

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інституту інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка До кваліфікаційної роботи магістра

Магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему

Дослідження та оптимізація конструкції бункера для сипких матеріалів

Виконав: студент VI курсу, групи 601ММв
напряму підготовки (спеціальності)

133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Костенко Євгеній Олександрович
(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н. доцент Орисенко О.В.
(прізвище та ініціали)

Рецензент *Аліна О.В.*
(прізвище та ініціали)

Полтава – 2024 рік

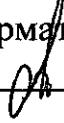
Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інституту інформаційних технологій та робототехніки
Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

**Дослідження та оптимізація конструкції
бункера для сипких матеріалів
Кваліфікаційна робота магістра**

Лист затвердження

ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 МР

Технологічний контроль к.т.н., доц.
 О.С. Васильєв
„27” 08 2024р.

Нормативний контроль к.т.н., доц.
 О.С. Васильєв
„27” 08 2024р.

Розробив студент групи 601-ММв
 Є.О. Костенко
„23” 08 2024р.

Керівник к.т.н., доц.
О.В. Орисенко
„” 2024р.

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ

Завідувач кафедри
галузевого машинобудування та мехатроніки
к.т.н., доц.

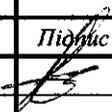
О.В. Орисенко

Гарант ОП

М.М. Нестеренко

Полтава – 2024 рік

№ рядок.	Форм.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
1					
2			Документація загальна		
3					
4			Вперше розроблена		
5					
6	A4	ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000ТЗ	Технічне завдання	1	
7	A4	ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000А	Анотація	3	
8	A4	ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000ПЗ	Пояснювальна записка		
9					
10			Документація наукова		
11					
12			Вперше розроблена		
13					
14	A4	ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000ПМ	Дослідження та оптимізація		
15			конструкції бункера для сипких		
16			матеріалів		
17			Презентаційні матеріали	12	
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					

					ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000ВМ		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Костенко		23.08	Літ.	Лист	Листів
Перев.		Орисенко			Н	1	1
Н.контр.		Васильєв			Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
Затв.		Орисенко					
					Дослідження та оптимізація конструкції бункера для сипких матеріалів <u>Відомість кваліфікаційної роботи магістра</u>		

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет, відділення Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки

Кафедра, циклова комісія Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень Магістр

Напрямок підготовки _____

(шифр і назва)

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач

кафедри галузевого
машинобудування та
мехатроніки

О.В. Орисенко

" "

2024 р.

З А В Д А Н Н Я

до кваліфікаційної роботи магістра

Костенку Євгенію Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи

«Дослідження та оптимізація конструкції бункера для сипких матеріалів»

керівник к.т.н., доц. Орисенко О.В.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 18.03.2024 № 309 ФА

1. Строк подання студентом роботи 20 Серпня 2024

2. Вихідні дані до роботи Результати практики, Інформація з науково-практичних періодичних видань України, нормативні документи тощо.

Конструктивні схеми.

3. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Розділ 1. Використання бункерів для зберігання та транспортування цементу у будівництві та нафтогазовій промисловості. Розділ 2. Дослідження та обґрунтування параметрів бункера для сипких матеріалів

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) «Дослідження та оптимізація конструкції бункера для сипких матеріалів» графічні матеріали(14 листів А4)

5. Консультанти розділів роботи

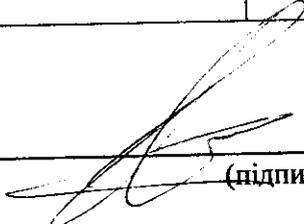
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

6. Дата видачі завдання 18.03. 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	<i>Аналіз літературних джерел, розрахунки</i>	15.08.2024	
2	<i>Аналітичні та експериментальні дослідження робочого процесу обладнання</i>	15.08.2024	
3	<i>Компонування пояснювальної записки</i>	15.08.2024	
4	<i>Здача готової роботи</i>	15.08.2024	

Студент


(підпис)

Євгеній КОСТЕНЮК
(П.І.О.)

Керівник

(підпис)

Олександр ОРИСЕНКО
(П.І.О.)

Гарант

(підпис)

Микола НЕСТЕРЕНКО
(П.І.О.)

Анотація

Кваліфікаційна робота магістра на тему: «Дослідження та оптимізація конструкції бункера для сипких матеріалів»

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування – Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, 2024

Робота складається з двох розділів.

У рамках проведеного дослідження було детально проаналізовано методику визначення мінімального діаметра отвору в днищі бункера для забезпечення безперешкодного витікання цементу. Встановлено, що в науковій літературі відсутня узагальнена методика для точного розрахунку цього параметра, а наявні рекомендації є загальними. З метою уточнення цього питання проведено експериментальне дослідження механічних властивостей цементу як сипучого матеріалу, використовуючи тестер зрізу. Виявлено, що кути внутрішнього та зовнішнього тертя, а також початкове напруження зрізу, є ключовими параметрами, які визначають поведінку матеріалу.

