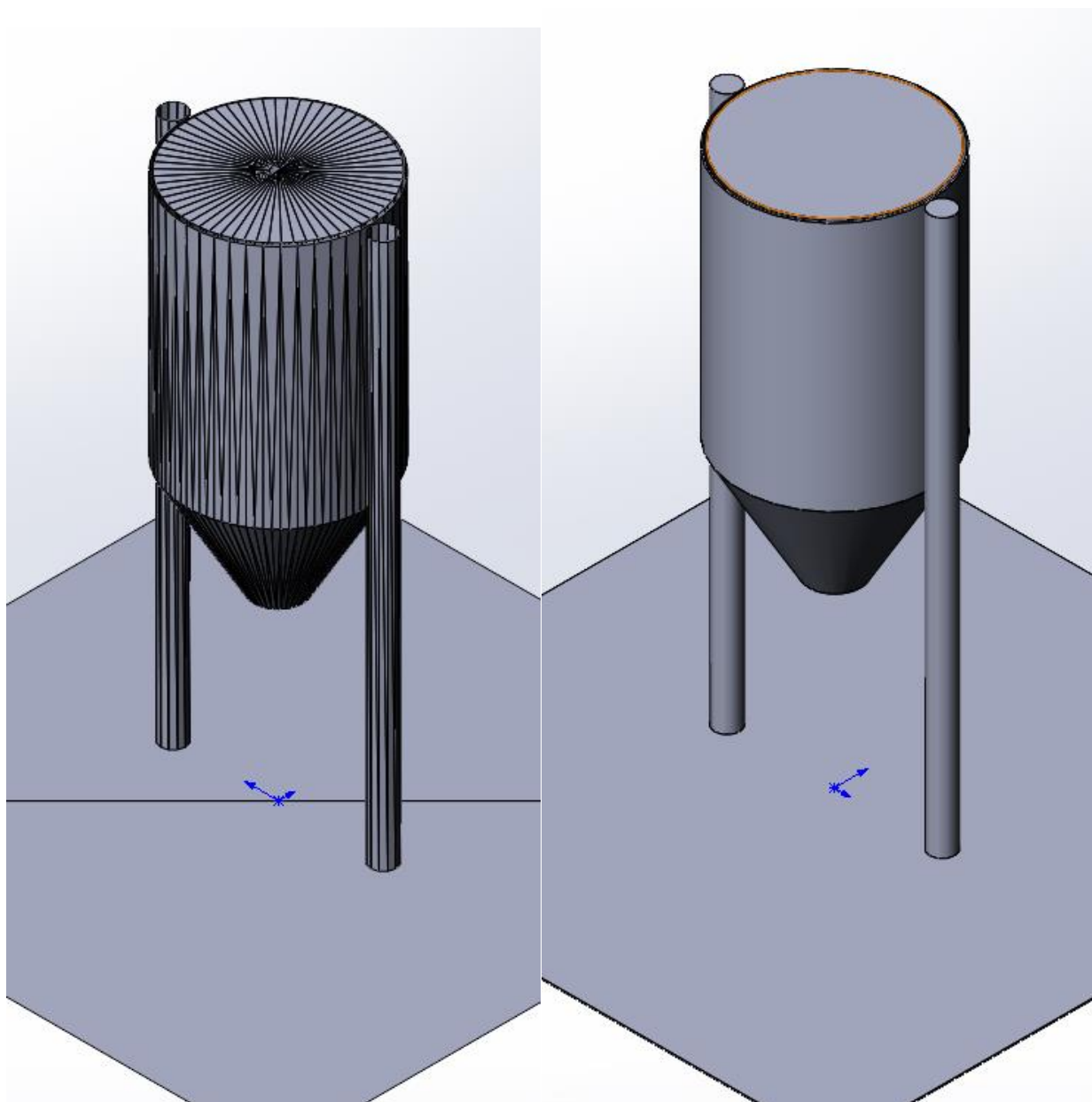


Рисунок 3.3 – Порівняння моделей до і після конвертування.

3.2 Програмний комплекс LIGGGHTS для моделювання дискретного моделювання

Чисельне моделювання потоку сипкого матеріалу полягає у симуляції взаємодії частинок дискретного матеріалу одна з одною та з конструкційними елементами. Для цього враховується більшість фізико-механічних властивостей як сипкого матеріалу, так і матеріалу елементів обладнання, що контактує з ним. Це модуль Юнга, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт відновлення, коефіцієнт тертя ковзання, щільність матеріалу та ін. Також можливим є визначення руху частинок у потоці рідини або газу.

Результатом розрахунків очікується отримання даних по типу руху частинок, його рівномірність, залежності від фізико-механічних властивостей, впливу гранулометричного складу.

Ці дані використовуються при розробці конструкцій обладнання або його модернізування з метою підвищення ефективності роботи. Так при розробці змішувачів сипких матеріалів є важливим визначення оптимального часу роботи з однією порцією матеріалу для досягнення необхідної однорідності та розподілення частинок різного матеріалу по всьому об'єму, та визначення оптимальної конструкції змішувальних лопаток.

Проведення розрахунків такого виду можливо виконувати за допомогою наступних програм:

- EDEM
- ROCKS
- SolidWorks
- LIGGGHTS

Остання і була використана у наступних розрахунках.

LIGGGHTS – програма для розрахунку потоку дискретного матеріалу з відкритим кодом.

LIGGGHTS розшифровується як LAMMPS improved for general granular and granular heat transfer simulations LAMMPS покращено для загального симуляції гранульованого та гранульованого теплообміну...)

LIGGGHTS - це класичний симулятор молекулярної динаміки. Він широко використовується в області молекулярної динаміки. Завдяки фізичним і алгоритмічним аналогіям LAMMPS є дуже хорошою платформою для DEM-симуляцій.

На відміну від багатьох інших програм, LIGGGHTS працює на операційній системі Linux. Це підвищує швидкість розрахунків хоч і вносить певні особливості при його використанні. Побудова досліджуваного об'єкта може відбуватися у будь якій іншій програмі для моделювання 3Д об'єктів і яка має можливість конвертувати свої файли у формат stl.

При побудові майбутньої досліджуваної моделі слід враховувати наступні особливості розрахунку:

- модель слід будувати у центрі вісей координат та при правильному горизонтальному розташуванні;
- слід розуміти, що дана модель буде слугувати лише для обмеження потоку частинок, тож не слід занадто детально розроблювати зони моделі які не будуть залучені у розрахунок;
- різні деталі конструкції слід робити окремими моделями та зберігати окремими файлами, що дасть змогу індивідуально задавати фізичні властивості окремим елементам конструкції. Також це дасть змогу краще аналізувати готові результати;
- після конвертування моделей у формат stl та повторному збиранні у один файл, центр вісей координат повинен збігатись;
- моделі яким планується задавати руху, також слід робити окремими.

Внесення необхідних параметрів моделювання, такі як розмір фракції сипкого матеріалу, його властивості, кількість матеріалу, взаємодія як між

собою так і з досліджуваним об'єктом відбувається шляхом приписування їх у звичайному текстовому документі. Як і у випадку з моделюванням, на цьому етапі існують свої нюанси:

- при вказуванні області розрахунку, яка слугує кубом, його межі повинні бути більшими за загальну модель.

- при вказуванні властивостей взаємодії матеріалу та поверхонь моделі, слід робити це в обидві сторони. Таким чином слід вказувати коефіцієнт тертя сипкого матеріалу об стінку, та коефіцієнт тертя стінки об матеріал. Звісно, що обидва значення будуть однаковими. Таким же чином слід вказувати взаємодію між двома різними фракціями.

- оскільки під час розрахунку програма LIGGGHTS створює ряд документів які буде необхідно в майбутньому аналізувати, то в кінці текстового документа слід вказати формат кінцевих файлів liggghts.

Подальші розрахунки запускаються через термінал шляхом вказання необхідних файлів для розрахунку через команду:

Liggghts -in ***

де *** - назва текстового документу з вхідними даними

В команді не слід вказувати назви моделей які будуть задіяні в розрахунку, оскільки вони вже вказані в текстовому документі.

Також перед запуском розрахунку слід скомпонувати всі файли включаючи моделі та текстовий документ.

Під час розрахунку в папці з початковими файлами створюється нова папка яка поступово буде заповнюватись файлами з результатами розрахунку. Кількість таких файлів може перевищувати десятки тисяч. Для повноцінного аналізу такої кількості файлів використовується програма Paraview.

Після закінчення розрахунків, та перед початком їх аналізу слід переконатись що версія Paraview є 4.5.2. Це є важливим пунктом при додаванні додаткових бібліотек liggghts, бо в інших версіях вони не працюють. Після

встановлення необхідної версії Paraview та додаванні бібліотеки *liggghts*, відображення результатів розрахунку буде повноцінним та коректним.

Загалом LIGGGHTS є лише методом розрахунку, та не має свого інтерфейсу. Його використання стає можливим лише у сукупності з ще трьома програмами які були описані вище.

Переваги:

- дає змогу більш детально аналізувати поведінку матеріалу
- широких діапазон можливих змінних
- висока точність розрахунків

Недоліки:

- потребує додаткових знань окремих програм
- необхідне володіння та розуміння властивостей матеріалу
- наявності додаткового обладнання для зручності роботи
- необхідності вивчення певної кількості особливостей та нюансів роботи програми

Розробка скрипту проходить в текстовому документі та реалізується в наступному порядку.

Встановлення типу досліджуваних частинок – гранули.

atom_style granular

Видалення частинок, якщо вони будуть знаходитись поза зоною розрахунку моделі.

boundary fff

Система обчислення – *si*:

units si

Стандартні налаштування.

communicate single vel yes

newton off

Встановлення розмірів зони обчислення. Зона описується кубом, тож необхідно вказувати віддаленість його граней відносно центру осі координат по кожній осі координат.

variable xmin equal -2.55

variable xmax equal 2.55

variable ymin equal -2.55

variable ymax equal 2.55

variable zmin equal -0.05

variable zmax equal 5.0

Частота проведення ітерацій розрахунку кожні 0,0001 секунди.

variable dt equal 1e-4

Кількість матеріалів, що задіяні в розрахунку. Під числом 1 - позначено матеріал частинки, а під цифрою 2 – матеріал бункера.

variable natoms equal 2

Встановлення модуля Юнга відносно кожного матеріалу.

variable youngmodulus1 equal 1e8

variable youngmodulus2 equal 1e8

Встановлення коефіцієнта Пуассона відносно кожного матеріалу.

variable poisson1 equal 0.3

variable poisson2 equal 0.3

Коефіцієнт відновлення вказується як відносно частинки до стінки бункера, так і відносно стінки бункера до частинки. Також необхідно вказати взаємодію між двома частинками, навіть якщо їх матеріал однаковий. Фактично на цьому етапі проходить встановлення властивостей двох матеріалів. Наступні два коефіцієнти мають таку ж схему.

variable CoR11 equal 0.6

variable CoR12 equal 0.6

variable CoR21 equal 0.6

variable CoR22 equal 0.6

Коефіцієнт тертя

variable sf11 equal 0.3

variable sf12 equal 0.36

variable sf21 equal 0.36

variable sf22 equal 0.0

Коефіцієнт кочення

variable rf11 equal 0.8

variable rf12 equal 0.8

variable rf21 equal 0.8

variable rf22 equal 0.8

Кількість фракцій сипкого матеріалу - 2

variable nradii equal 2

Задання розмірів кожної окремої частинки. Відповідно до системи сі, що була вказана раніше, вимірювання відбуваються у метрах.

variable radius1 equal 0.0200

variable radius2 equal 0.0300

Задання відносної кількості фракцій. Оскільки загальний об'єм вважається за одиницю, вказання кожної окремої фракції відбувається у десятих одиниці.

При необхідності також можуть використовуватись соті.

variable frac1 equal 0.2

variable frac2 equal 0.8

Щільність матеріалу частинок, вимірюється у кілограмах.

variable density equal 1500

На цьому етапі йде визначення послідовності дій при розрахунку. Першим йде заповнення бункера. Тут вказується час заповнення та кількість матеріалу у кілограмах. У нашому випадку це 1875 кг за 5 секунд. Враховується, що при моделюванні бункер буде заповнено частинками з певним простором між ними, а вказана вище щільність не є насипною.

variable filltime equal 5

variable fillmass equal 1875

Встановлюється формула по якій буде визначено швидкість заповнення бункера. Це дає змогу швидше опрацьовувати велику кількість схожих моделювань.

variable fillmassrate equal \${fillmass}/\${filltime}

За схожим принципом, що і попередня, описується алгоритм знаходження кількості ітерацій розрахунку.

variable fillsteps equal \${filltime}/\${dt}

Після заповнення бункера вказуємо паузу у секундах, для того, щоб матеріал перейшов у стан спокою.

variable settletime equal 1

Повторне обчислення кількості ітерацій.

variable settlesteps equal \${settletime}/\${dt}

Задається швидкість відкриття люка бункера. Тут вказується швидкість операції, але не самі деталі, що будуть приймати в ній участь.

variable openvel equal 0.4

Час відкривання люка.

variable opentime equal 1

Обчислення кількості ітерацій.

variable opensteps equal \${opentime}/\${dt}

Далі відбувається розвантаження бункера, і для цього ми вказуємо час, який буде продовжувати розрахунок.

variable dischargetime equal 25

Обчислення кількості ітерацій.

variable dischargesteps equal \${dischargetime}/\${dt}

Присвоєння розмірів зони обчислення через, вже раніше присвоєнні змінні.

region reg block \${xmin} \${xmax} \${ymin} \${ymax} \${zmin}

\${zmax} units box

Дефолтні налаштування.

```

create_box 2 reg
neighbor 0.004 bin
neigh_modify delay 0

```

Модель контакта

```
pair_style gran model hertz tangential history rolling_friction epsd2
```

Дефолтні налаштування.

```

pair_coeff * *
timestep ${dt}
fix integrator all nve/sphere

```

Визначення гравітаційних сил, та напрямку їх дії.

```
fix gravi all gravity 9.81 vector 0.0 0.0 -1.0
```

Визначення властивостей матеріалу

```

fix m1 all property/global youngsModulus peratomtype
${youngmodulus1} ${youngmodulus2}
fix m2 all property/global poissonsRatio peratomtype ${poission1}
${poission2}
fix m3 all property/global coefficientRestitution peratomtypepair
${natoms} 0.6 0.6 0.6 0.6
fix m4 all property/global coefficientFriction peratomtypepair
${natoms} ${sf11} ${sf12} ${sf21} ${sf22}
fix m5 all property/global coefficientRollingFriction
peratomtypepair ${natoms} ${rf11} ${rf12} ${rf21} ${rf22}

```

Генерація та завантаження геометрії формату stl.

```

fix silo all mesh/surface file Silo.stl type 2 scale 0.001
fix lid all mesh/surface file Lid.stl type 2 scale 0.001
fix ground all mesh/surface file Ground.stl type 2 scale
0.001
fix frame all mesh/surface file Frame.stl type 2 scale
0.001

```

```
fix          walls all wall/gran model hertz tangential history
rolling_friction epsd2 mesh n_mesher 4 meshes silo lid ground frame
```

Генерація та розміщення частинок

```
fix          pts1 all particletemplate/sphere 10487 atom_type 1 density
constant ${density} radius constant ${radius1}
```

```
fix          pts2 all particletemplate/sphere 11887 atom_type 1 density
constant ${density} radius constant ${radius2}
```

```
fix    pdd1 all particledistribution/discrete 32452867 ${nradii} pts1
${frac1} pts2 ${frac2}
```

```
fix          ins_mesh all mesh/surface/planar file Insertionsface.stl type 1
scale 0.001
```

```
fix    ins all insert/stream seed 86028157 distributiontemplate pdd1 &
mass ${fillmass} massrate ${fillmassrate} overlapcheck yes all_in yes vel
constant 0 0 -0.75 &
```

```
insertion_face ins_mesh extrude_length 0.25
```

Умови створення даних для обробки результатів розрахунку.

```
shell mkdir post
```

Створення нового комплекту даних кожні 0,05 секунди, або 20 кадрів на секунду.

```
variable dumptime equal 0.05
```

```
variable dumpstep equal ${dumptime}/${dt}
```

```
dump dmpparticle all custom ${dumpstep} post/particles_*.liggghts id type
x y z vx vy vz fx fy fz radius mass
```

```
dump dmpground all mesh/stl ${dumpstep} post/Ground*.stl ground
```

```
dump dmppsilo all mesh/stl ${dumpstep} post/Silo*.stl silo
```

```
dump dmpframe all mesh/stl ${dumpstep} post/Frame*.stl frame
```

```
dump dmplid all mesh/stl ${dumpstep} post/Lid*.stl lid
```

Запуск імітаційного заповнення.

```
run    ${fillsteps}
```


unfix ins

Запуск налаштувань моделювання.

run \${settlesteps}

Запуск симуляції відчинення люка.

fix MoveLid all move/mesh mesh lid linear \${openvel} 0. 0.

run \${opensteps}

unfix MoveLid

Початок симуляції падіння частинок з бункера.

run \${dischargesteps}

3.3 Проведення розрахунків, та аналіз їх результатів.

Для розрахунку було обрано бункер круглого перерізу з верхньою циліндричною частиною та конусною нижньою. Він є максимально наближеним до тих, що використовуються на підприємствах для зберігання сипких матеріалів.

Точні розміри бункера:

- Висота циліндричної частини 2000 мм;
- Діаметр циліндричної частини 1500 мм;
- Висота конусної частини 950 мм;
- Кут нахилу бокової стінки конуса 120°;
- Ширина листа розгортки конуса 1100 мм;
- Висота від підлоги до люка 1500 мм;
- Діаметр вихідного отвору 400 мм.

Ці та інші параметри показані на рисунку 3.1

В якості сипкого матеріал було обрано вугілля з наступними фізико-механічними параметрами:

- Модуль Юнга - 0,62e+5 МПа [10]
- Коефіцієнт Пуассона - 0,11 [9]

- Коефіцієнт тертя (вугілля-сталь) - 0,14 [8]
- Насипна щільність 1500 кг/м³ [11]
- Гранулометричний склад 2 см – 20%, 3 см – 80%

Після запуску розрахунку, LIGGGHTS спочатку встановлює всі параметри, що були вказані у текстовому документі: розміри зони розрахунку, файли з 3D моделями, властивості матеріалів (рис 3.5) і т.д. Але для спрощення розрахунку програма бере частинки з більшим діаметром (рис. 3.4). Так, у даному випадку, були обрані наступні розміри та розраховано їх масову долю.

```
Fix particledistribution/discrete (id pdd1): distribution based on mass%:
  pts1: d=4.000000e-02 (max. bounding sphere) mass%=20.000000%
  pts2: d=6.000000e-02 (max. bounding sphere) mass%=80.000000%
Fix particledistribution/discrete (id pdd1): distribution based on number%:
  pts1: d=4.000000e-02 (max. bounding sphere) number%=45.762712%
  pts2: d=6.000000e-02 (max. bounding sphere) number%=54.237288%
```

Рисунок 3.4 – Прийняті програмою параметри сипкого матеріалу.