Дослідження показали, що явище сводовутворення відіграє важливу роль у процесі витікання цементу, і при недостатньому діаметрі отвору утворюється аркова структура, що блокує витікання. Підтверджено важливість урахування цього явища за допомогою формули Беверло. Крім того, експериментально визначені параметри, такі як мінімальне нормальне навантаження та мінімальне зрізувальне зусилля, що дозволяє точніше прогнозувати та проектувати системи вивантаження цементу.

Результати дослідження також показали, що масова витрата цементу суттєво залежить від частоти обертання шнеку, особливо при досягненні частоти 600 об/хв, тоді як вплив насипної густини є менш значущим. Ці висновки можуть бути використані для подальших розробок у галузі проектування бункерів та систем

ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 А

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат	Літ.	Лист	Листів
Розроб.		Костенко		23.08	Н		
Перев.		Орисенко					
Керівн.							
Н. контр.		Васильєв		27.08			
Затв.		Орисенко					

Анотація

Національний університет
«Полтавська політехніка імені
Юрія Кондратюка»

вивантаження сипучих матеріалів, що сприятиме підвищенню ефективності та надійності таких систем у промисловій практиці.

Ключові слова: бункер, цемент, шнек.

					ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 А	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Annotation

Master's Qualification Thesis on the Topic: "Research and optimization of hopper design for bulk materials."

Master's qualification thesis for obtaining the educational qualification level of Master in the specialty 133 Industrial Engineering at the National University "Poltava Polytechnic named after Yuri Kondratyuk," Poltava, 2024.

The thesis consists of two sections.

In the course of the research, the methodology for determining the minimum diameter of a hole in the hopper bottom to ensure unobstructed cement flow was thoroughly analyzed. It was found that the scientific literature lacks a generalized methodology for accurately calculating this parameter, and the existing recommendations are general. To clarify this issue, an experimental study of the mechanical properties of cement as a bulk material was conducted using a shear tester. It was revealed that the angles of internal and external friction, as well as the initial shear stress, are key parameters that determine the material's behavior.

The research showed that the phenomenon of arching plays an important role in the process of cement flow, and with insufficient hole diameter, a stable arch structure forms, which can block the material's flow. The importance of considering this phenomenon was confirmed using Beverloo's formula. Additionally, experimentally determined parameters, such as the minimum normal load and minimum shear force necessary to ensure material flow, allow for more accurate forecasting and designing of cement unloading systems.

The study also demonstrated that the mass flow rate of cement significantly depends on the screw's rotation speed, especially when reaching a speed of 600 rpm, while the impact of bulk density is less significant. These findings can be used for further developments in the design of hoppers and bulk material unloading systems, contributing to increased efficiency and reliability of such systems in industrial practice.

Keywords: hopper, cement, screw.

					ГМмам 601ММе.008-00.00.000 А	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інституту інформаційних технологій та робототехніки
Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

Дослідження та оптимізація конструкції бункера для сипких матеріалів

Пояснювальна записка

Кваліфікаційної роботи магістра

ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ

Полтава – 2024рік

Зміст

Вступ	3
РОЗДІЛ 1. Використання бункерів для зберігання та транспортування цементу у будівництві та нафтогазовій промисловості	5
1.1 Використання бункерів на будівництві	5
1.2 Використання бункерів при приготуванні тампонажних розчинів у нафтогазовій промисловості	7
Розділ 2 Дослідження та обґрунтування параметрів бункера для сипких матеріалів	13
2.1 Дослідження процесу витікання цементу з бункера	13
2.4 Рух в шнековому живильнику	30
Висновки	39
Список літератури	41
Додатки	51

ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ							
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат	Зміст Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
Розроб.		Костенко		23.08			
Перев.		Орисенко					
Керівник							
Н. контр.		Васильев		27.08			
Затв.		Орисенко			Лім.	Лист	Листів
					Н	2	

Вступ

У сучасному виробництві, зокрема в галузях, де використовуються сипкі матеріали, ефективно зберігання, транспортування та дозування таких матеріалів є надзвичайно важливим завданням. Одним із ключових елементів цих процесів є бункери, які забезпечують зберігання та рівномірну подачу сипких матеріалів для подальшої обробки або транспортування. Однак, для досягнення оптимальної продуктивності та мінімізації витрат, необхідно ретельно дослідити та вдосконалити конструкцію бункера.

Актуальність дослідження полягає у необхідності розробки ефективних конструкцій бункерів, які дозволяють знизити енерговитрати, забезпечити рівномірний потік матеріалу та уникнути проблем, пов'язаних із залипанням або блокуванням матеріалу. Удосконалення конструкцій бункерів сприяє підвищенню продуктивності технологічних процесів, зменшенню простоїв обладнання та покращенню якості кінцевого продукту.