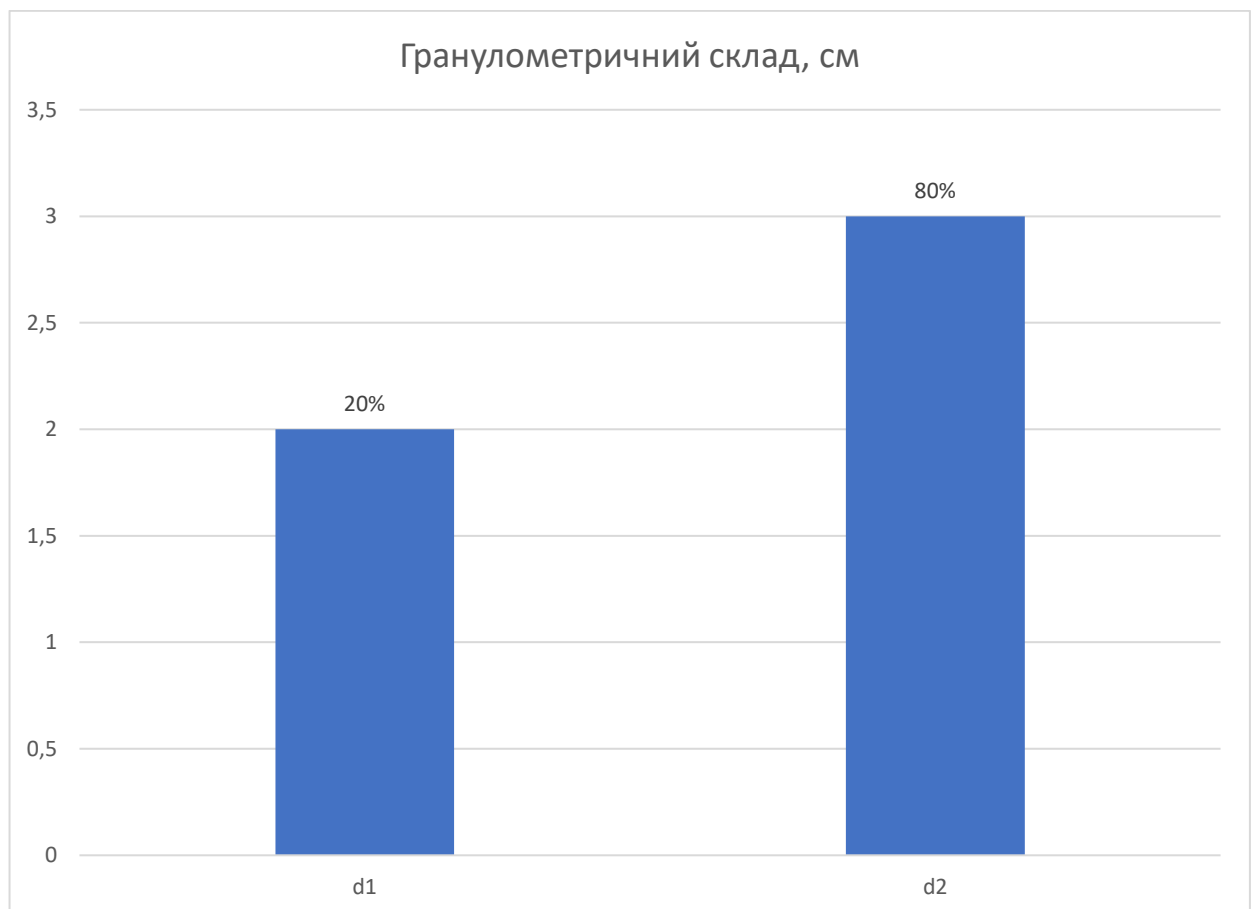


Рисунок 3.5 – Гранулометричний склад сипкого матеріалу.

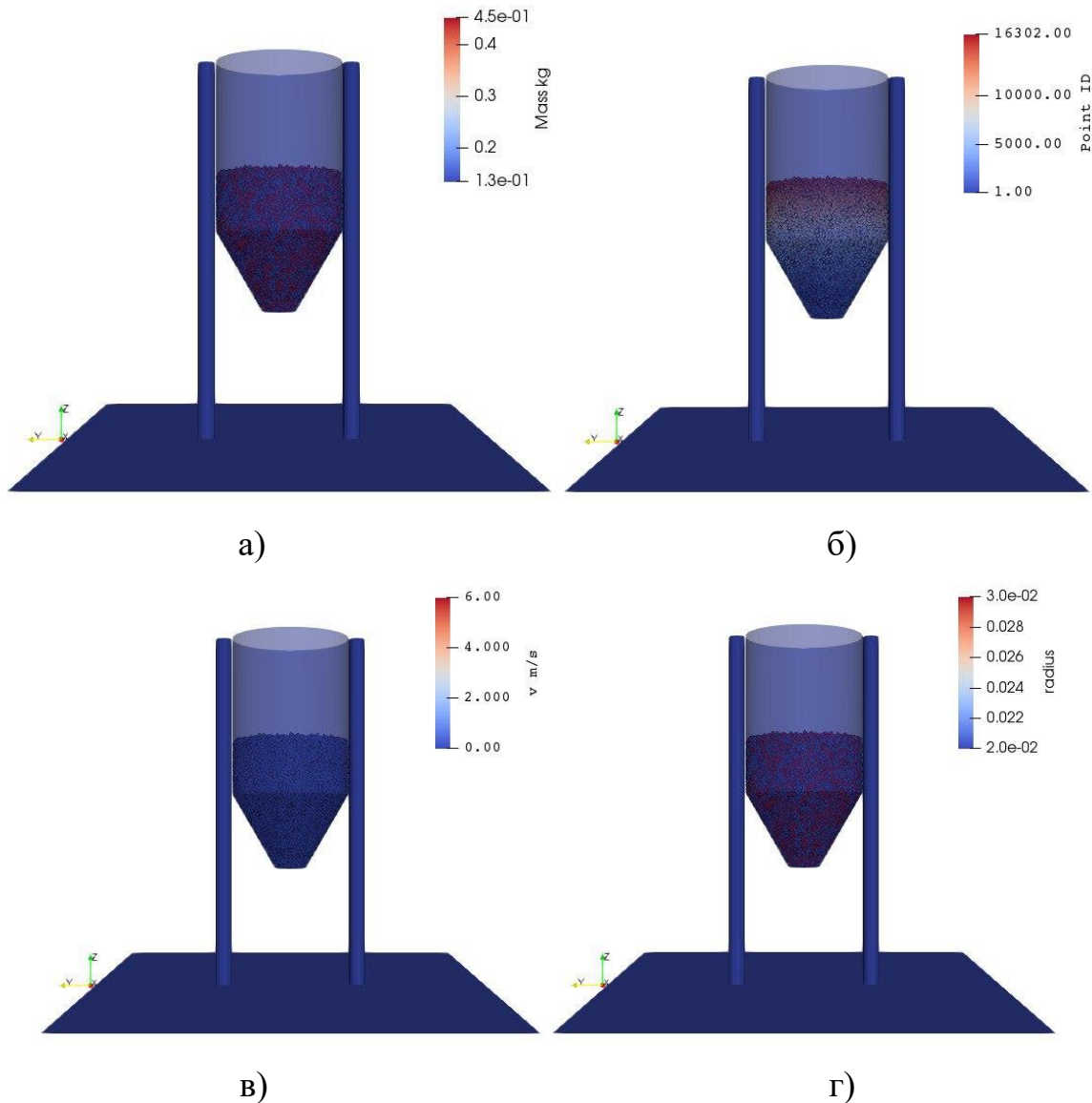


Рисунок 3.6 – Матеріал в бункері у стані спокою.

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

Після розрахунку ми можемо проаналізувати отримані результати. На рисунку 3.6 виведено стан сипкого матеріалу після завантаження та переходу у стан спокою. Задіявши розбиття по масі та радіусу частинок робимо висновок, що загальний об'єм є однорідним.

Матеріал заповнив всю конусну частину та циліндричну на третину. Знаючи об'єм бункера $0,75 \text{ м}^3$ та загальний об'єм бункера $1,76 \text{ м}^3$ можемо знайти об'єм який зайняв матеріал:

$$0,75 + \frac{1,76}{3} = 1,34 \text{ м}^3$$

Отже, матеріал щільністю 1500 м^3 та загальною вагою 1875 кг зайняв простір $1,34 \text{ м}^3$. Поділивши об'єм на вагу знайдемо насипну щільність сипкого матеріалу в бункері в стані спокою:

$$\frac{1875}{1,34} = 1399,3 \approx 1400 \text{ кг/м}^3$$

Насипна щільність 1400 кг/м^3 , що на 100 кг менше за щільність окремої частинки.

Порівнявши насипну щільність та щільність окремої частинки можемо знайти відсоткову частку об'єму яку займає повітря:

$$100 - \frac{1400 \times 100}{1500} = 6,7\%$$

Отже, повітря займає $6,7 \%$

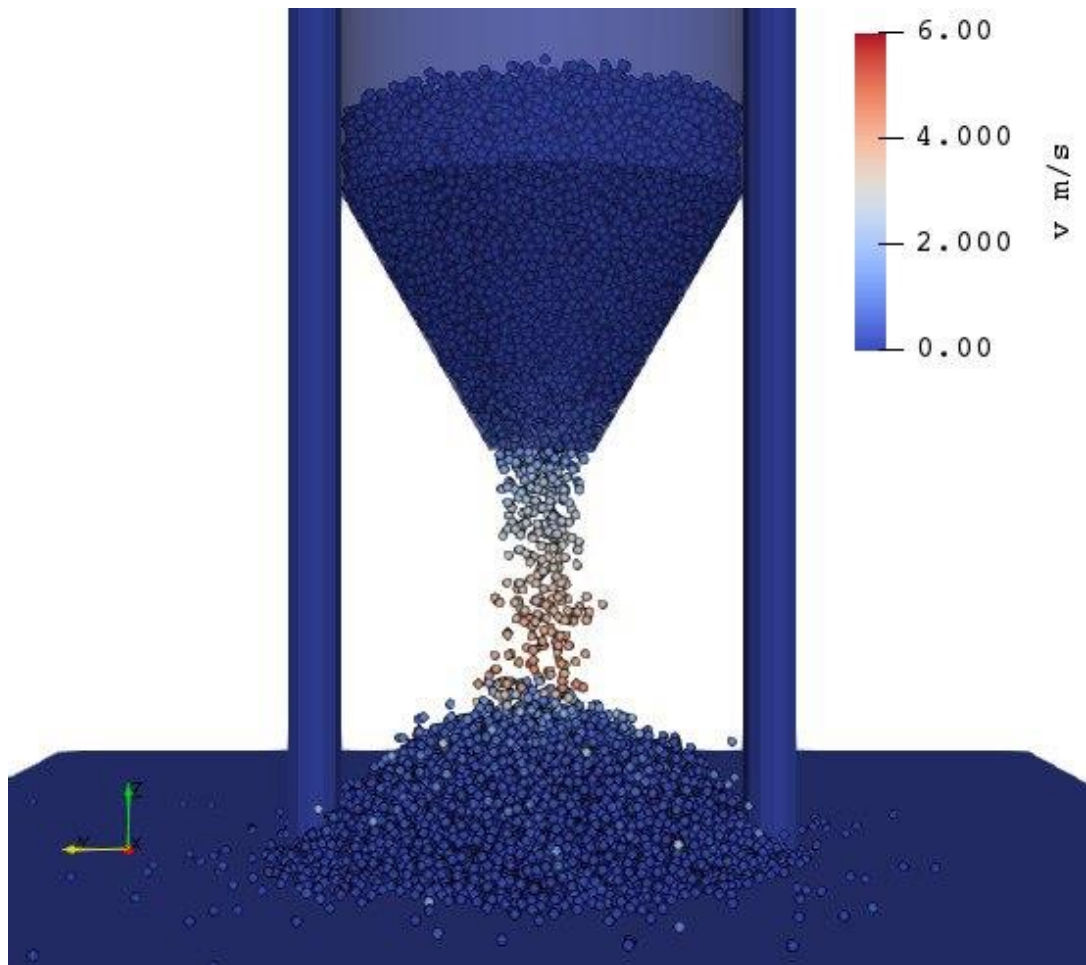


Рисунок 3.7 – Швидкість руху матеріалу під час розвантаження.

Параметр швидкості вказує на те, що відведеного часу для переходу матеріалу у стан спокою було достатньо. Розбиття по шарам заповнення знадобиться для оцінки форми розвантаження бункера.

Під час розвантаження головними параметрами, що нас цікавлять є швидкість, час та характер розвантаження. На рисунку 3.7 видно, що швидкість падіння матеріалу сягає 4 м/с. Для оцінки форми розвантаження аналізуємо рисунок 3.8, на виході з бункера видно, що у центральній частині потоку переважають частинки оранжевого кольору, а у зовнішніх шарах досі голубі. Потрапляння частинок, з верхніх шарів об'єму у нижні, можливе лише завдяки утворенню воронки. При цьому відсутня однозначна перевага у кількості яскравих частинок.

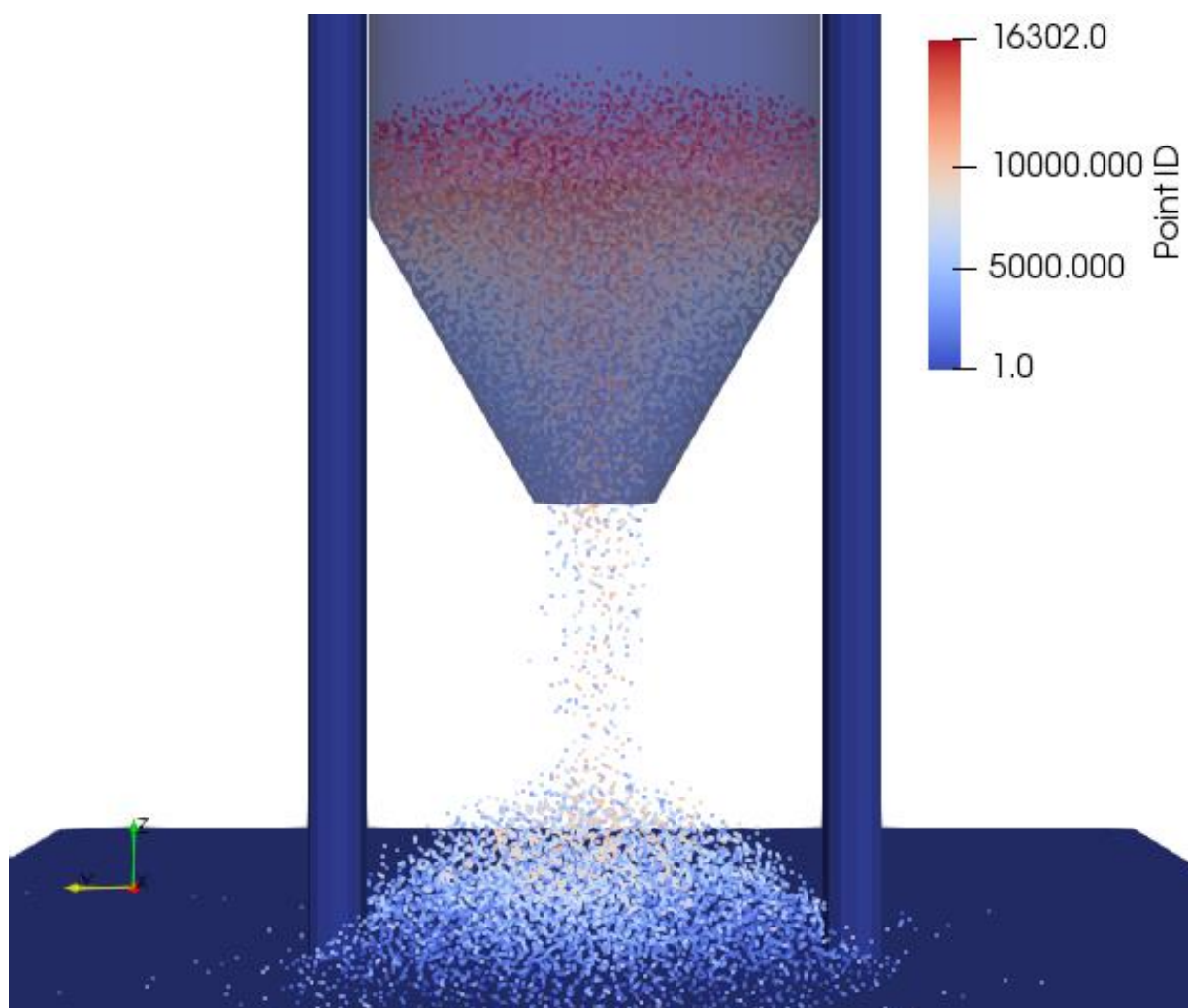


Рисунок 3.8 – Розвантаження бункера з утворенням воронки.

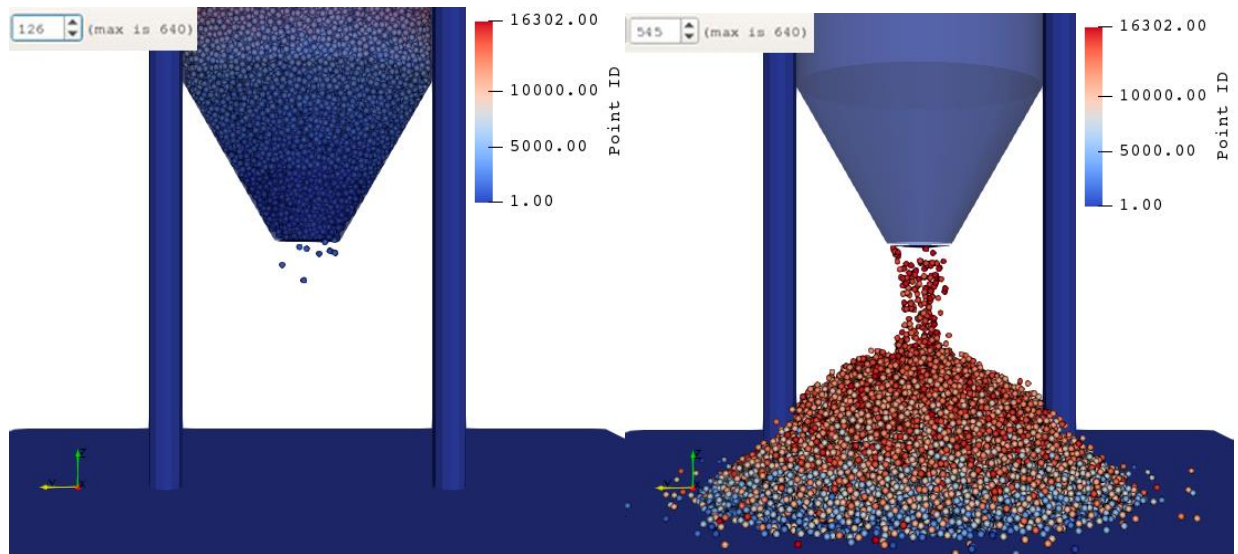


Рисунок 3.9 – Аналіз часу розвантаження.

Отже, формою розвантаження є утворення воронки зверху потоку з невеликими застійними зонами у конусній його частині.

Також за допомогою відслідковування шкали Point ID можемо проаналізувати як проходить спустошення. Розуміючи, що при заповненні бункера сипким матеріалом, програма дає кожній частинці порядковий номер по мірі заповнення, будемо графік змінення мінімального номера ID. Оскільки програма ParaView не може автоматично виконати цю побудову через несумісність певних її функцій з форматами liggghts, необхідно власноруч проводити відслідковування та заповнення таблиці в Excel.

Для точності побудови будемо проводити запис даних кожну секунду, або кожний 20-ий кадр. Перші 120 кадрів можна виключити оскільки процес заповнення та ущільнення сипкого матеріалу нас не цікавить та він не має свого відображення на шкалі Point ID.

Починаючи зі 120-го кадру інтервалом в 20 кадрів та останнім 640-им записуємо нижню границю шкали Point ID. При цьому кожного разу її оновлюючи. Оскільки на шкалі враховуються всі частинки, що в даний момент знаходяться в просторі розрахунку, необхідно забезпечити їх видалення

одразу після виходу з бункера. Це досягається шляхом зменшення зони розрахунку та видалення підлоги (рис 3.10).

Після повторного розрахунку та проведення аналізу зміни нижньої границі шкали Point ID будуємо графік утворення застійних зон та воронки.

Опираючись на цей графік ми зможемо проаналізувати етапи розвантаження бункера, утворення застійних зон та воронки (рис 3.11).

Загальний час розвантаження дізнаємось шляхом знаходження порядкового номера кадра на початок розвантаження та його кінець (рис. 3.9). Знаючи кількість кадрів в секунді, знаходимо загальний час – 20,95 секунда.

При такій конфігурації бункера утворюються застійні зони та воронка у центрі бункера. Обидва фактори є негативними.

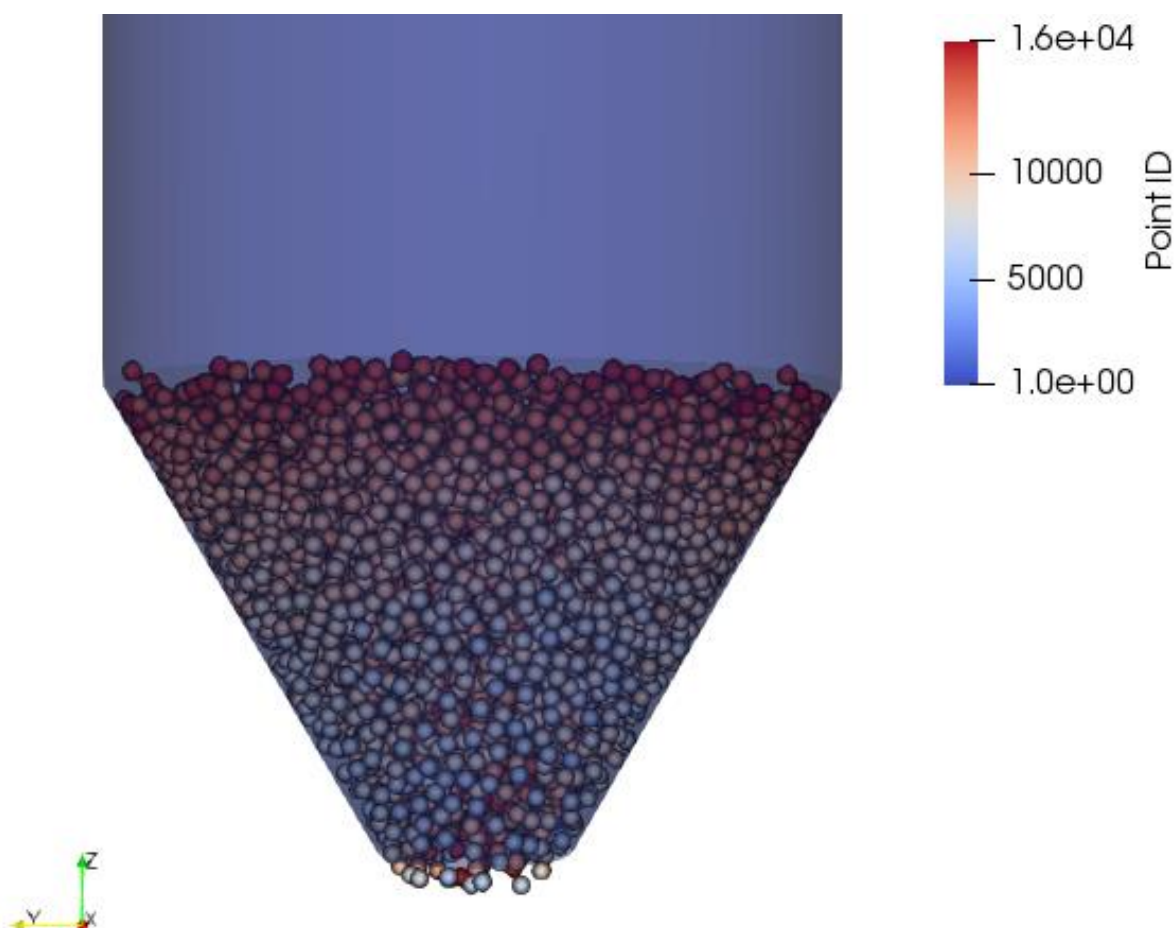


Рисунок 3.10 Моделювання зі зміненою зоною розрахунку



Рисунок 3.11 Графік руху застійних зон

Застійні зони утворюються за рахунок великої сили тертя матеріалу о стінки конусної частини, що гальмує матеріал. Такі застоювання можуть призвести до налипання матеріалу на стінки бункера збільшивши вірогідність склепінь та гальмуючи рух матеріалу. Також у випадку коли сипкий матеріал є швидкопсувним, він може почати гнити у застійних зонах зіпсувавши весь об'єм матеріалу.

Воронка є основним шляхом плинності матеріалу. Її недоліком є низька продуктивність, оскільки в ній, через значну рухливість частинок одна відносно одної, велика кількість пустот. Через це, швидкість розвантаження значно знижується.

4 АНАЛІЗ ЗМІНЕННЯ ПОТОКУ ПРИ РІЗНИХ КОНФІГУРАЦІЙ БУНКЕРА

4.1 Бункер квадратного профілю

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 бункера 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 4.1). Площа перерізу бункера та вихідного отвору є такими ж як і у бункера з розділу 3. Властивості сипкого матеріалу збережені (рис 4.2). Для пришвидшення розрахунків було прийнято рішення виключити з моделювання опори та підлогу. Це збільшило швидкість розрахунки в три рази

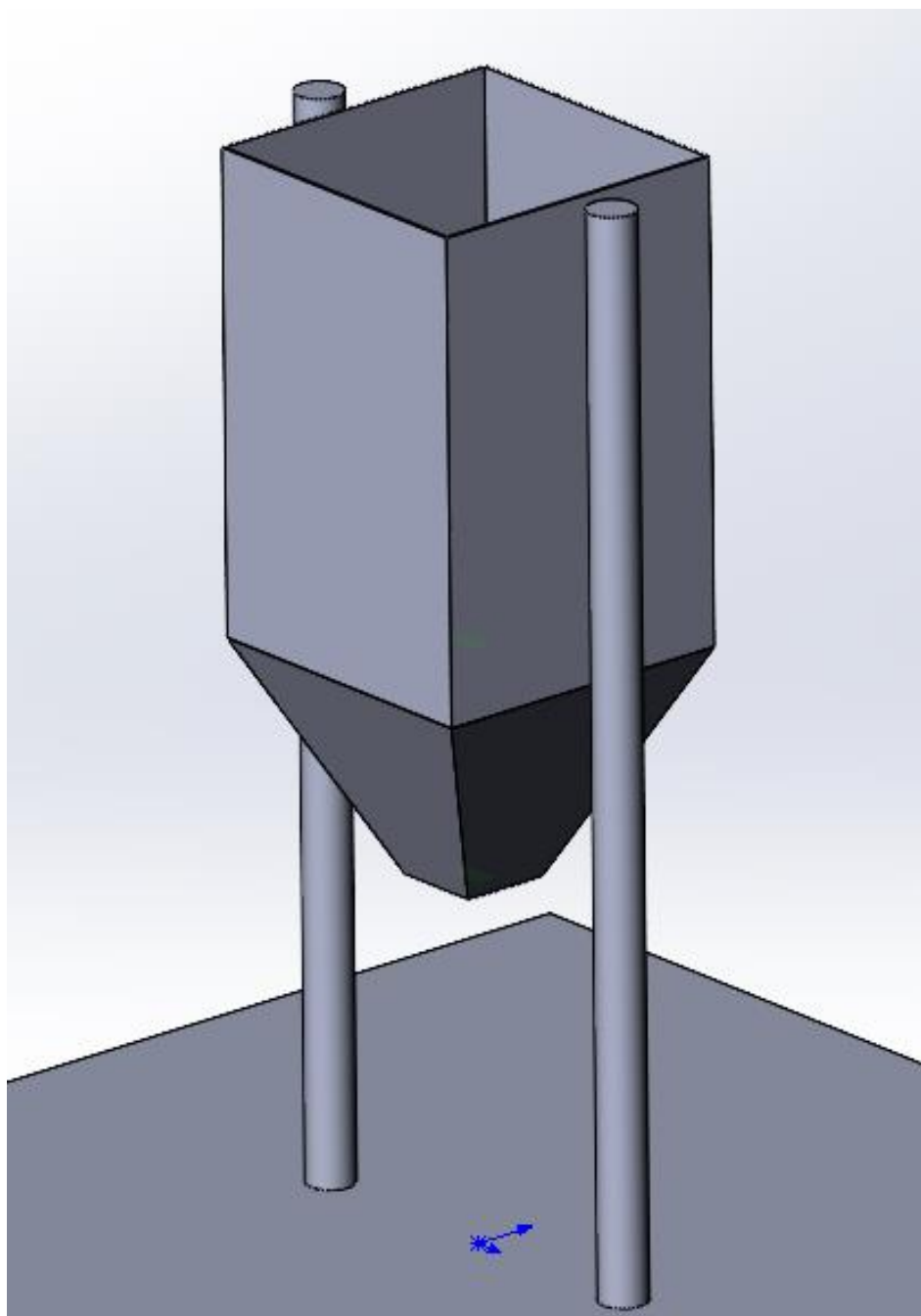
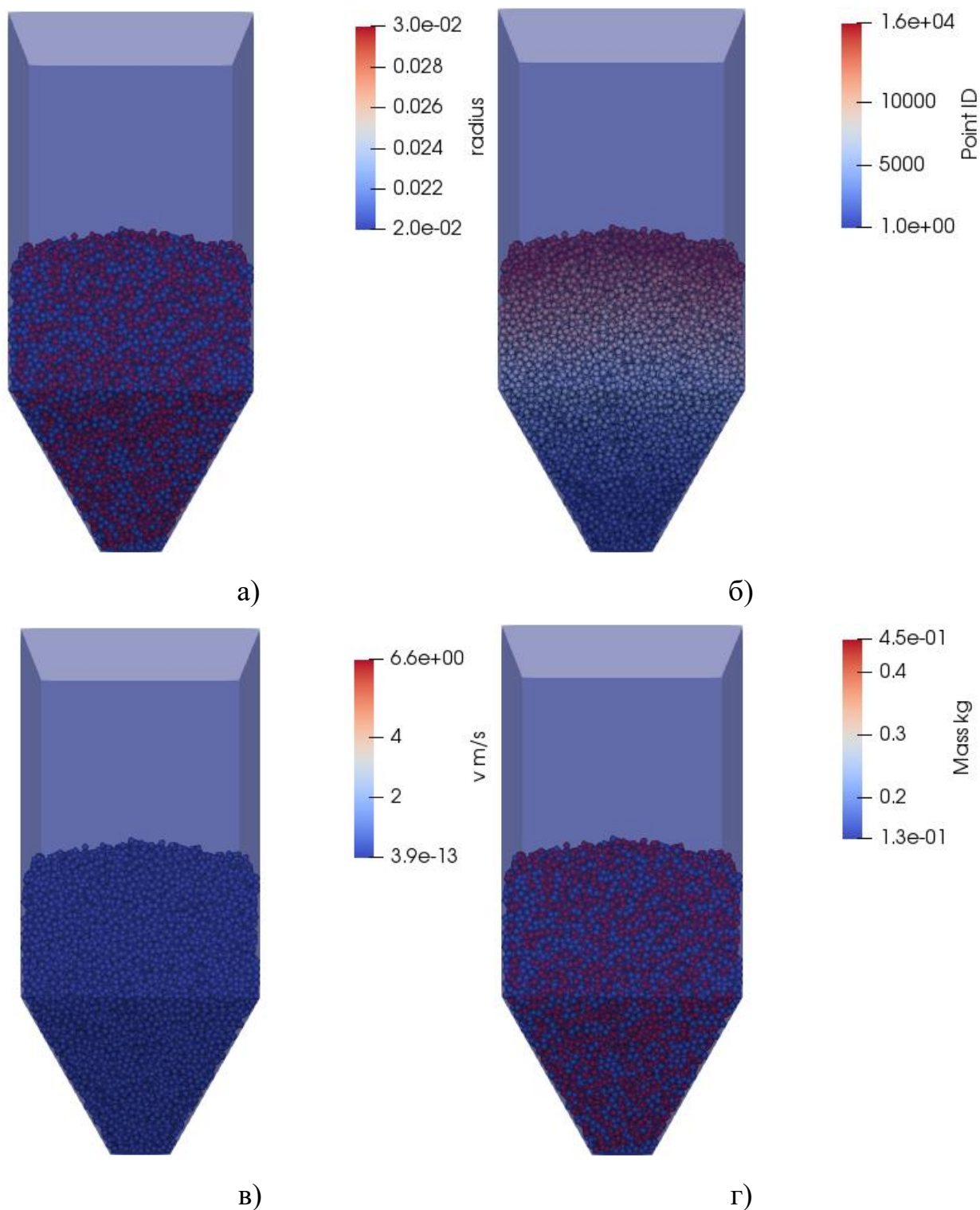


Рисунок 4.1 – Бункер квадратного профілю



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

Рисунок 4.2 – Матеріал в бункері квадратного перерізу у стані спокою.

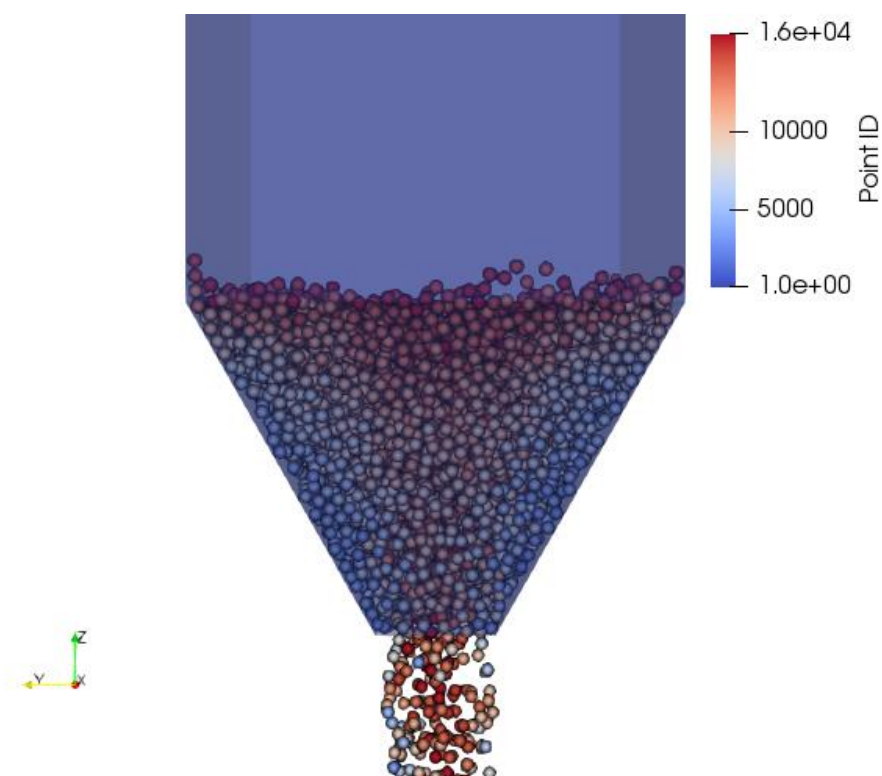


Рисунок 4.3 – Розвантаження бункера квадратного профілю з утворенням воронки.