Мета цієї роботи полягає в дослідженні впливу геометричних параметрів та конструктивних особливостей бункера на процеси зберігання і транспортування сипких матеріалів, а також у розробці рекомендацій щодо оптимізації конструкції для підвищення її ефективності. Виконання поставленої мети передбачає аналіз існуючих конструкцій бункерів, проведення експериментальних досліджень та розробку моделей, які дозволять прогнозувати поведінку сипких матеріалів у різних умовах експлуатації.

Цемент є одним із найважливіших будівельних матеріалів, який використовується у різних галузях, зокрема у будівництві, дорожньому господарстві та виробництві бетонних виробів. Враховуючи його сипку природу та високу гігроскопічність, зберігання та транспортування цементу

					ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ		
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат	Вступ		
Розроб.	Костенко			23.08			
Перев.	Орисенко						
Керівник							
Н. контр.	Васильєв			27.08			
Зате.	Орисенко				Лім.	Лист	Листів
					Н	3	
					Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		

вимагають особливого підходу. Неправильне зберігання може призвести до злежування матеріалу, утворення грудок та втрати його якісних характеристик. Тому конструкція бункерів, які використовуються для зберігання цементу, має бути розроблена з урахуванням специфічних властивостей цього матеріалу.

Бункери для цементу повинні забезпечувати захист від вологи, рівномірний потік матеріалу, а також запобігати залипанню та утворенню "мертвих зон," де матеріал може накопичуватися без можливості подальшого вивантаження. Оптимальна конструкція бункера враховує такі параметри, як кут нахилу стінок, форма вихідного отвору, а також наявність додаткових пристроїв для вібраційного або повітряного розпушування матеріалу.

Удосконалення конструкції бункера для цементу сприятиме зниженню експлуатаційних витрат, підвищенню надійності обладнання та покращенню умов зберігання матеріалу. Це, в свою чергу, дозволить забезпечити стабільну якість кінцевого продукту, що є надзвичайно важливим для будівельної галузі, де точність і якість матеріалів відіграють ключову роль.

Дослідження, яке проводиться в рамках даної магістерської роботи, спрямоване на аналіз існуючих рішень у конструкції бункерів для цементу, оцінку їх ефективності та розробку рекомендацій щодо оптимізації конструкції для підвищення її надійності та продуктивності.

					ГМтаМ 601ММВ.015-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		4

Розділ 1. Використання бункерів для зберігання та транспортування цементу у будівництві та нафтогазовій промисловості

1.1 Використання бункерів на будівництві

Бункери відіграють ключову роль у процесах зберігання та транспортування цементу на будівельних майданчиках. Цемент використовується для приготування різноманітних будівельних розчинів, таких як бетон, цементні суміші, стяжки та інші матеріали, що застосовуються у будівництві житлових, комерційних та інфраструктурних об'єктів.

На будівельних майданчиках бункери виконують кілька основних функцій:

Зберігання цементу. Бункери забезпечують зберігання цементу (рисунок 1.1) в умовах, які захищають матеріал від вологи та інших факторів, що можуть призвести до його погіршення.

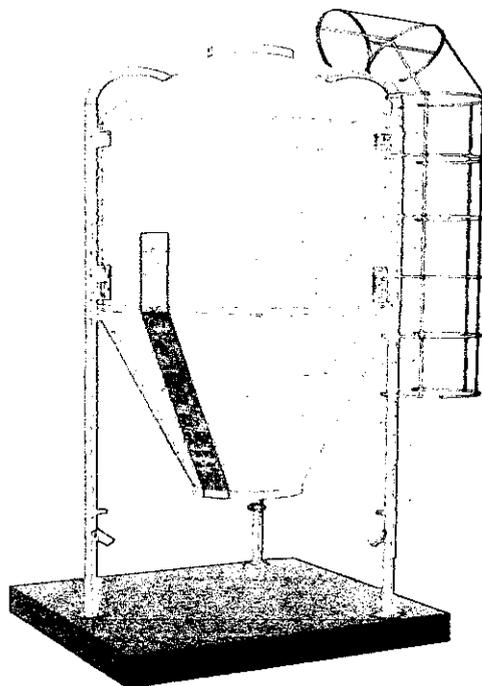


Рисунок 1.1 – Бункер для зберігання цементу

					ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат	Стан питання ущільнення суміші і поверхонь та вібраційне переміщення поверхневих ущільнювачів	Літ.	Лист	Листів
Розроб.	Костенко		<i>[Signature]</i>	23.08		Н	5	
Перев.	Орисенко					Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
Керівник								
Н. контр.	Васильєв		<i>[Signature]</i>	27.08				
Затв.	Орисенко							

Це особливо важливо, враховуючи високу гігроскопічність цементу, яка може призвести до злежування і утворення грудок, що ускладнює подальше використання матеріалу.

Дозування цементу. Бункери забезпечують точне дозування цементу для приготування будівельних розчинів (рисунок 1.2). Це є важливим аспектом у процесі приготування сумішей, оскільки точність дозування впливає на якість кінцевого продукту, його міцність, тривкість і довговічність.

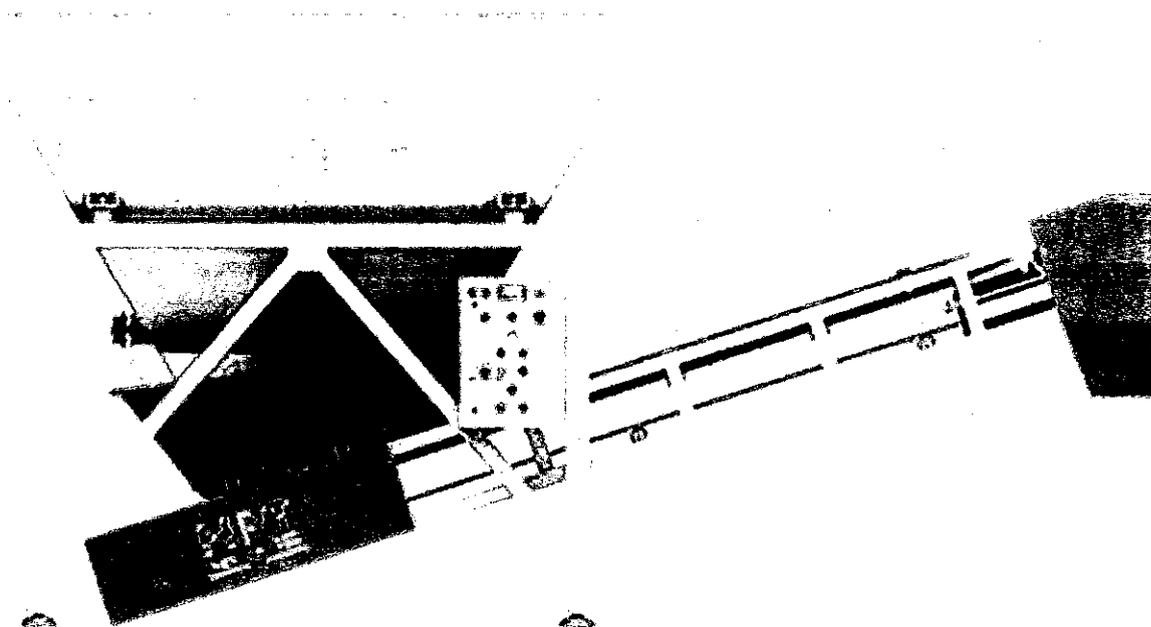


Рисунок 1.2 – Бункер для дозування цементу

Транспортування цементу. Бункери можуть використовуватися як тимчасові сховища для цементу під час його транспортування до місця використання (рисунок 1.3). Вони забезпечують захист матеріалу від зовнішніх впливів і зручність його подачі безпосередньо на місце приготування розчинів.

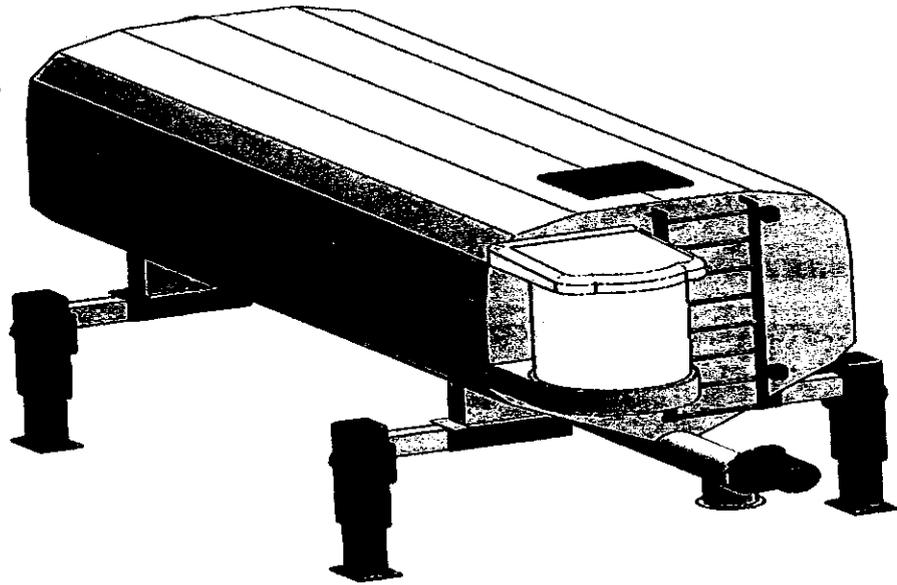


Рисунок 1.3 – Бункер для транспортування цементу

Конструкція бункерів для будівельних потреб повинна відповідати низці вимог, таких як забезпечення герметичності, можливість рівномірного подавання матеріалу, зручність обслуговування та надійність конструкції. Важливим аспектом є також розмір бункера, який має бути адаптований до обсягів споживання цементу на конкретному будівельному майданчику.