Рисунок 4.4 – Графік руху застійних зон

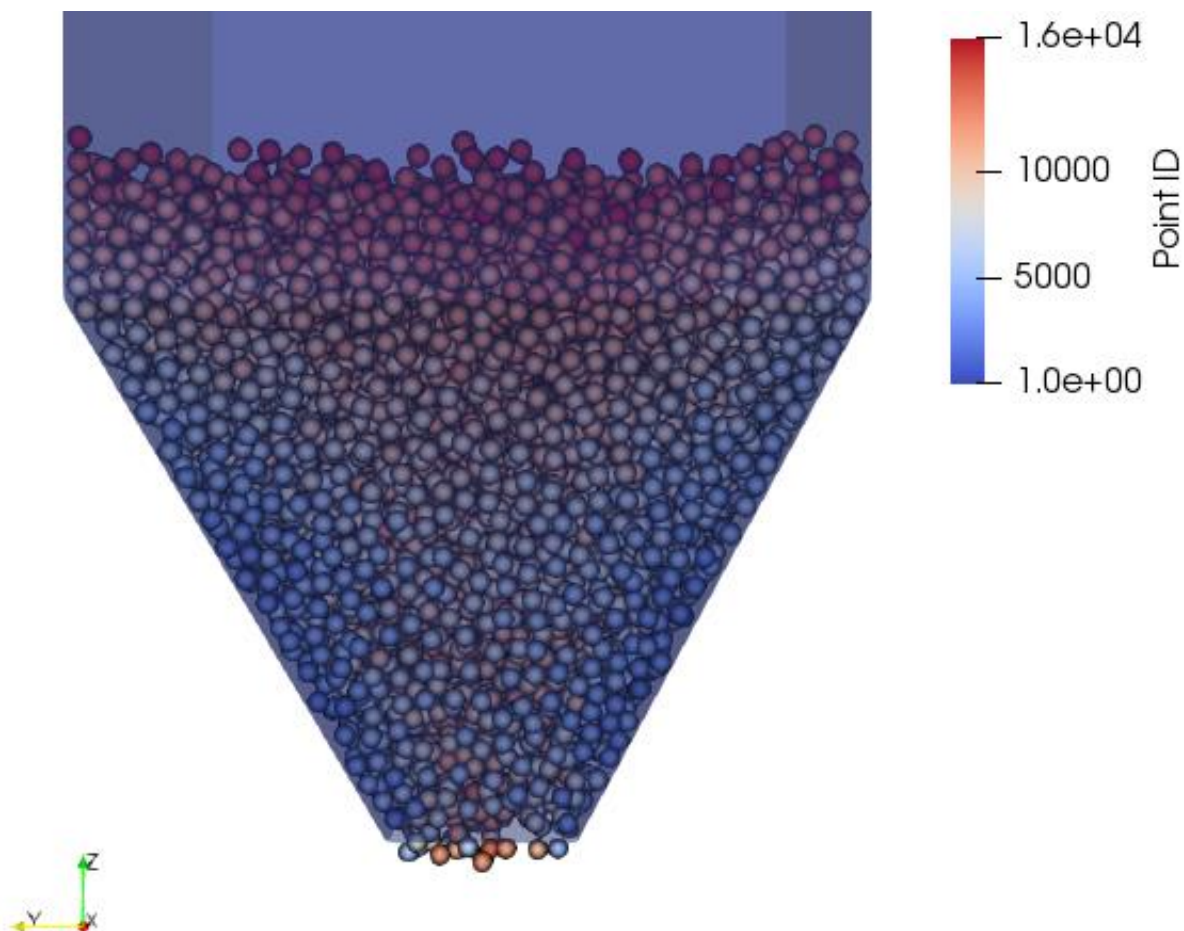


Рисунок 3.5 Моделювання зі зміненою зоною розрахунку

Як і у випадку з круглим бункером, розвантаження відбувається з утворенням воронки (рис 4.3). Але у цьому випадку воронка є більш вираженою, а застійні зони знаходяться вздовж граней пірамідальної частини і рухаються значно повільніше (рис 4.4). 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.

4.2 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° до 105° (рис. 4.6) Як видно з моделей, кут нахилу також сильно впливає на загальний об'єм бункера.

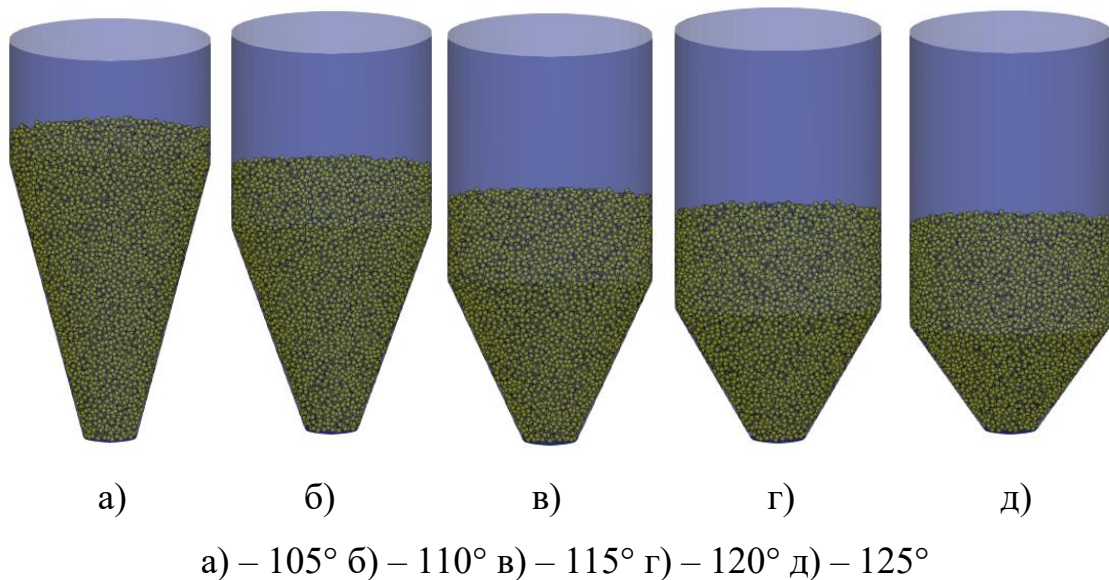


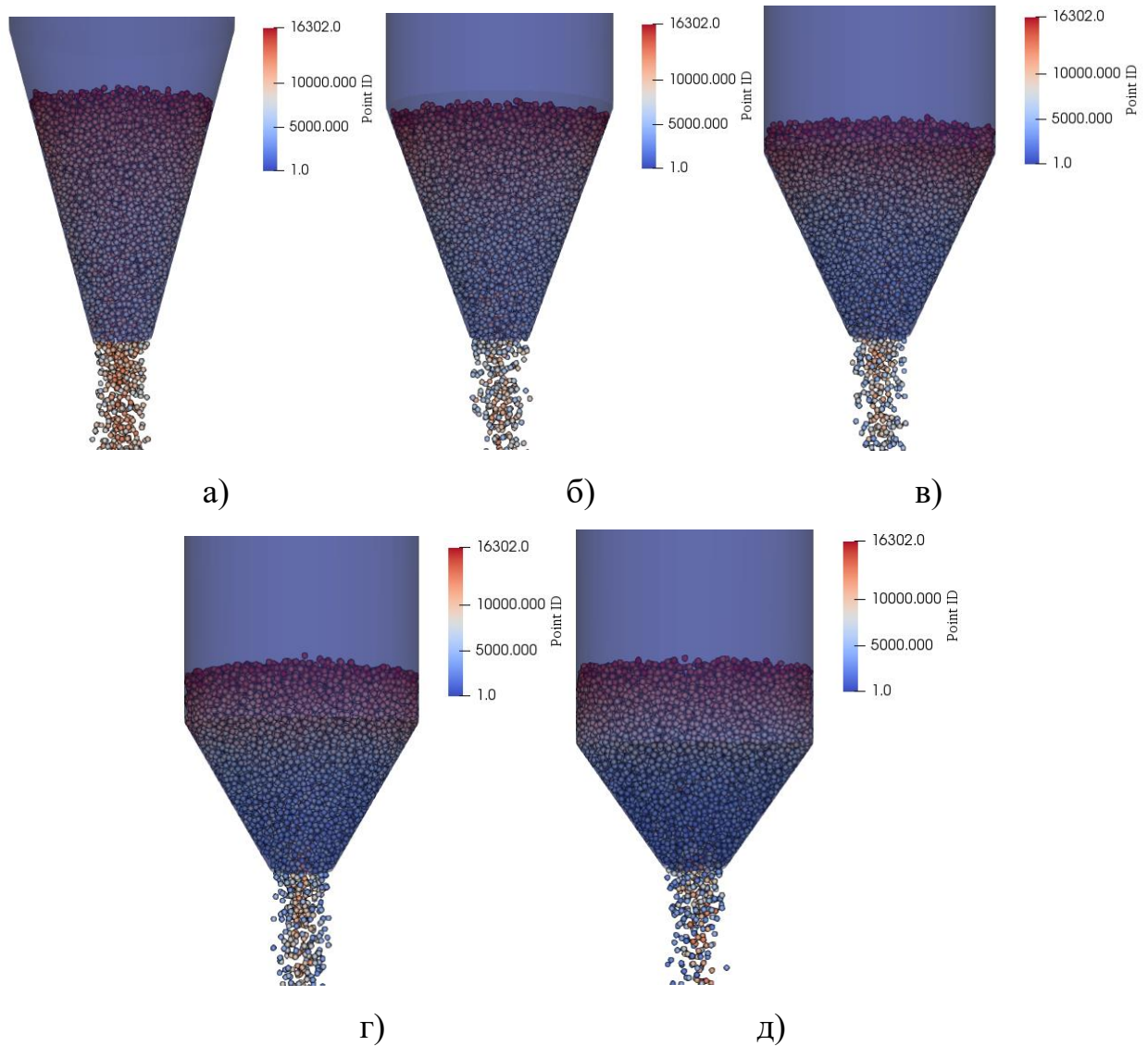
Рисунок 4.6 – Прийняті кути нахилу стінки конусної частини для розрахунку.

В результаті ми отримуємо залежність часу спустошення бункера.

При порівнянні бункерів різних конфігурацій (рис 4.7), 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 4.1 – 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°

Рисунок 4.7 – Порівняння різних бункерів на один момент часу

Побудуємо графік руху застійних зон.

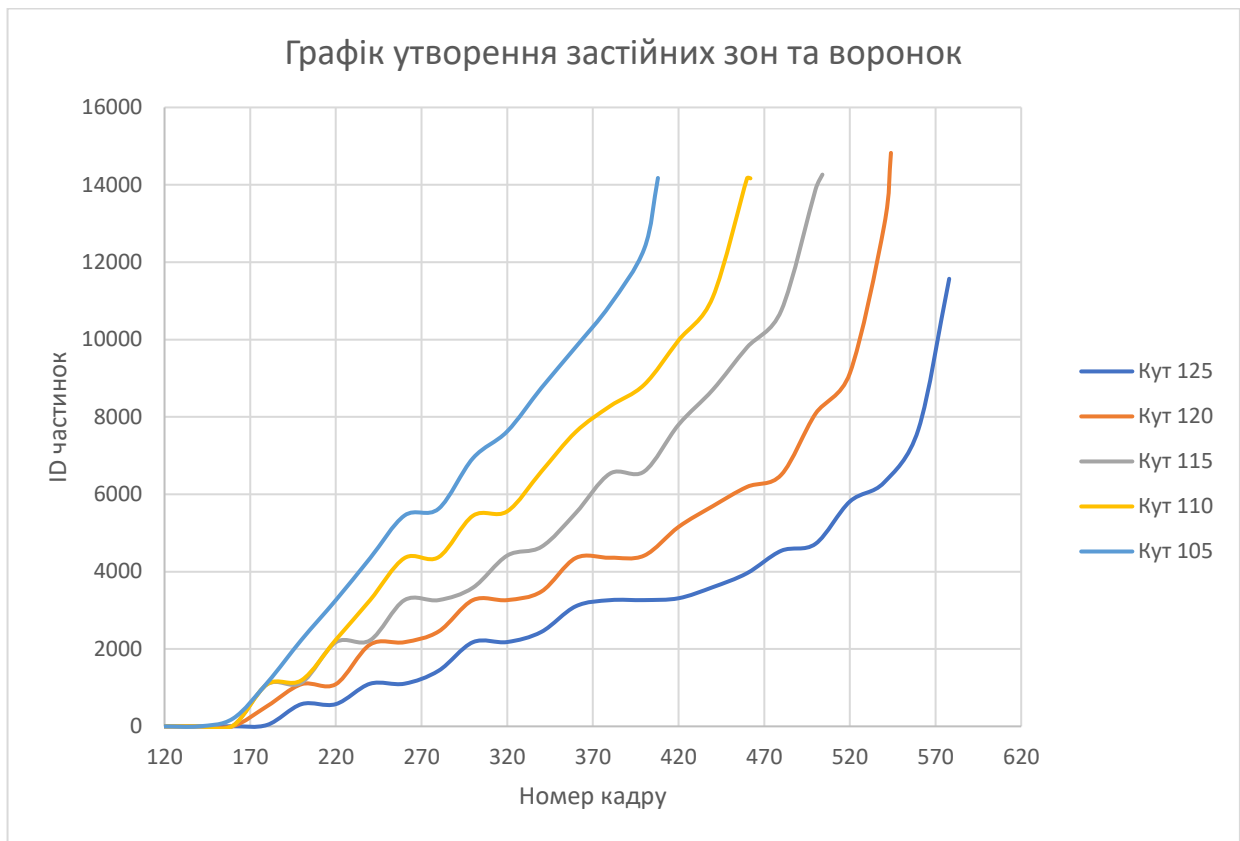


Рисунок 4.8 – Графік утворення застійних зон та воронок

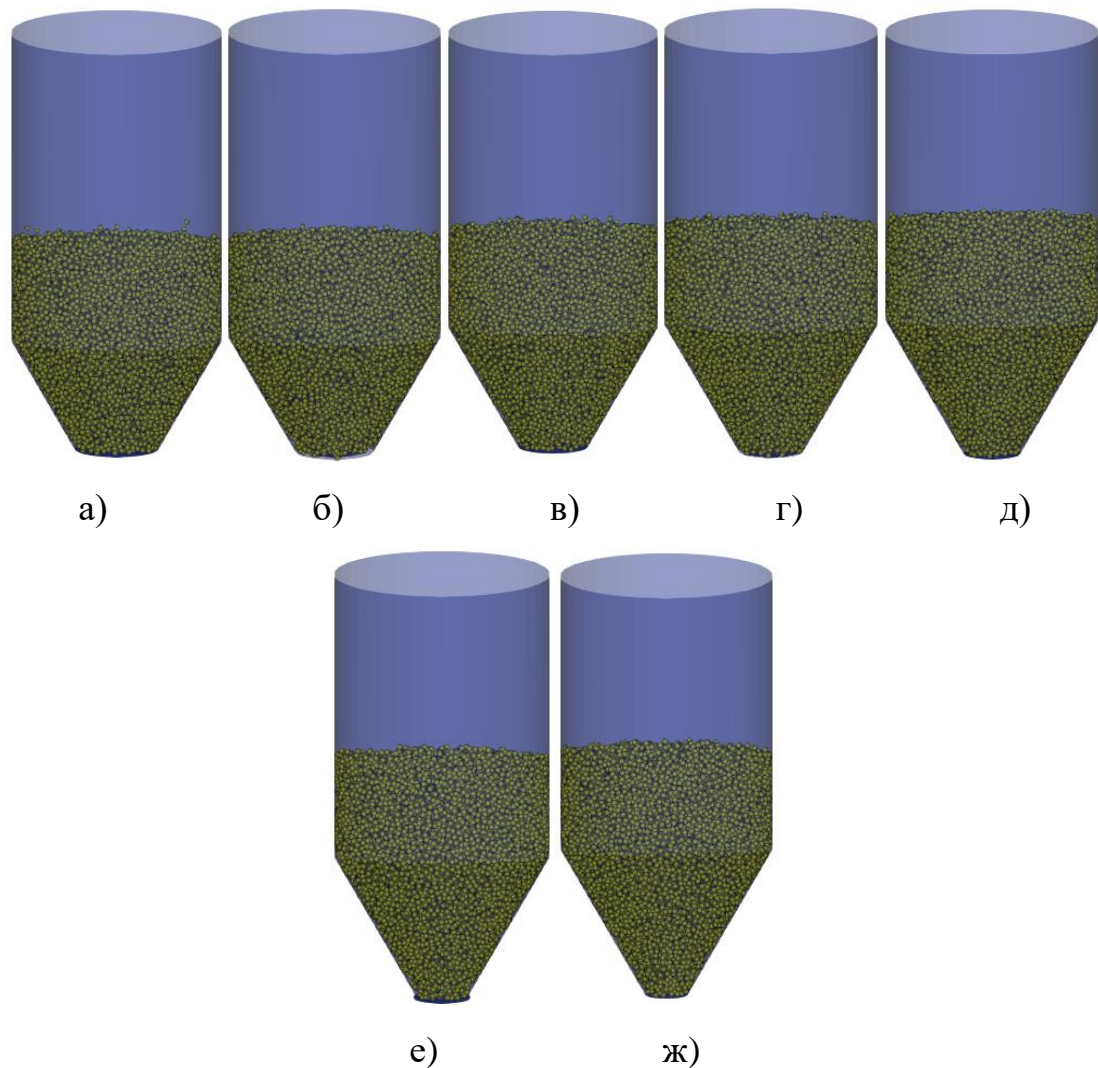
На графіках добре видно, що зі збільшенням кута збільшується і час спустошення бункера. Також прослідковується тенденція нерівномірного зростання найменшого ID частинки. Це пов'язано з тим, що при великих кутах нахилу, значно збільшуються застійні зони і розміри воронки, і частинки з нижніх шарів залишаються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

4.3 Вплив розміру вихідного отвору на швидкість розвантаження.

Розмір вихідного отвору більш за все впливає на швидкість плинущу 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 4.9 – 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. 4.9).

Таблиця 4.2 - 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

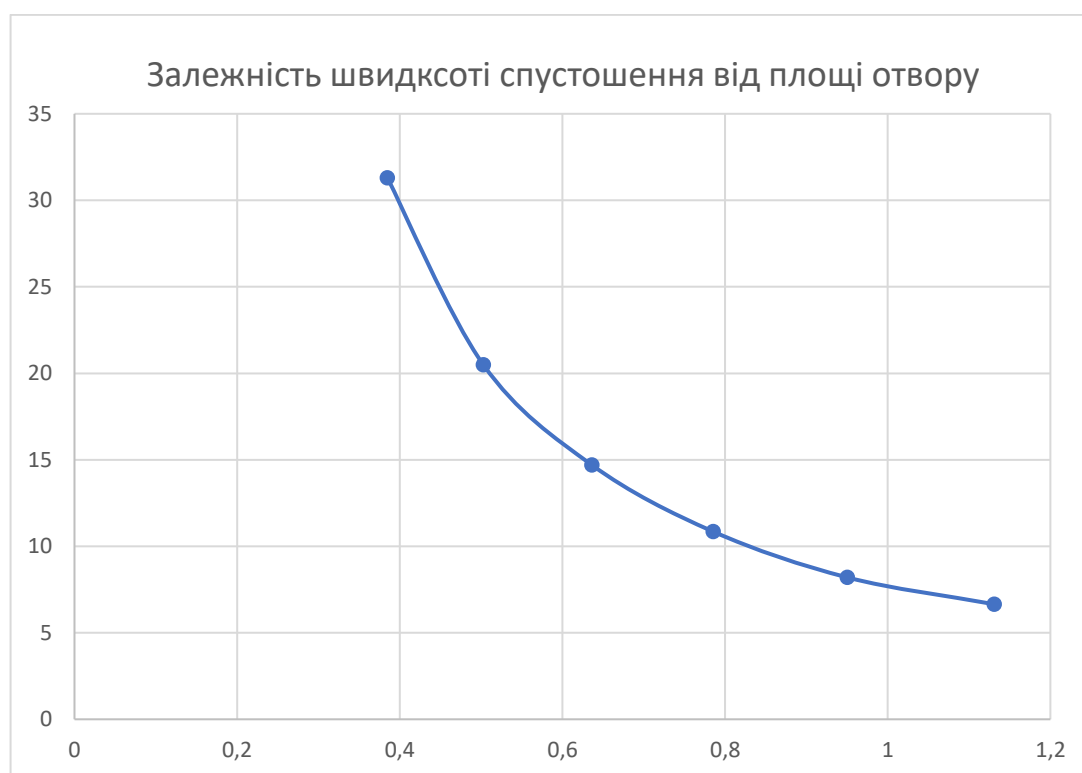


Рисунок 4.10 – Графік залежності швидкості спустошення бункера від площі отвору.

Як видно на графіку (рис. 4.10), 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. 4.2).

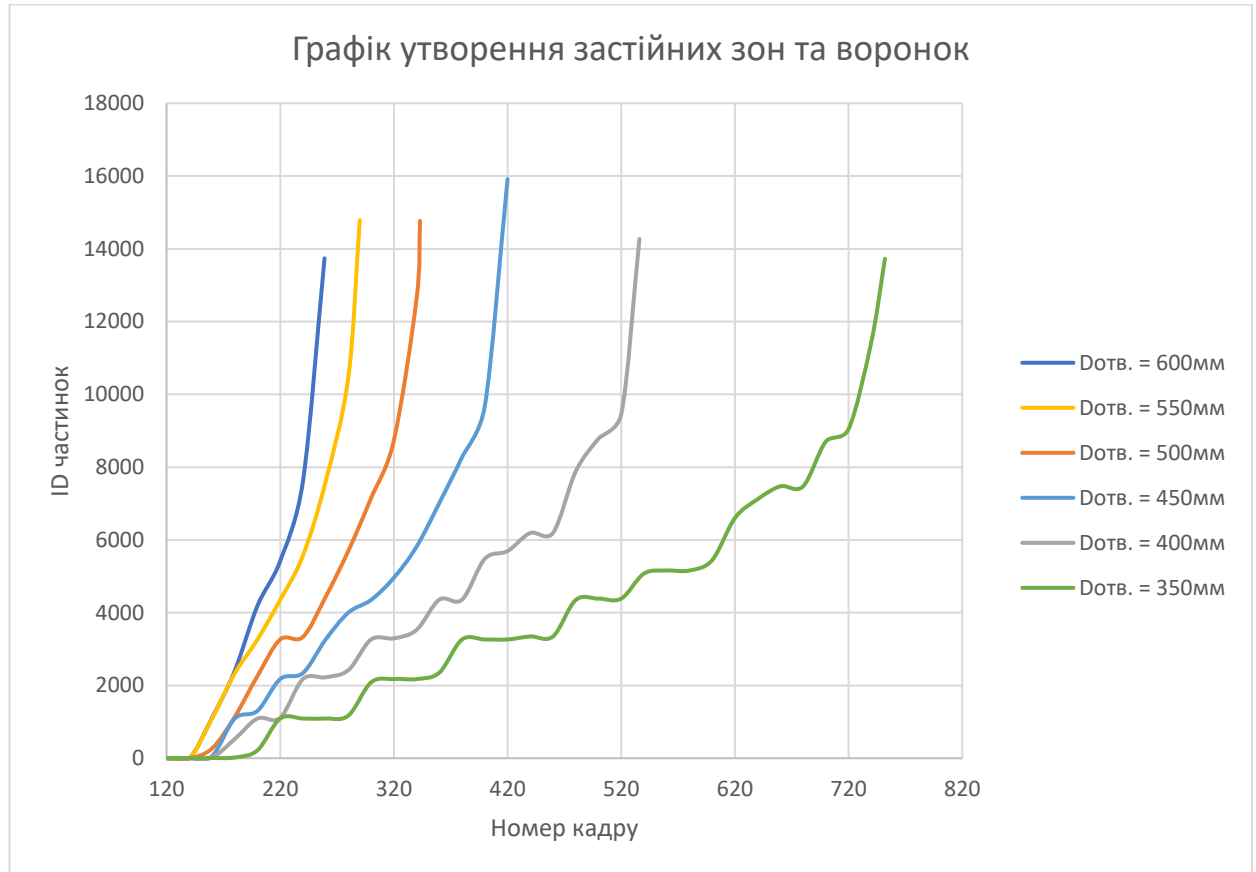


Рисунок 4.11 – Графік утворення застійних зон та воронкок

Графік на рисунку 4.11 показує утворення застійних зон при різних діаметрах отвору та час застоювання шарів матеріалу в них. Цей графік додатково до рисунку 4.10 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° 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.

5 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ

5.1 Елемент-бар'єр в центральній частині бункера

В попередніх дослідженнях було виявлено негативний вплив застійних зон та воронки на швидкість плинину матеріалу з бункера. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано додати в центр потоку конструкційний бар'єрний елемент для змінення напрямку потоку частинок з центральної зони до бокових стінок (рис 5.1). Очікується, що у такий спосіб буде зменшено розміри застійних зон та пришвидшено спустошення бункера.

Для цього було додано у центр бункера бар'єр.

Його діаметр визначався за формулою:

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

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

A_T – площа міделового перерізу частинки сипкого матеріалу;

A – площа перерізу потоку.

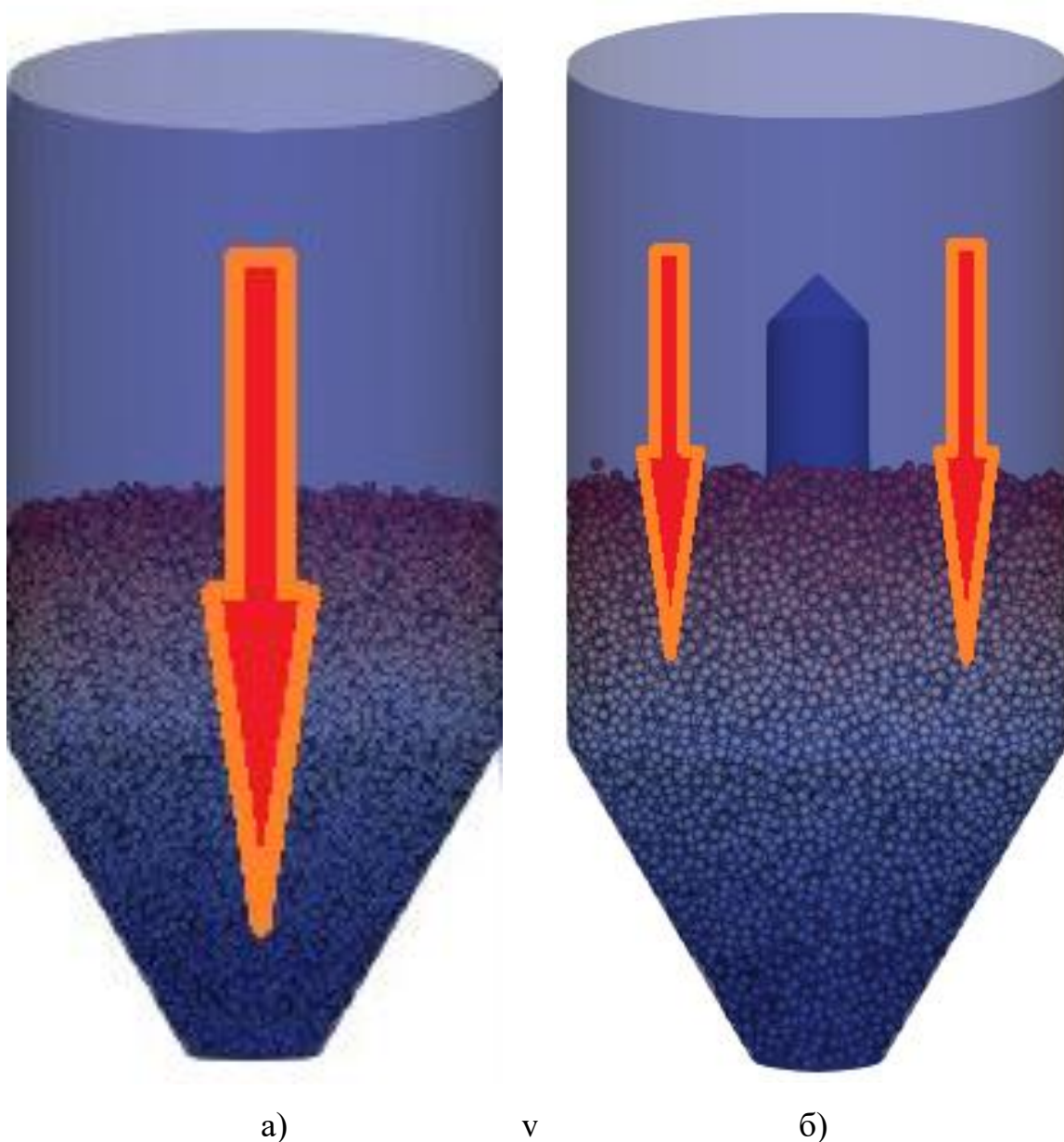
$$A_0 = 0.088 \text{ м}^2$$

$$R = 167 \text{ мм}$$

Для розрахунку приймаємо $D = 300 \text{ мм}$.

Для початкового розрахунку висота елемента була обрана $L=1500 \text{ мм}$ та додаткові два конуси зверху та знизу.

На графіку (рис. 5.2) наведено порівняння етапів спустошення бункера з бар'єр обладнанням, та без нього. Без додаткового обладнання в другій половині графіку є помітне зниження руху в застійних зонах, це пов'язано з остаточним формуванням воронки та займанні нею більшої частини всього вихідного потоку.



а) – рух потоку без бар'єрного елемента; б) – рух потоку з бар'єрним елементом.

Рисунок 5.1 – Зміна напрямку потоку в бункері

При використанні додаткового обладнання рух в застійних зонах залишається стабільним протягом всього часу. Хоча уникнути впливу воронки не вдалося, проте завдяки зміні її напрямку, застійні зони, у другій частині були зменшені.

Першим етапом, для визначення оптимальної форми центрального елемента, необхідно виявити вплив його висоти на потік сипкого матеріалу.

Для цього проведемо додаткові два експерименти в тих же умовах але з висотою центрального елемента 1000 та 500 мм. (рис 5.3).

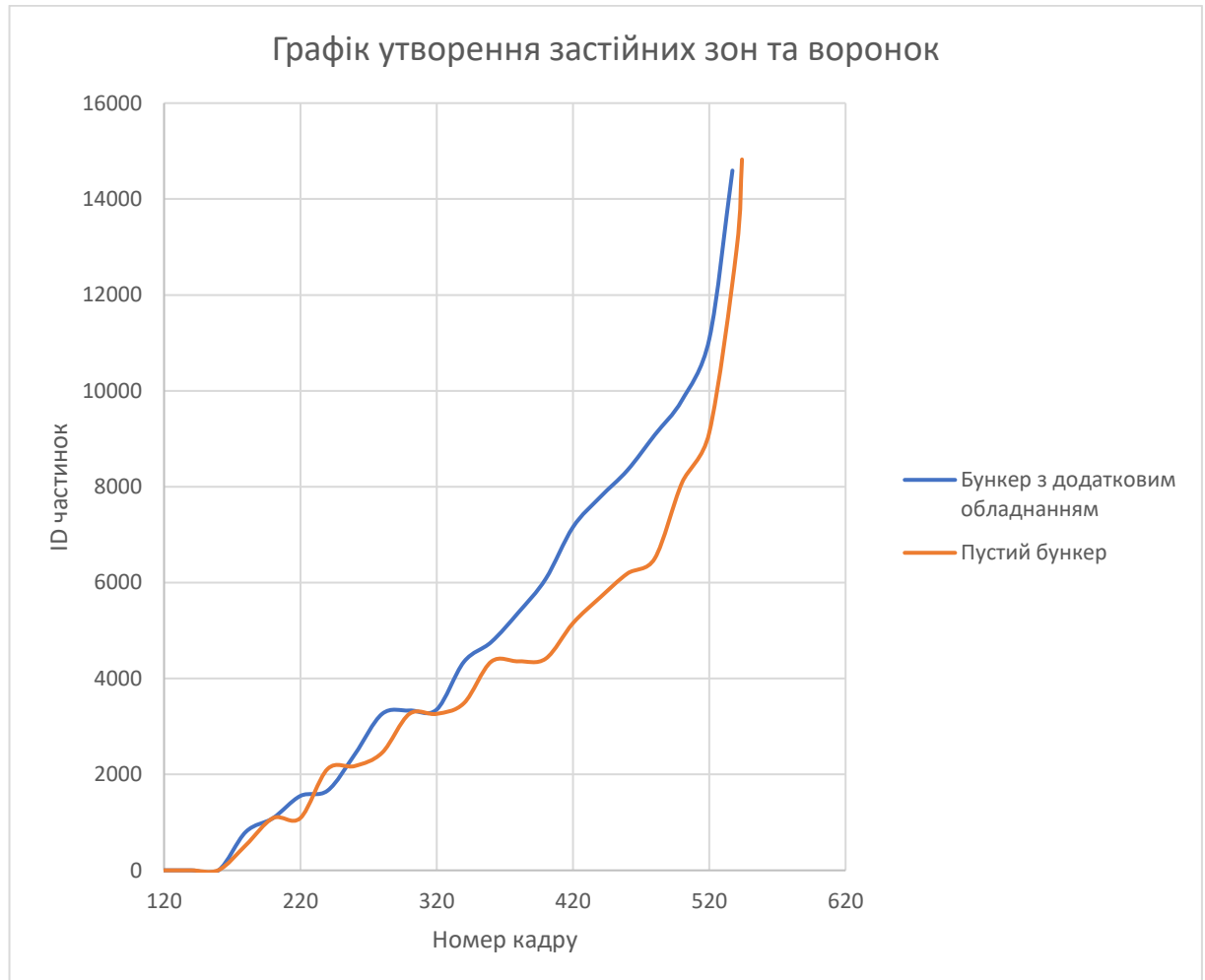


Рисунок 5.2 – Зміна утворення застійних зон

Сам елемент розташовується внизу циліндричної частини так, щоб звужування нижнього конуса починалось одночасно зі звужуванням конусної частини бункера.

За результатами нових моделювань та при порівнянні їх з початковими даними (рис 5.4) стає зрозуміло, що висота не впливає на потік і головним фактором є розташування елемента.

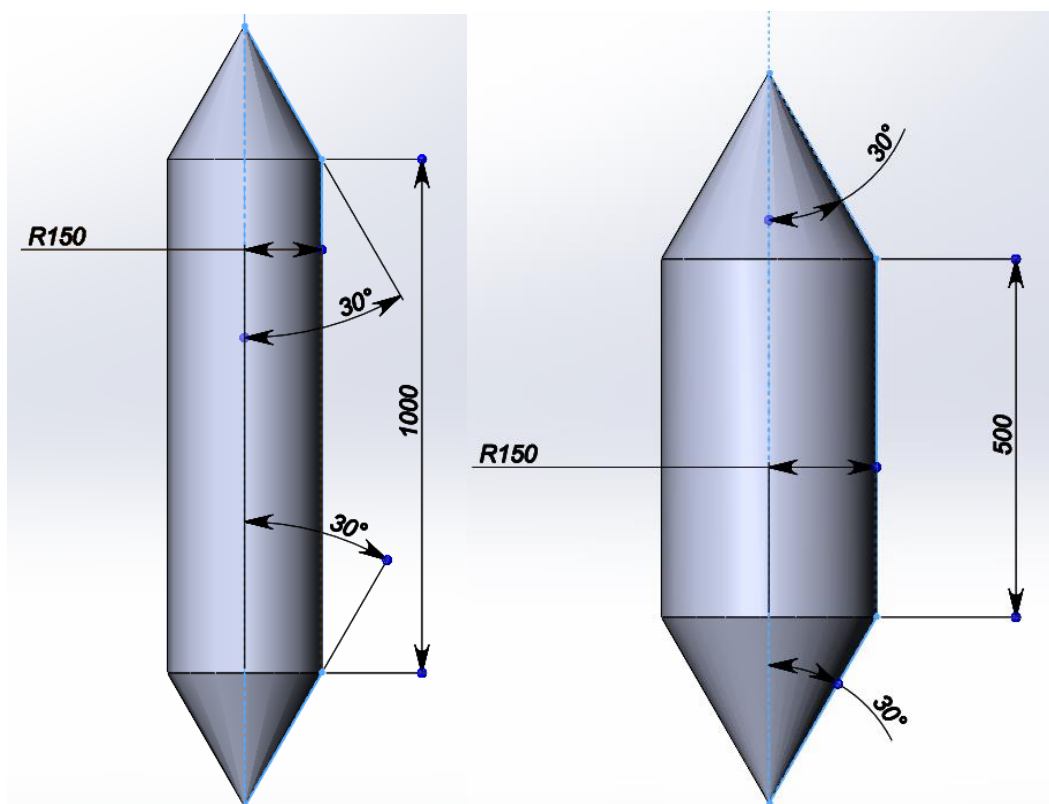


Рисунок 5.3 – Конструктивні варіації бар'єрного елемента для додаткових досліджень.