1.2 Використання бункерів при приготуванні тампонажних розчинів у нафтогазовій промисловості

У нафтогазовій промисловості цемент використовується для приготування тампонажних розчинів, які застосовуються для герметизації свердловин та захисту продуктивних шарів від обводнення або проникнення інших флюїдів. Тампонажні розчини повинні відповідати суворим вимогам щодо міцності, хімічної стійкості та плинності, що накладає особливі вимоги до процесу їх приготування.

Бункери, які використовуються для зберігання цементу в нафтогазовій промисловості, забезпечують:

Як і у будівництві, цемент, що використовується для приготування

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМтаМ 601ММВ.008-00.00.000 ПЗ

Лист

7

тампонажних розчинів, повинен зберігатися в умовах, які виключають потрапляння вологи та інших забруднень, що можуть негативно вплинути на його властивості.

Бункери забезпечують подачу цементу у точних пропорціях, що є критичним для досягнення необхідних характеристик тампонажного розчину. У процесі приготування розчинів важливо дотримуватися заданих співвідношень між цементом, водою та іншими добавками.

У нафтогазовій промисловості важливо контролювати температуру зберігання цементу, оскільки зміни температури можуть впливати на його реакційну здатність і, як наслідок, на якість тампонажних розчинів.

Бункери, що використовуються у нафтогазовій промисловості, часто оснащені додатковими системами контролю та автоматизації, які дозволяють точно регулювати процес подачі та дозування цементу. Це забезпечує високу якість кінцевого продукту та знижує ризики, пов'язані з відхиленнями у технологічних параметрах.

Стійкість і швидкість випуску цементу з бункера залежать від властивостей цементу як сипучої речовини, діаметра вихідного отвору та кута нахилу стінок нижньої частини бункера. Багато досліджень, зосереджених на теоретичних аспектах і розрахунках процесу витікання сипучих матеріалів з бункерів, було узагальнено в наукових працях та підручниках [9, 10]. Метою цих досліджень є забезпечення так званого масового або суцільного вивантаження матеріалу з бункера, при якому не виникають застійні зони, а вивантаження відбувається рівномірно і повністю [10, 11]. Для досягнення такого ефекту необхідно правильно підібрати геометричні параметри бункера, особливо його нижньої частини і вихідного отвору, а також матеріал, з якого виготовлені стінки [10]. При цьому передбачається, що оптимізована форма бункера забезпечить максимальну продуктивність живильника [11], зокрема, якщо на виході з бункера встановлений живильник, наприклад, шнековий або вібраційний.

Однак у бурінні, через технологічні обмеження та варіації властивостей цементу, які можуть сприяти злежуванню, досягнення оптимальної конструкції бункера є складним завданням. Аналіз форм бункерів, що використовуються у нафтопромисловості для транспортування цементу, свідчить про те, що ці конструкції мають незначну конусоподібність на вихідному кінці, зavelикий діаметр корпусу у верхній частині та недостатньо великий вихідний отвір. У результаті при неоптимальній конструкції бункера спостерігається так зване каналне витікання (funnel flow), коли рухається лише невелика частина матеріалу, розташована безпосередньо над вихідним отвором, а решта матеріалу залишається на стінках бункера.

Більшість систем, що використовуються для приготування тампонажних розчинів, мають проблеми з нестабільною подачею цементу через випускні патрубки, викликані зависанням цементу на стінках бункера. Через це виникає необхідність у застосуванні спеціальних, часто дорогих і складних засобів для розпушування або аерації порошкоподібного матеріалу.

У літературі недостатньо розроблені принципи проектування бункерів простих конструкцій, які могли б ефективно працювати в умовах буріння без використання складних і ненадійних систем забезпечення течії. Рекомендації щодо розрахунку швидкості витікання значно відрізняються у різних авторів, і визначити заздалегідь оптимальний кут нахилу стінок бункера та діаметр отвору, що забезпечує потрібну швидкість витікання, є досить складним завданням. Крім того, кількість конкретних даних про властивості цементу є обмеженою, і ці дані не систематизовані. Мало досліджено також вплив простих зовнішніх чинників, таких як вакуум на вихідному отворі та шнековий живильник, на стійкість і швидкість витікання матеріалу. Літературні дані щодо коефіцієнта заповнення міжвиткового простору шнекових живильників значно різняться і часто є завищеними.

Витратна характеристика цементу для гідроежекторного змішувача визначається залежністю коефіцієнта ежекції від зовнішніх умов.

					ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		9

Коефіцієнт ежекції є відношенням витрати транспортованого середовища до витрати робочої рідини; у даному випадку — відношення витрати цементу до витрати рідини для замішування. Чим вищий коефіцієнт ежекції апарата, тим більша інтенсивність залучення цементу в процес змішування. Хоча гідроежекторні змішувачі широко використовуються в промисловій практиці, на сьогодні не розроблена узгоджена методика прогнозування коефіцієнта ежекції для бурових і тампонажних розчинів.