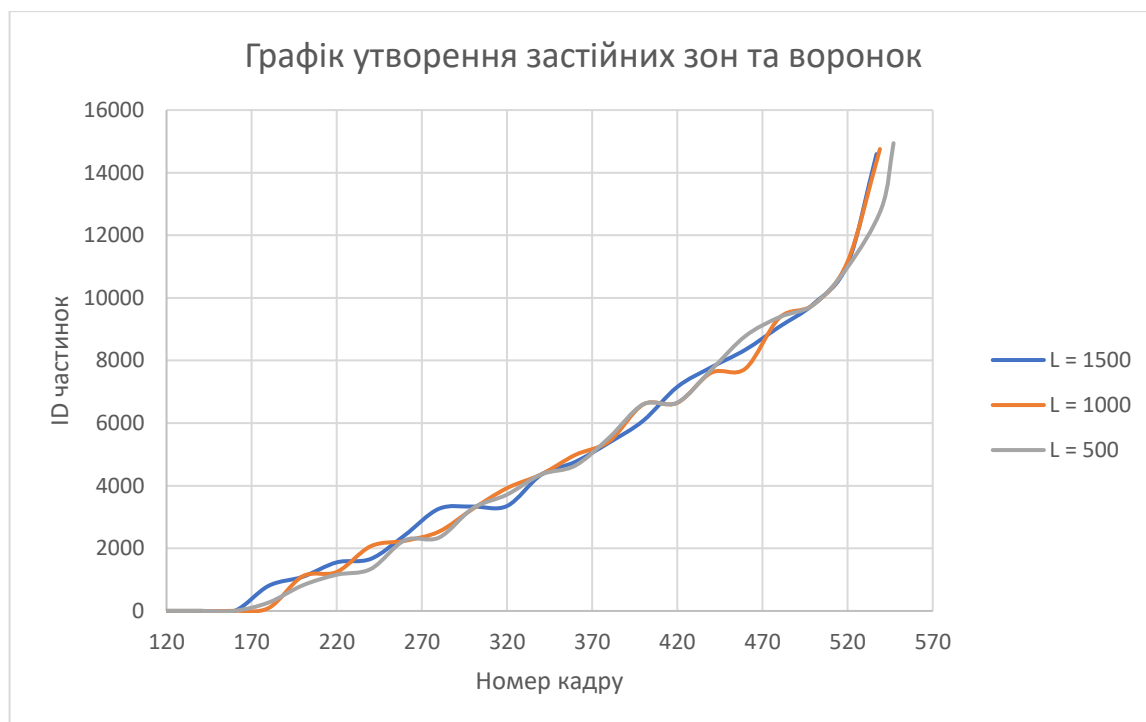
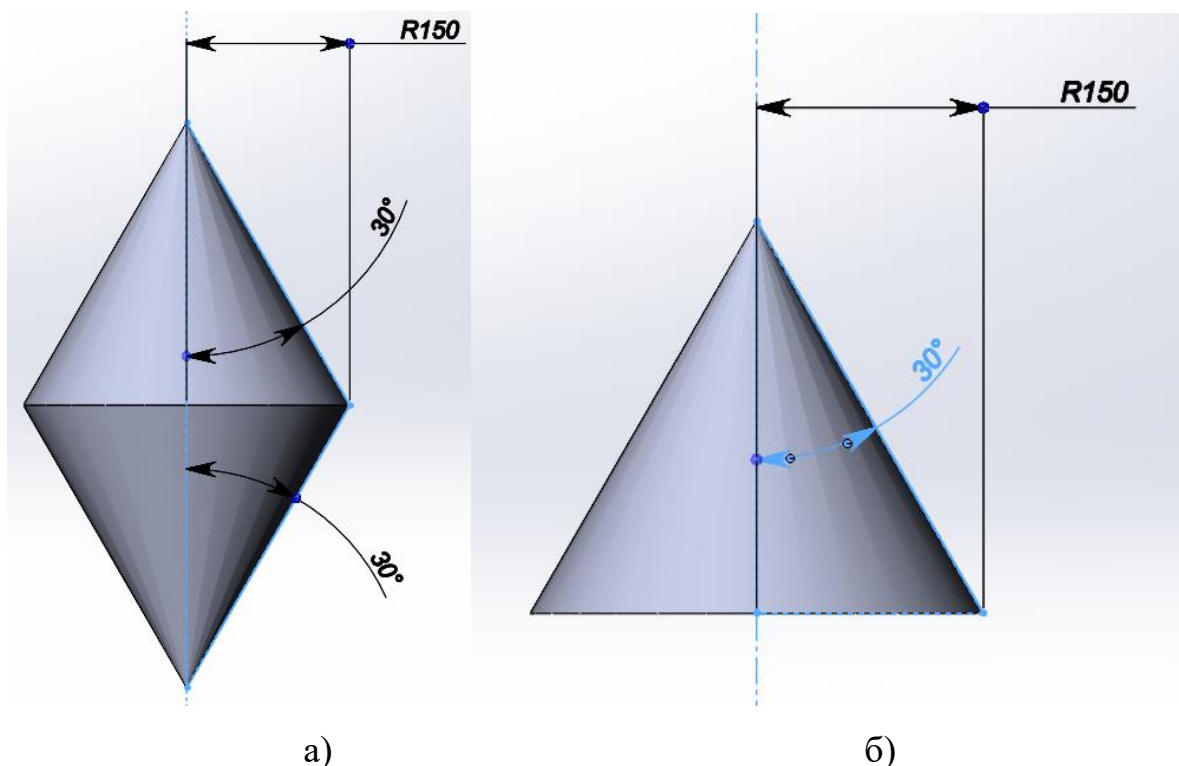


Рисунок 5.4 – Графік змінення застійних зон при різній висоті бар'єрного елемента.



а) – ромбо-подібний; б) – конусний.
а) – ромбо-подібний; б) – конусний.

Рисунок 5.5 – Додаткові конструкції центрального елемента.

Оскільки всі три варіації дали однакий результат, було прийнято рішення у наступних експериментах видалити центральну циліндричну частину і залиши лише конуси.

Тож у наступних експериментах необхідно дослідити елементи з ромбо-подібний вертикальним перерізом та конусним (рис 5.5).

Для аналізу результатів порівняємо їх з пустим бункером та елементом з циліндричною частиною (рис 5.6).

У порівнянні з пустим бункером обидва варіанти показали кращі результати, хоч конусний елемент виявився гіршим за ромбо-подібний. Якщо ж порівнювати їх з елементом, що мав додаткову циліндричну частину висотою 500 мм., то навіть ромбо-подібний показав трошки гірши результати. Хоча при урахуванні економії ємності бункера та не значного погіршення результатів, він може стати гарною альтернативою.

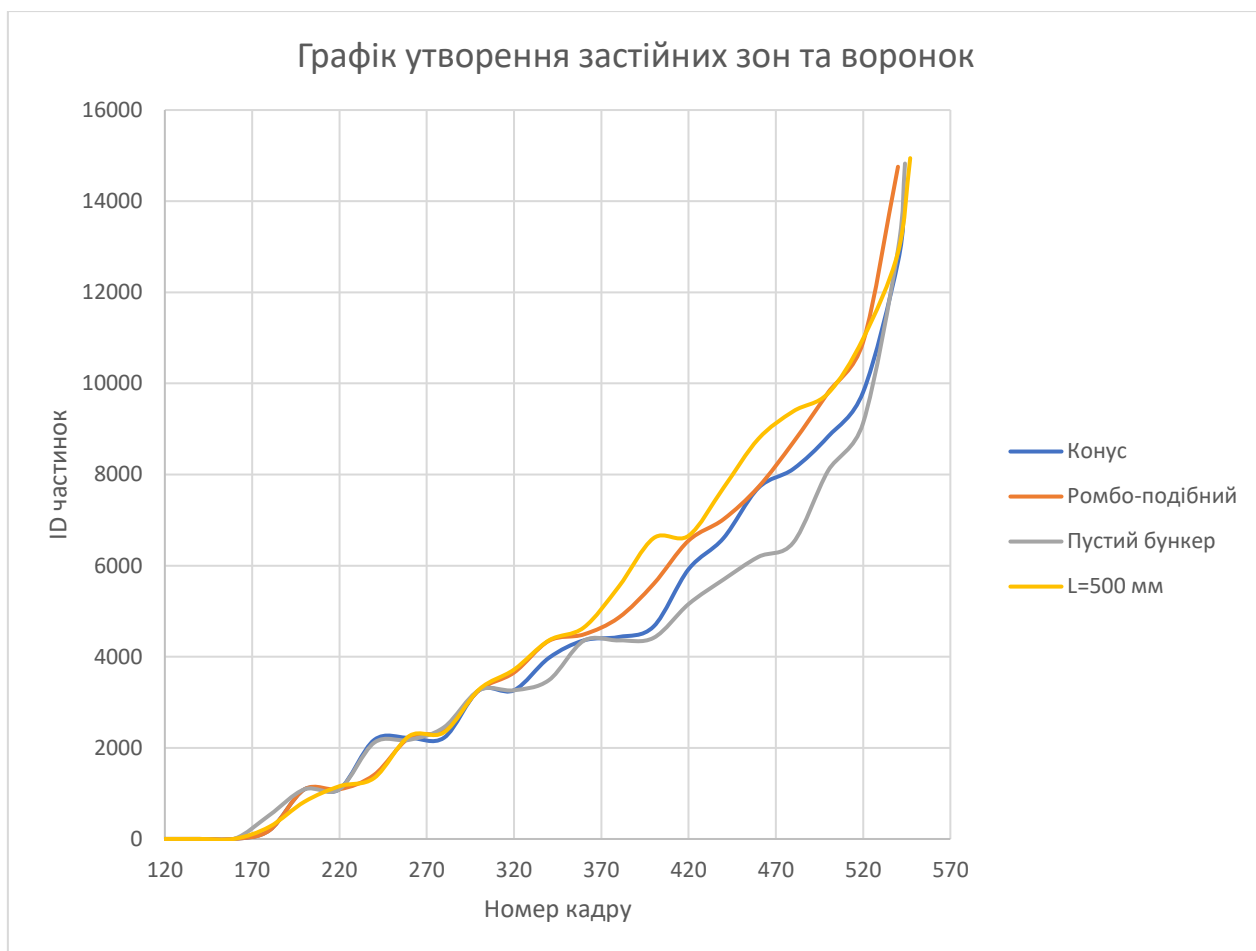


Рисунок 5.6 – Порівняння результаті

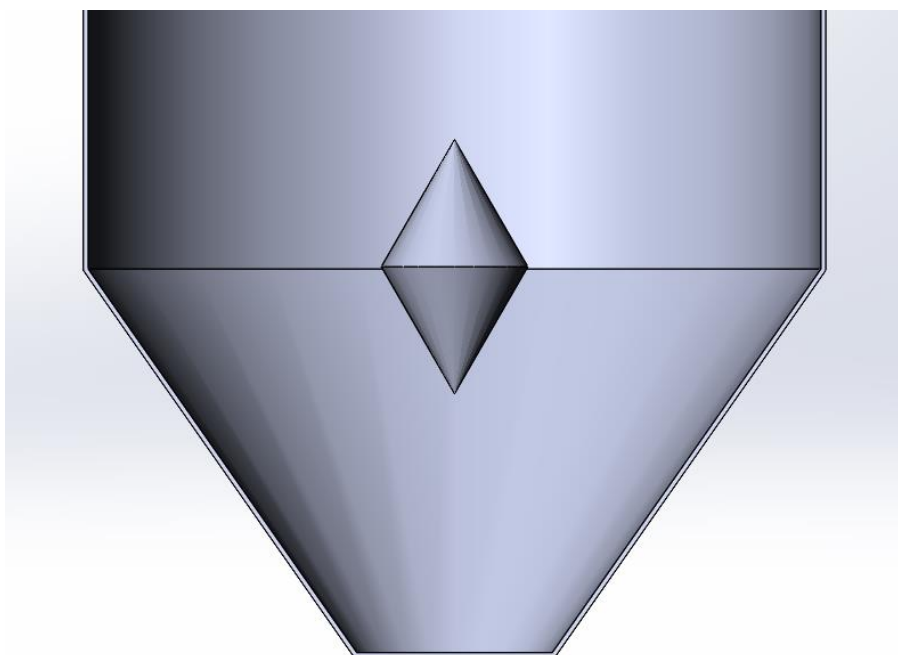


Рисунок 5.7 – Розташування ромбо-подібного елемнту в бункері

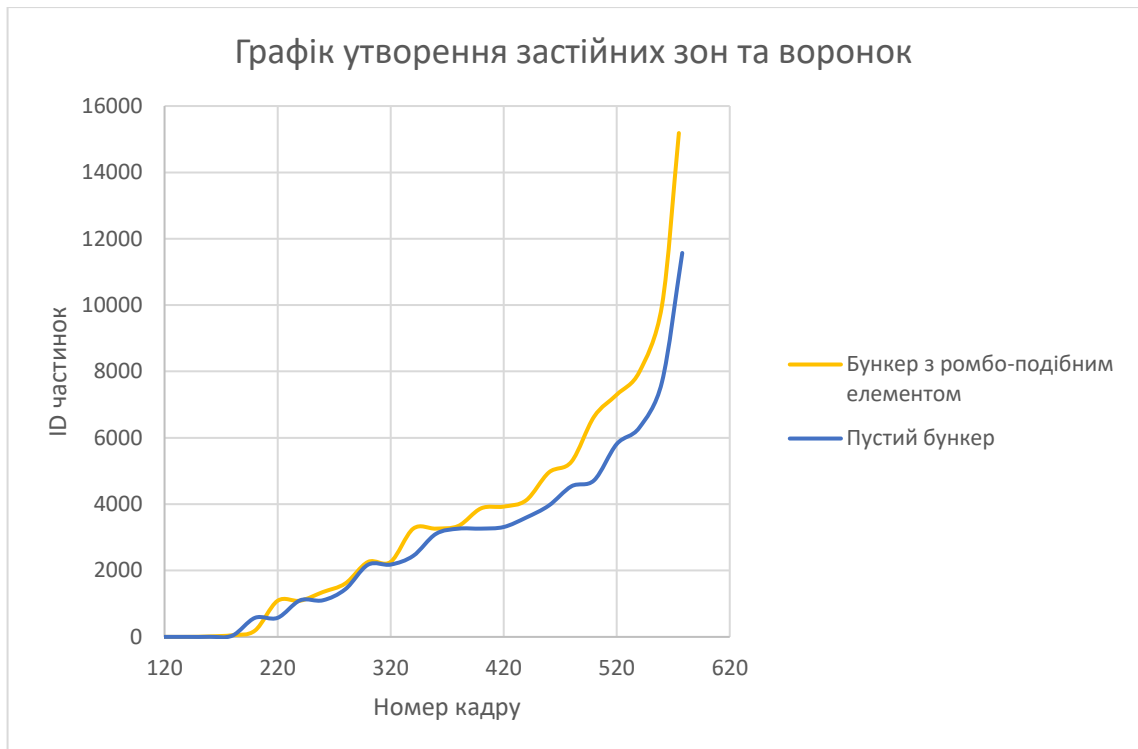


Рисунок 5.8 – Ромбо-подібний елемент у бункері зі збільшеним кутом нахилу конусної частини

Для додаткової перевірки дії ромбоподібного елементу, перевіримо його роботу у випадку бункера з кутом нахилу нижньої частини конуса 125° . Результати дослідження такого порожнього бункера вказують на значні застійні зони та утворення воронки. Елемент буде розміщено так, щоб центрально його частина знаходилась у зоні об'єднання циліндри та конуса бункера (рис 5.7).

З результатів видно, що ефект на данному випадку є подібним до попередніх досліджень, але у цьому випадку його ефект є трохи гіршим. Можливим фактором, що вплинув на результат є збільшений простір навколо центрального елементу. Збільшення простору пов'язано з більшим кутом нахилу конусної частини. Це дає змогу потоку матеріалу, що йде вертикально в центрі бункера, обходити елемент при цьому не захоплюючи застійні зони.

Для подолання цього ефекту вирішино опустити елемент на 150 мм вниз. Це зменшить перерізок в якому він буде знаходитись, а одже і зменшить простір потоку для обходу перешкоди.

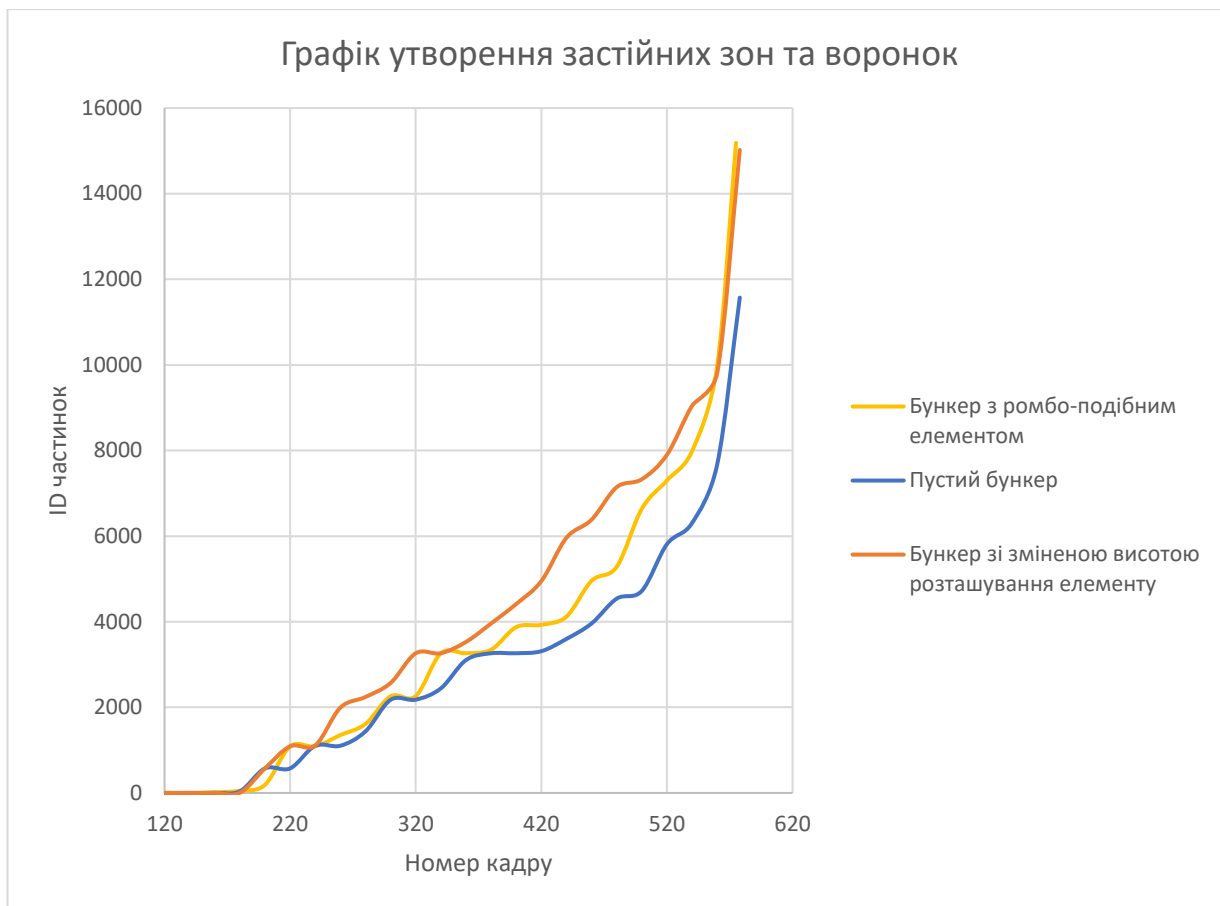


Рисунок 5.9 – Результати розрахунку з опущеним елементом

Як і очікувалось потік матеріалу почав захоплювати застійні зони та пришвидшив їх рух. Негативним моментом такого вдосконалення є підвищення можливості утворення склепінь, оскільки переріз в якому знаходився елемент-бар'єр став меншим, і простір проходу матеріалу також. Тож умова відносності площини елементів в потоці сипкого матеріалу до площини поперечного перерізу як $1/20$ вже не виконується. При випадковому підвищенні вологості в матеріалі, або зміни його властивостей, можливе утворення склепінь.

5.2 Гальмівний елемент в центральній частині бункера

Робота попереднього обладнання ґрунтувалась на фактичному перешкоджанні потоку воронки, та перенаправленні його ближче до бокових стінок для підхоплення матеріалу в застійних зонах.

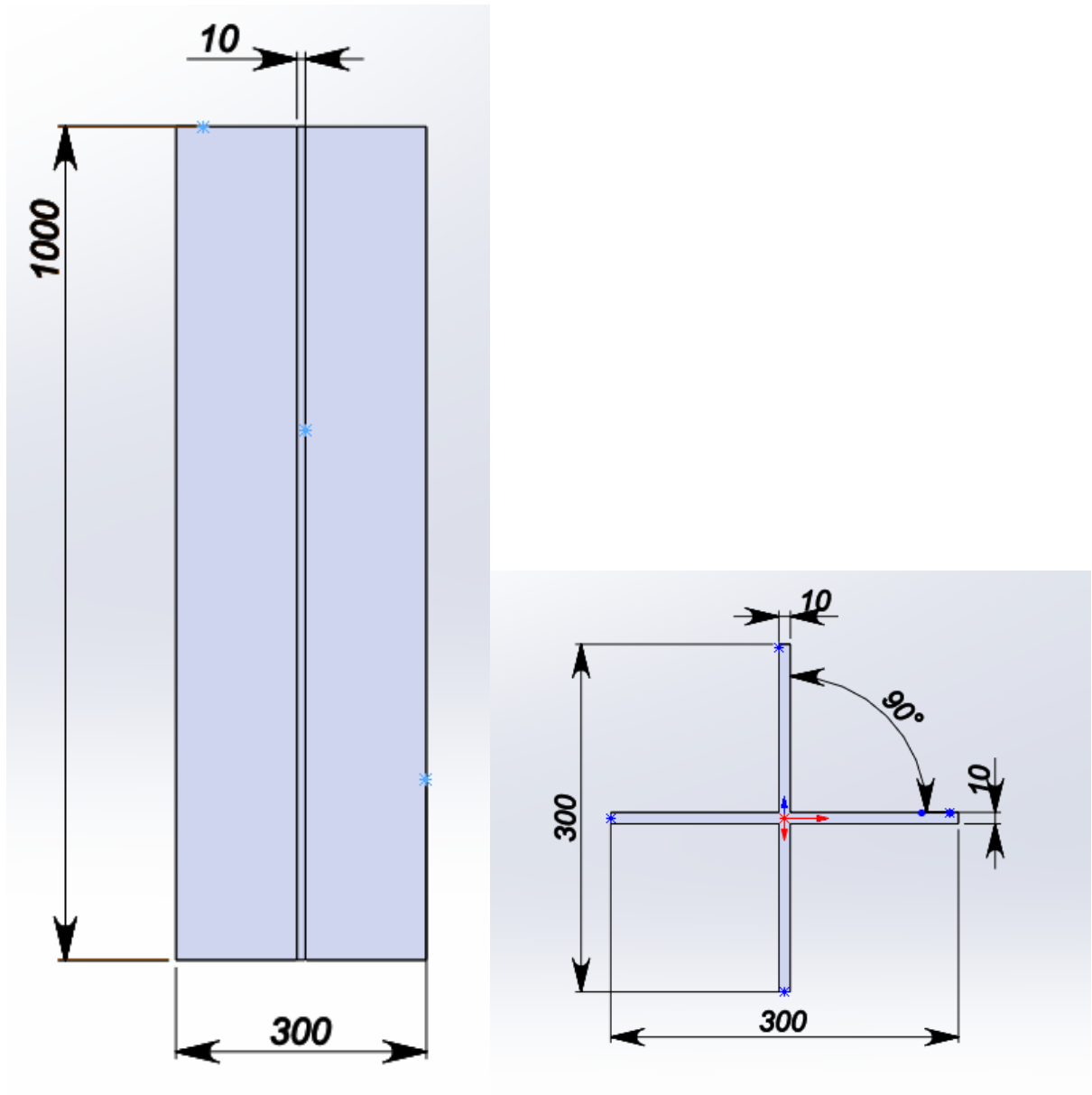


Рисунок 5.10 – Конструкція гальмівного елемента потоку з 4 ребрами

Наступний же варіант обладнання ґрунтується на фактичному уповільненні цього потоку за рахунок забезпечення додаткової зони тертя в центральній частині бункера.

Очікується, що потік матеріалу воронки буде затримуватись завдяки силам тертя, та не перешкоджати просуненню застійних зон.

Для початкового експерименту було обрано елемент з товщиною стінки 10 мм, кількістю ребр 4 та висотою 1000 мм (рис. 5.10) Діаметр описаного кола



Рисунок 5.11 – Результати гальмівного елемента на 4 ребра

В результаті ми бачимо незначне покращення на одних ділянках графіку і погіршення на інших. Фактично результатів по покращенню така конструкція не дала, тож у наступних дослідження необхідно збільшити кількість ребер гальмівного елемента до 6 (рис 5.12).

Оскільки ключовим фактором роботи даного елемента є тертя сипкого матеріалу о його стінки, то зменшення висоти не є раціональним, а навіть навпаки призведе до зменшення результативності. Висота гальмівного

елемента повинна бути достатньою, щоб забезпечити його контакт з частинками матеріалу по всій вертикалі потоку.

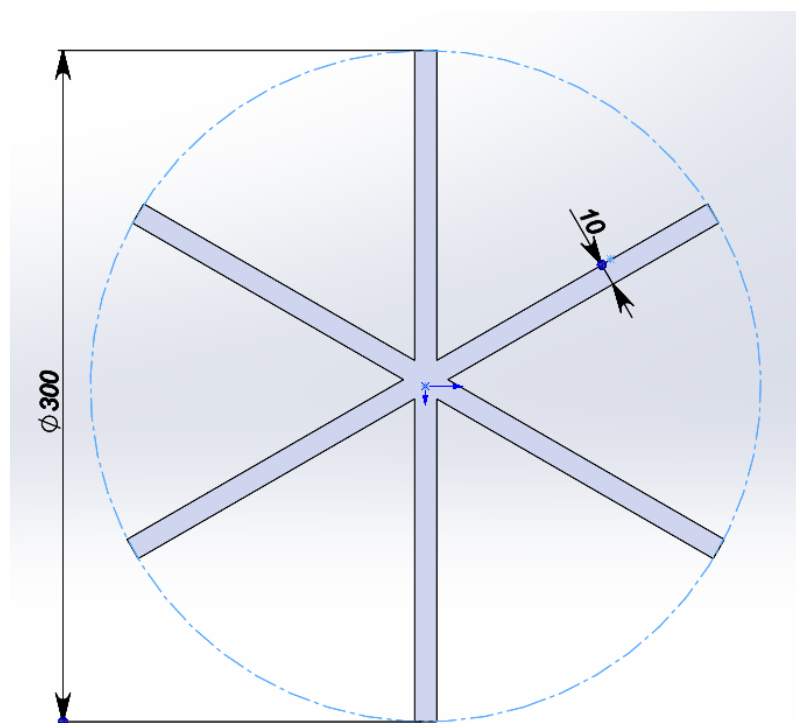


Рисунок 5.12 – Конструкція гальмівного елемента потоку з 6 ребрами

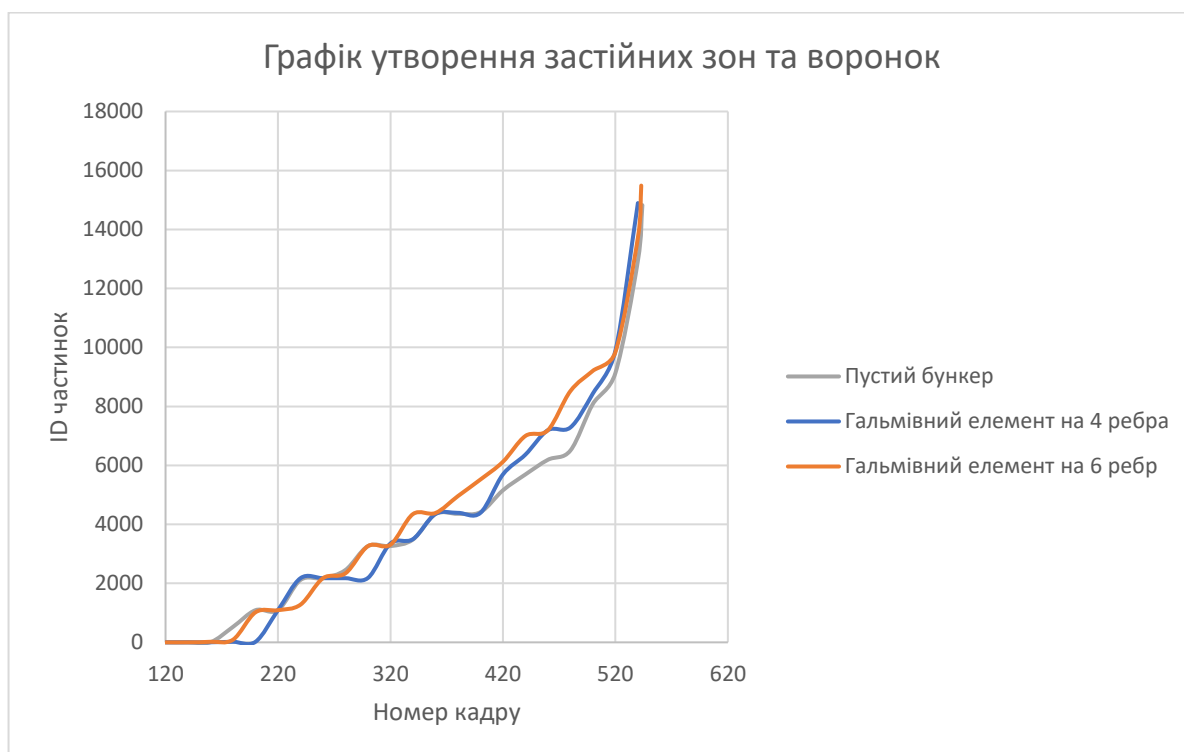


Рисунок 5.13 – Результати гальмівного елемента на 6 ребр

Гальмівний елемент з 6 ребрами дає більш чіткі результати, в першій половині графіку різниця є не значною, але вже в другій є помітний результат по збільшенню рухомості застійних зон. Такий результат обумовлено не лише збільшенням площі контакту елемента з частинками в 1,5 рази, але й зменшенням кута між ребрами. Гострий кут між ребрами діє як лещата. Під вагою верхніх шарів сипкого матеріалу, частинки впираються в ці кути і гальмуються під дією одразу двох стінок.

З одного боку це підвищує гальмівну здатність всього елемента, з іншого – при схильності сипкого матеріалу до злипання, обумовлене власними властивостями чи появою зайвої вологи, дані зони швидко заб'ються матеріалом. Якщо матеріал є короткого терміну зберігання, то його необхідно буде проштовхувати вручну.

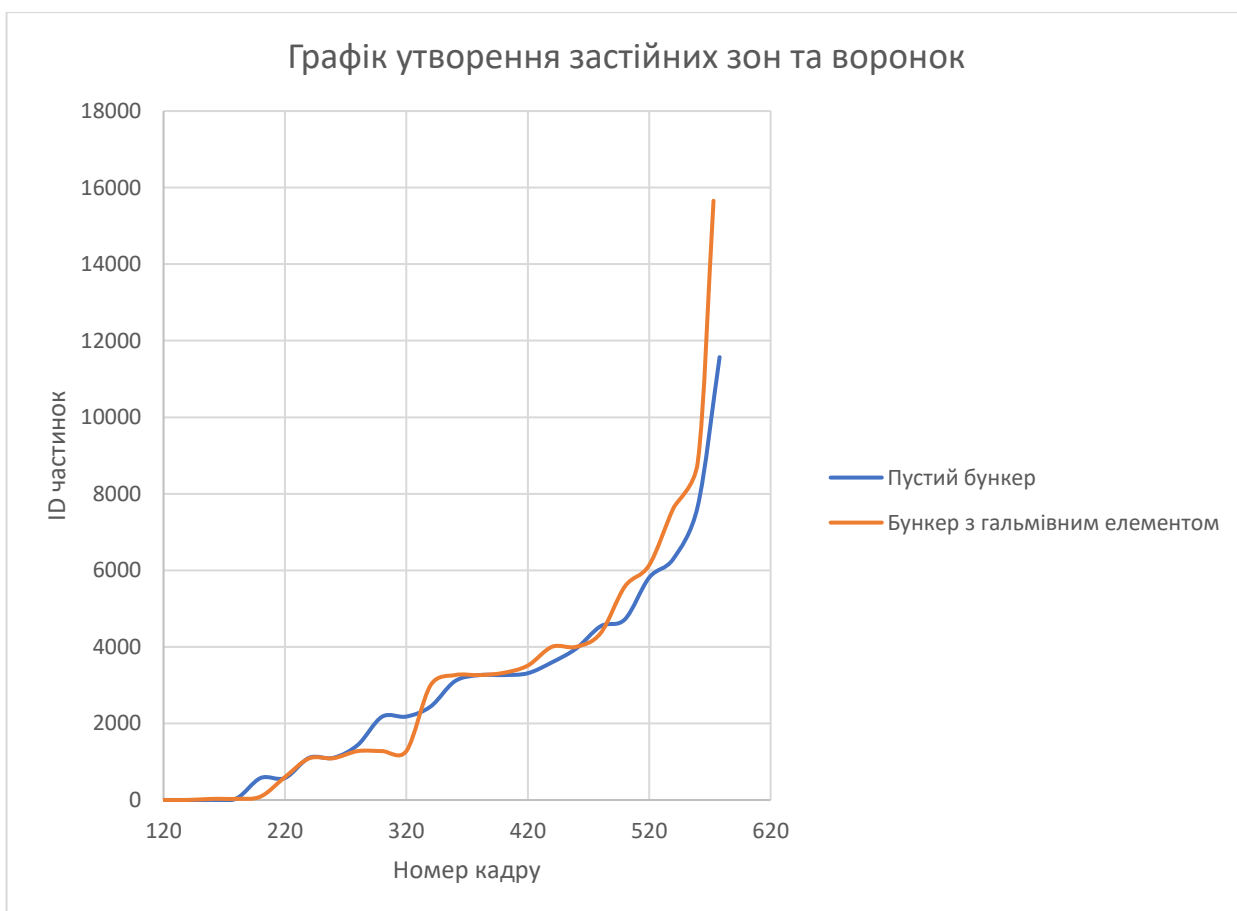


Рисунок 5.14 – Гальмівний елемент у бенкері зі збільшеним кутом нахилу конусної частини

Для підтвердження ефективності роботи такого типу обладнання проведемо додаткові розрахунки з бункером кут нахилу конусної частини якого 125° .

Гальмівний елемент розміщується в циліндричній частині бункера не заходячи в конусну.

Як і у випадки з ромбо-подібним елементом, в бункері подібної конфігурації прослідковується відсутність попередніх позитивних результатів. Причиною також є збільшений простір навколо елемента в конусній частині. Потік сипкого матеріалу низької щільності утворюється навколо гальмівного елемента не контактуючи з ним в повній мірі.

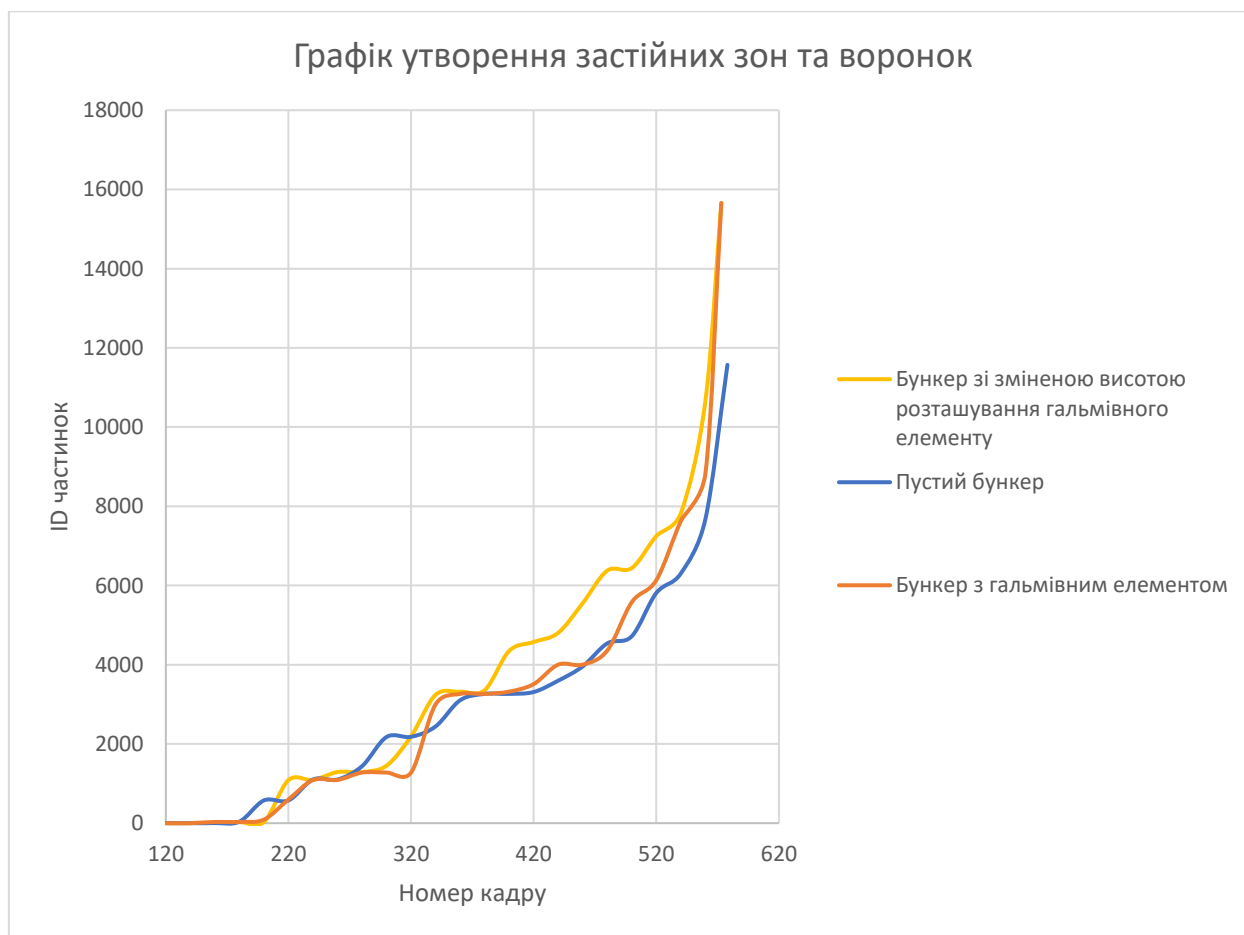


Рисунок 5.15 – Результати розрахунку з опущеним елементом

Як і у попередньому випадку результати стали більш помітними. Потік перестав оминати центральний елемент, перемістився ближче до стінок і почав підхоплювати застійні зони.