Теорія багатофазних струменевих апаратів, до яких належать всі відомі гідроежекторні змішувачі, як і теорія струменевих насосів, з часів Ренкіна базується на рівняннях збереження маси, енергії та імпульсу [4, 6, 8]. Проте, на відміну від струменевих насосів, розрахунки багатофазних струменевих апаратів значно більше залежать від експериментальних коефіцієнтів. Це пов'язано з відсутністю надійних залежностей для визначення витратно-напруженого стану розпиленої у повітрі струменя рідини, що виходить з сопла великого діаметра в камеру змішування ежектора. Необхідно враховувати, що ефективність струменевого апарата значною мірою визначається інтенсивністю розпилення струменя, яка сильно залежить від тиску повітря і рідини перед соплом, форми сопла та інших параметрів [4]. Добре досліджені лише незатоплені рідинні струмені малих діаметрів і високого тиску, що є важливими для роботи двигунів внутрішнього згорання.

Практично для кожного нового класу рідинно-газових апаратів, зокрема для гідроежекторних змішувачів тампонажних розчинів, необхідно проводити експериментальне визначення коефіцієнтів ежекції [48]. Дослідження показують, що трифазні апарати з вищим коефіцієнтом ежекції для повітря мають пропорційно вищий коефіцієнт ежекції і для аерозолу [3, 8,]. Однак, наскільки нам відомо, дослідження витратних характеристик гідроежекторних змішувачів цементних розчинів як багатофазних

					ГМтаМ 601ММВ.008-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		10

струменевих апаратів на повітрі досі не проводились.

Для отримання багатофазних сумішей більш ефективними виявляються не широко розповсюджені гідроежекторні змішувачі з компактними струменями, а апарати з дисперсними багатосопловими або кільцевими струменями [16, 82]. Компактна струменя через свої гідродинамічні особливості недостатньо інтенсивно залучає потік цементу всередину камери змішування через низький коефіцієнт ежекції. Це призводить до коливань щільності розчину — основного контрольного технологічного параметра системи приготування. У той же час, коефіцієнти ежекції струменевих апаратів з дисперсною струменею досліджені недостатньо, особливо в контексті тампонажних розчинів.

					ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ	Лист
						11
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Розділ 2 Дослідження та обґрунтування параметрів бункера для сипких матеріалів

2.1 Дослідження процесу витікання цементу з бункера

Дослідження та оптимізації бункера найкраще може бути виконано на прикладі бункера для цементу. Цемент як матеріал який швидко злежується та гігроскопічний потребує оптимізації класичних систем складування та подальшого дозування.

При заповненні бункера цементом у його об'ємі можуть утворюватися статичні склепіння. Також ці склепіння можуть виникати під час витікання матеріалу, якщо напруження, що виникають у цементі, не перевищують його міцність.

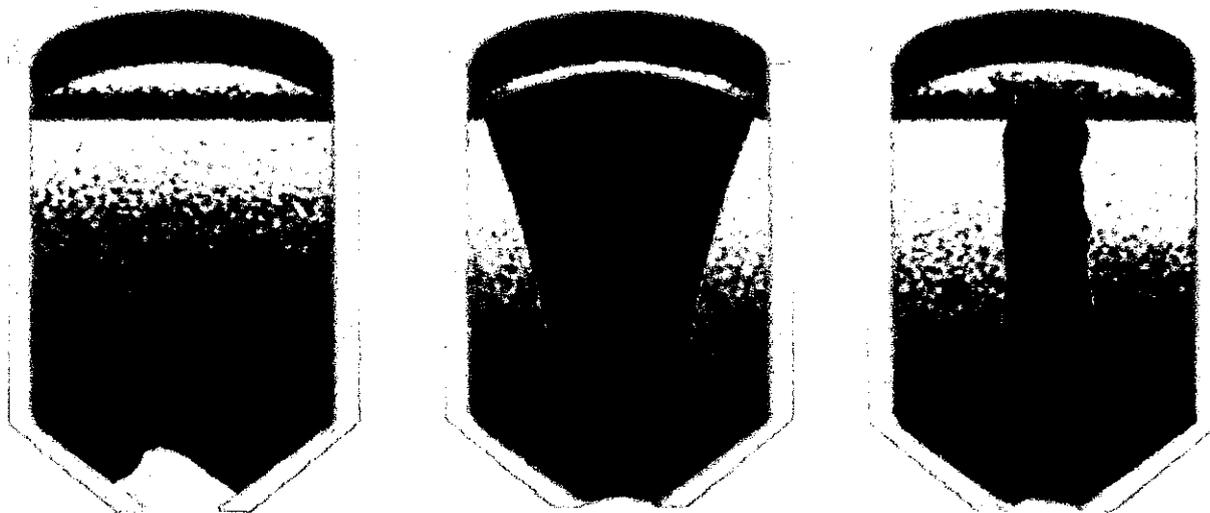


Рисунок 2.1 – Утворення склепінь, зависань та воронок

У випадку, коли площа випускного отвору є недостатньою для досягнення критичного значення напруження, при якому матеріал починає руйнуватися, після відкриття заслінки формується стійке склепіння у вигляді арки.

					ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ		
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат	Вибір технологічного процесу формування кілець і його основних параметрів		
Розроб.	Костенко						
Перев.	Орисенко						
Керівник							
Н. контр.	Васильєв			22.06			
Затв.	Орисенко				Літ.	Лист	Листів
					Н	13	
					Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		

В результаті через отвір висипається лише частина матеріалу, розташована під склепінням, а подальше витікання припиняється. Якщо ж отвір достатньо великий і тиск маси матеріалу перевищує силу зчеплення частинок, то склепіння руйнується, що призводить до безперервного витікання сипучого матеріалу [7].

Розрахунок швидкості витікання можна виконувати за різними формулами, проте єдиного загальноприйнятого підходу не існує.

Для перевірки коректності розрахунків дослідниками [7] проведено серію експериментів, під час яких вимірювали швидкість вільного витікання портландцементу з конічної ємності через отвори (патрубки) різного діаметру при різній висоті засипки матеріалу. Кут нахилу стінок ємності до вертикалі становив 15° , при куті природного ухилу цементного порошку 40° . Об'єм єм дорівнював 10 літрам.

Експерименти показали, що витікання цементу через отвори діаметром менше 60 мм не відбувалося [7]. Спроба активувати витікання за допомогою вібрації призвела до нестабільного, дискретного потоку з розривами струменя.

Через отвір діаметром 68 мм спостерігалось достатньо швидке витікання, хоча й зі змінною стабільністю.

Основною причиною відсутності витікання цементу через отвори невеликого діаметра є його швидке ущільнення, що відбувається як під час завантаження, так і при очікуванні подальшого транспортування через отвір. Ущільнення цементу швидко призводить до утворення біля отвору міцного склепіння, для руйнування якого тиску маси матеріалу у неглибокому конусі недостатньо. Вібрації, хоча й здатні порушити склепіння, водночас викликають подальше ущільнення цементу, внаслідок чого загальний ефект залишається нульовим.

					ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ	Лист
						14
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Автори роботи [8] досліджували цей процес і проводили експерименти, в яких розглядали конкретний випадок витікання сипучого матеріалу через отвір, розмір якого співвідноситься з висотою шару та діаметром бункера. Вони встановили, що поки склепіння біля отвору залишається неушкодженим, витікання матеріалу не відбувається. Руйнування склепіння призводить до раптового зсуву всієї маси матеріалу і швидкого скочування його в отвір, який порівняно великий щодо висоти шару. Масове і швидке течіння цементу, насиченого повітрям, за своїми властивостями подібне до течії рідини, тому для розрахунку швидкості витікання доцільно використовувати гідравлічні формули.

Нехай за нескінченно малий час dt висота рівня рідини в ємності зміниться на величину dh , а об'єм ΔV витеклої рідини дорівнюватиме

$$\Delta V = -S(h) \cdot dh, \quad (2.1)$$

де $S(h)$ – площа поперечного перерізу ємності на висоті h над отвором, причому висота $h(t)$ є функцією часу, що описує процес витікання. З іншого боку, $\Delta V = v(h) \cdot s \cdot \mu \cdot dt$, де μ – коефіцієнт витрати, $v(h)$ – швидкість витікання ідеальної рідини через нижній отвір ємності, s – живий переріз випускного отвору. Таким чином:

$$S(h) \cdot \frac{dh}{dt} = -v(h) \cdot s \cdot \mu \quad (2.2)$$

Відповідно

$$\frac{dh}{v(h)} = -\frac{s \cdot \mu}{S(h)} \cdot dt \quad (2.3)$$

Час повного спорожнення ємності T можна визначити, інтегруючи ліву частину в межах від 0 до T , а праву частину – в межах від H до 0, де H – початкова висота рідини в ємності:

$$T = \int_H^0 \frac{S(h)}{v(h) \cdot s \cdot \mu} dh \quad (2.4)$$

де ρ і ρ_v – густини витікаючої рідини та води відповідно, а в правій частині всі величини відомі або визначаються лише конструктивними розмірами самої ємності. Для конічної ємності:

$$S(h) = \pi \cdot \left(\frac{d_c}{2}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{h}{H \cdot \tan(\alpha)}\right)^2 \quad (2.5)$$

де d_c – діаметр випускного отвору, α – кут нахилу утворюючої конуса до вертикалі. Тоді для конічної ємності отримаємо формулу для визначення часу витікання рідини через випускний отвір діаметром d_c :

$$T = \int_H^0 \frac{4H \cdot \tan(\alpha)}{\pi \cdot \mu \cdot v(h)} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{h}{H \cdot \tan(\alpha)}\right)^2} dh \quad (2.7)$$