Оскільки результати є схожими з результатами дослідження ромбо-подібного елемента в тих же умовах, примінемі ті ж конструктивні зміни, що були допущені минулого разу, а саме опустимо його на 150 мм ближче до отвору.

Для завершальної перевірки збільшимо кількість матеріалу у бункері в 1,6 разу та покращимо результати розрахунку за рахунок більш точного розшарування матеріалу. Розшарування матеріалу залежить від кількості матеріалу, що з'являється в зоні появи за один цикл. Кожен цикл- це один шар матеріалу. Щоб збільшити кількість шарів – збільшимо час заповнення бункера сипким матеріалом з 5 до 15 секунд.

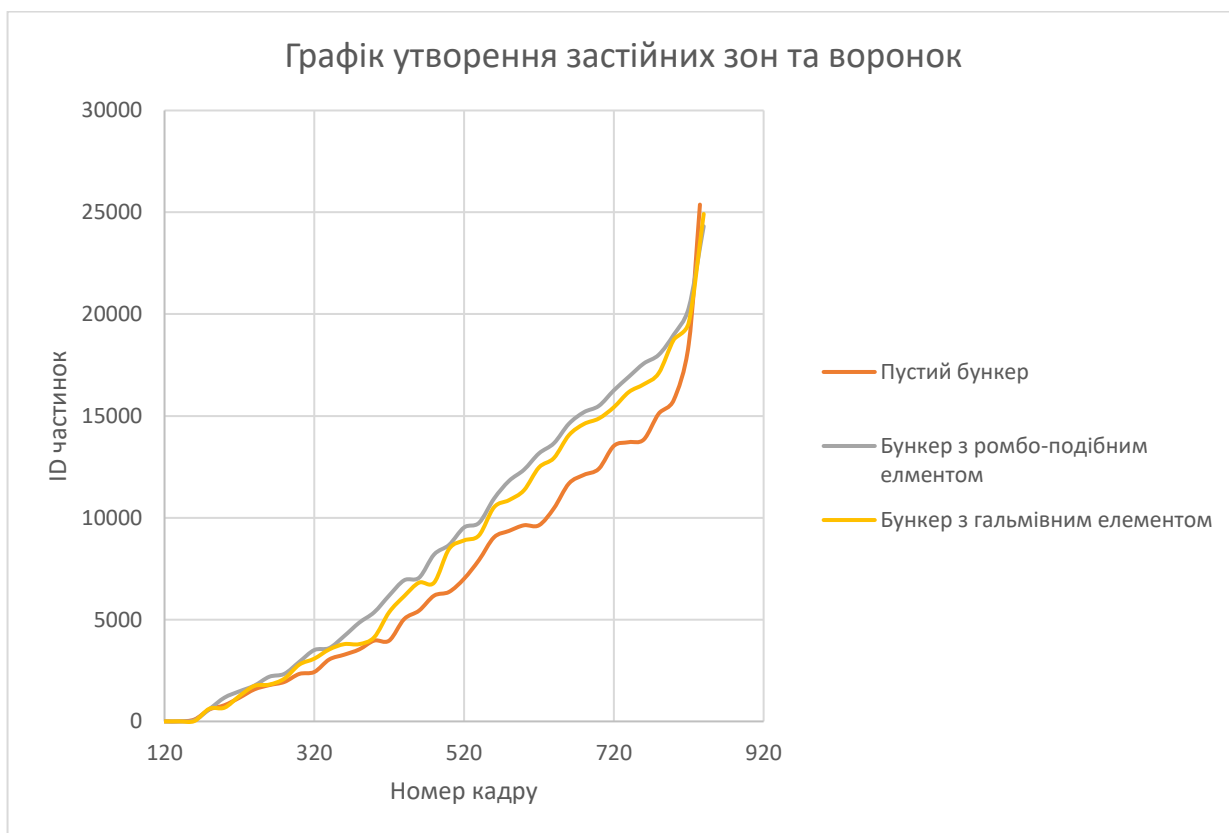


Рисунок 5.16 – Результати розрахунку з опущеним елементом

Для більш наглядного впливу ромбо-подібного та гальмівного елементу, розрахунок буде відбуватись у бункері з кутом нахилу конусної частини 125° , а самі центральні елементи розташовані на висоті 650 мм від отвору бункера.

Після моделювання, аналізу результатів та побудови по них графіків (рис 5.16) руху застійних зон стала добре видно позитивний вплив вдосконалення. Як і у попередніх розрахунках, запобігти утворенню воронки та пришвидшити спустошення не вдалося, проте її потік був перенаповнений та використаний для зрушування застійних зон.

6 ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ З ОХОРОНИ ПРАЦІ БУНКЕРІВ

Основними типами небезпеки в обслуговуванні прийомних та шихтових бункерів є застрягання людей у бункерах, коли штовхають застрягли матеріали, опіки гарячими поверненнями та пилом, та падіння у бункер.

Застряг матеріалів у бункерах викликається недостатнім нахилом їх стін.

Для запобігання застрягання матеріалів у бункерах. Доцільно використовувати циліндричні бункери з конічним дном, який має нахил щонайменше 60°. Під час побудови бункерів звичайного типу їх стінки слід задавати як більший нахил, а кут нахилу, утворений на місці кон'югації стін бункерів, повинен бути взято більше, ніж кут природного нахилу матеріалу, інакше матеріали будуть затримуватися в ребрах, утворених у стиках стін бункерів. Внутрішні стіни бункерів повинні бути викладені гладкими плитами. Для того, щоб взимку уникнути кусків матеріалів у бункерах, зовнішні стіни повинні бути нагріти.

Бункер для повернення колосникового пилу, паливо та флюси повинні бути закриті при падінні матеріалів у них. Бункер для повернення пилу для піджака, а також для видачі матеріалів з бункерів повинні бути обладнані примусовим вихлопом, пристроями для очищення повітря, вилученого в атмосферу.

Опіки робітників значно погіршують умови праці, у зв'язку з якими слід охолодити поверхні.

При застряганні матеріалу у бункері, опускати людину в бункер для проштовхування матеріалу є забороненим. Для цього використовуються електричні вібратори, встановлені на зовнішніх стінах бункерів, використовуються стиснене повітря, щоб розрихлити підвісні матеріали, розбити матеріали довгими вершинами через ударні люки в стінах бункера або зверху через безпечний люк.

Щоб уникнути засипання працівників, при вході в бункер необхідно влаштувати автоматичну сигналізацію, сповіщаючи заздалегідь про наближення матеріалу.

Для безпечного обслуговування бункерів вздовж залізничних колій слід розташувати шасі на 200-300 мм над рейками.

Для відтавання руди у вагонах слід розташувати спеціальні кімнати з обладнанням для опалення. Якщо необхідно зрушити груді матеріалу, замерзлі у вагонах, дозволяється використання пневматичних молотків. У той же час працівники повинні бути на спеціальному підлозі, прикріпленому до боків автомобіля, і використовувати ремені безпеки та захисні окуляри.

Через розвантаження люків небезпечно і тому неприйнятне.

Враховуючи небезпеку спонтанного перекидання вагонів із перекиданням тіла, хиткий механізм повинен мати спеціальні замки. Розвантаження таких вагонів із замороженими рудними концентратами є серйозною небезпекою. На практиці були випадки, коли нахил тіла викликав крин автомобіля.

Щоб усунути небезпеку людей, що потрапляють у бункер, необхідно встановити засоби безпеки над бункерами, сітка з найменшим елементом не більше 200×200 мм. Грати слід проводити звареними зі сталевих смуг, покладених на ребро, що забезпечить їх гладку поверхню та попередити людей під час руху по решітках.

Як показує досвід, навіть при вивантаженні невеликої руди з фургонів, руда затримується на бункерних решітках, що вимагає додаткової роботи над ним у бункері. У зв'язку з цим рекомендується обладнати бункери вібраторами.

Після вивантаження вагонів залізничні колії та бігові платформи повинні бути очищені від залишків матеріалів. У той же час, роботи повинні бути огорожені із зупинкою сигналів і встановлювати сигналістів, щоб повідомити людей про наближення композицій.

При ремонті бункерів до них допускають працівники, які пройшли спеціальні інструкції щодо заходів безпеки під час роботи всередині бункерів, і лише за умови надійної прикріплення людей з ременями безпеки з мотузками, прикріпленими до міцних конструкцій. Кількість ремонтників, що потрапляють у бункер, повинна бути щонайменше три, а робота може виконуватися під постійним наглядом інженерного персоналу. Перш ніж опустити людей у бункер ззовні, необхідно встановити чітко видимі профілактичні написи, повідомляючи ремонтників всередині бункерів.

1. Вимоги охорони праці перед початком роботи

Оглянути, упорядкувати та одягти спеціальний одяг, спеціальне взуття та інші засоби індивідуального захисту. Роботодавець зобов'язаний замінити або відремонтувати спецодяг, спецвзуття та інші засоби індивідуального захисту, які стали непридатними до закінчення встановленого терміну носіння з причин, що не залежать від працівника.

За записами в журналі прийому-здавання зміни ознайомитися з роботою основного та допоміжного обладнання у попередні зміни. Перевірити відповідність записів технічного стану обладнання та робочого місця.

Перевірити зовнішнім оглядом:

- стан освітлення майданчиків обслуговування обладнання, сходів та перехідних містків, наявність захисної арматури на електролампочках;
- надійність кріплення пневмоциліндрів, шлангів, ручок кранів, справність аспіраційних систем, надійність та герметичність закриття кришок на люках бункерів;
- чистоту та незагроможденість проходів, майданчиків обслуговування обладнання, сходів, перехідних містків та ін;
- наявність, справність та надійність кріплення огорожувальних пристроїв, справність настилу на майданчиках обслуговування обладнання, справність перильних огорож;
- справність пускової електроапаратури та заземлення;

- наявність на робочому місці таблиці сигналів, що забороняють знаків безпеки "Не включати – працюють люди!";
- наявність та справність пристроїв контролю кількості цементу в бункерах;
 - справність запірної арматури; надійність кріплення ручок на кранах.
 Перевірити наявність та справність інструменту.

Якщо час прийому зміни збігся з моментом аварії чи порушення режиму роботи устаткування, зміну прийняти з дозволу майстра зміни чи начальника цеху.

Усі виявлені на початку зміни неполадки у роботі основного та допоміжного обладнання, порушення технологічного процесу відобразити в журналі прийому-здавання зміни та повідомити майстра зміни або начальника цеху.

2 Вимоги охорони праці під час роботи

Пуск виробничого обладнання після очищення, ремонту повинен проводитися за вказівкою майстра і лише після перевірки відсутності в небезпечних зонах людей, сторонніх предметів, зняття всіх знаків безпеки, що забороняють, "Не включати - працюють люди!". Знаки безпеки знімає тільки працівник, що їх вивісив.

Під час роботи бункерувальник повинен:

- користуватись засобами індивідуального захисту;
- стежити за роботою рукавних фільтрів;
- не допускати виходу цементного пилу через щілини, що утворилися в трубах, бункерах. При виявленні порушень припинити закачування цементу через цю ділянку трубопроводу та доповісти майстру зміни;
- стежити за наповненням бункера;
- не захаращувати робоче місце;

не допускати сторонніх осіб на майданчик бункерів.

Під час роботи не допускається:

- працювати на несправному або обладнанні, що знаходиться в аварійному стані;
- працювати на устаткуванні без захисного заземлення, без огороження небезпечних зон;
- залишати працююче обладнання без нагляду;
- відкривати люк бункера під час закачування цементу та за наявності цементу в бункері;
- тримати закритими перемикачі у всі бункери одночасно;
- експлуатувати бункери за наявності щілин та відкритих отворів у їх корпусах та вузлах з'єднання з цементопроводом;
- перебувати на майданчику бункерів за несправної аспіраційної системи;
- виконувати самостійно без чергового ремонтного персоналу ремонт та налагодження обладнання.

На роботи з внутрішнього огляду, очищення та ремонту бункерів повинен бути розроблений проект виконання робіт (ПВР) та виданий наряд-допуск. Виконання робіт з огляду, очищення та ремонту обладнання без ПВР та наряду-допуску не допускається.

При роботі в бункері повинні застосовуватись переносні електричні світильники напругою не вище 12 В.

3 Вимоги охорони праці в аварійних ситуаціях

При несправності корпусу бункера, при прориві цементопроводу, несправності рукавних фільтрів припинити роботу та повідомити майстра чи начальника цеху.

У разі нещасного випадку різкого погіршення стану здоров'я слід виконувати рекомендації інструкції з надання першої долікарської допомоги.

4 Вимоги охорони праці після закінчення роботи

Упорядкувати робоче місце, інструмент, пристосування.

Не допускається:

- проводити чищення, прибирання працюючого обладнання;
- протирати обладнання, перильні огороження, підлогу ганчіркою, змоченою пально-мастильними матеріалами;
- проводити прибирання робочого місця стисненим повітрям.

Інструмент та пристрої прибрати у відведене для зберігання місце (здати за зміною).

Сміття, відходи, забруднене ганчір'я, тирсу прибрати в спеціальну ємність (контейнер).

Ознайомити змінника з усіма неполадками, що мали місце під час роботи обладнання протягом зміни.

Повідомити майстра про стан обладнання та неполадки в його роботі, зробити запис у журналі прийому-здавання зміни.

При неявці змінника доповісти майстру і надалі керуватися його вказівками.

Зняти засоби індивідуального захисту, оглянути та упорядкувати. Знепилення спецодягу зробити у спеціально обладнаному приміщенні. Спецодяг, спецвзуття та інші засоби індивідуального захисту прибрати у призначені для зберігання місця. Зберігання спецодягу, забрудненим пилом цементу, в шафі вбиральні не допускається. Прийняти душ.

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 плину сипкого 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 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° - 120° , рух здебільшого набуває незв'язної форми руху, а при куті меншим за 115° 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° до 105° 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 конструкція 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 Физическая энциклопедия: [в 5 т.] / Гл. ред. А. М. Прохоров. - М.: Советская энциклопедия (т. 1—2); Большая Российская энциклопедия (т. 3—5), 1988—1999. — ISBN 5-85270-034-7.
2. Торічеллі формула. Статті в Фізичній енциклопедії та Фізичному енциклопедичному словник.
3. Ковтун В.В. Дорофеев О.А. Основы механики дискретных материалов. - Хмельницький, 2018. - 131 с.
4. Крупський А. А. Розрахунок та розробка барабана ПП.1.18.120. – НТУ Дніпропетровська політехніка. – 2020. – 2 с.
5. 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.
6. 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.
7. Бункерное устройство [Електронний ресурс]
<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37496351>
8. Коэффициенты трения скольжения [Електронний ресурс]
<https://minkor.ru/upload/spravochnik/170310-2.pdf>
9. Владимир Атапин, Александр Пель, Анатолий Темников. Сопротивление материалов. Базовый курс. Дополнительные главы. — Litres, 2021-03-16. — 507 с. — ISBN 978-5-04-112997-2. Архивная копия от 30 декабря 2021 на Wayback Machine
10. Главный редактор А. М. Прохоров. Модули упругости Физический энциклопедический словарь. — М.: Советская энциклопедия. —

1983. — Статьи в Физическом энциклопедическом словаре и Физической энциклопедии.

11. Процессы подготовки угля к коксованию [Электронный ресурс] <https://studfile.net/preview/8901892/page:5/>

12. Г. С. Головченко, О. М. Калнагуз, Кінематика руху сипкого матеріалу. - Сумський національний аграрний університет 2019. – 3 с.

13. В.В. Стаценко Дослідження плинущого сипкого матеріалу в бункерних пристроях. - Київський національний університет технологій та дизайну 2017 2 с.

14. Казак І. О. Аналіз особливостей конструкції гвинтового живильника з метою удосконалення його роботи. - Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського – 2021. – 9 с.

15. 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.

16. Гячев Л. В. Основы теории бункеров и силосов. – Барнаул: АПИ, 1986. – 84с.

17. Стаценко В. В. Автоматизовані комплекси безперервного приготування композицій сипких матеріалів: монографія / В.В. Стаценко, О.П. Бурмістенков, Т.Я. Біла. – Київ: КНУТД, 2017. – 220с.

18. Глобин А. Н. Дозаторы: монография / А. Н. Глобин, И. Н. Краснов. – М.- Берлин: Директ-Медиа, 2016. – 384с.

19. Стальной В. П. Повышение эффективности процесса выгрузки влажных зерновых материалов из бункеров сельскохозяйственного назначения – Зерноград 2004 – 20 с.

20. 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.

21. Chapter-7 Mechanics of Bulk Solids 2016 Particle Technology and Engineerin [Електронний ресурс]

[Chapter7MechanicsofBulkSolids2016ParticleTechnologyandEngineerin](#)

22. 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.

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

Додаток А

Перелік зауважень нормоконтролера до кваліфікаційної роботи
студента групи ТПМм-21а Денис КАРПЕНКО.

Позначення документа	Документ	Умовна відмітка	Зміст зауваження

Науковий керівник

(підпис, дата)

Андрій ТОПОРОВ

(ПІБ)

Нормоконтролер

(підпис, дата)

Андрій ТОПОРОВ

(ПІБ)

Завідувач кафедри

(підпис, дата)

Євген ЗБИКОВСЬКИЙ

(ПІБ)