Або після розкриття інтеграла

$$T = \frac{4H \cdot \tan(\alpha)}{\pi \cdot \mu \cdot v(H)} \cdot \left[1 - \frac{H}{H + h \cdot \tan(\alpha)}\right] \quad (2.8)$$

Результати розрахунку часу витікання за формулою (2.8) для умов,

описаних у зазначеному експерименті, представлені в таблиці 2.1. У розрахунках приймали $\rho=1200 \text{ кг/м}^3$, $\mu=0.64$, $\alpha=15^\circ$. Порівняння експериментальних даних із розрахунками показує, що з урахуванням короткочасності процесу та відносно невисокої точності вимірювань, гідравлічна формула в розглянутих експериментах дає правильну оцінку величини швидкості витікання.

Нами було проведено розрахунок за наведеними формулами за яким час витікання для об'єму 2 м^3 за різних кутів нахилу конуса α склав:

Для $\alpha=15^\circ$: 263 с

Для $\alpha=20^\circ$: 247 с

Для $\alpha=25^\circ$: 235 с

Технічні аспекти витікання сипучого матеріалу через невеликий отвір, порівняно з діаметром і висотою бункера, вимагають окремого аналізу. Коли отвір є малим відносно розмірів бункера, процес витікання сипучого матеріалу після руйнування арки частинок можна моделювати з урахуванням, що частинки виходять з бункера в режимі вільного падіння. Відповідно до цієї гіпотези, витікання матеріалу з отвору відбувається під впливом сили тяжіння, а не тиску верхніх шарів матеріалу. Тиск матеріалу лише викликає втрату стійкості арки, але не визначає швидкість витікання.

Згідно з цією моделлю, витрата сипучого матеріалу через отвір в межах певних параметрів не залежить від рівня матеріалу в бункері. Процес витікання матеріалу можна порівняти з рухом окремої частинки, що падає в повітрі під впливом сили тяжіння, де поведінка потоку частинок у цьому випадку нагадує аеродинамічний опір.

Згідно з дослідженнями в зарубіжній літературі [6, 9], швидкість падаючого тіла визначається рівновагою сили тяжіння та сили опору середовища. У даному випадку, враховуючи те, що частинки сипучого матеріалу перебувають у вільному падінні, їхня швидкість буде визначатися

тільки силами тяжіння та опору повітря, без значного впливу тиску верхніх шарів матеріалу.

Таким чином, для точного моделювання і прогнозування витрати сипучих матеріалів через невеликі отвори важливо враховувати ці аспекти, що впливають на динаміку їхнього руху і ефективність процесу витікання.

$$V_m \rho_m g \sim S_m \rho v_m^2 C_m \quad (2.9)$$

де V_m , ρ_m — об'єм і густина сипучого матеріалу,

g — прискорення вільного падіння,

S_m — площа поперечного перерізу падаючого тіла,

ρ — густина повітря,

v_m — швидкість падіння,

C_m — коефіцієнт опору.

Це рівняння демонструє баланс між силою тяжіння, яка намагається прискорити частинку, і силою опору повітря, яка перешкоджає її руху. Швидкість падіння частинки досягає сталого значення, коли ці сили врівноважені.

Можна зазначити наступне, що $V_m \sim L^3$, $S_m \sim L^2$, де L розмір тіла що переміщається.

Відповідно за формулою «БАВЕРЛЮ» об'ємна витрата записується за формулою

$$G_m = C \rho \sqrt{g} D^{5/2}, \quad (2.10)$$

Де D — діаметр отвору

C – емпіричний коефіцієнт приймаємо $0,5 \dots 0,75$.

З урахуванням оптимальної швидкості $v = \sqrt{gD}$ перетворюємо формулу (2.10) до наступного виду

$$G_v = \frac{4C}{\pi} S \rho \sqrt{gD} \quad (2.11)$$

Де S – площа перерізу отвору.

Таким чином, швидкість витікання цементу через донний отвір може бути розрахована за наведеними вище формулами. Однак процес витікання значно залежить від явища сводовутворення, яке може суттєво впливати на результати. Якщо отвір є недостатньо великим, утворення стабільної арки з частинок може перешкоджати або навіть повністю блокувати витікання матеріалу.

Явище сводовутворення — це процес формування аркової структури частинок сипучого матеріалу над отвором, що веде до зменшення ефективної площі виходу і, як наслідок, до зниження швидкості витікання. Формула Беверло, яка описує витікання сипучих матеріалів, підкреслює важливість цього явища: ефективне витікання можливе лише при певному співвідношенні між розмірами отвору і характеристиками сипучого матеріалу.

Важливо зазначити, що при великих обсягах матеріалу ефект сводовутворення може бути значним, і його потрібно враховувати для точного прогнозування витрат. Дослідження сводовутворення і його впливу на процес витікання є критичними для проектування і оптимізації систем вивантаження цементу та інших сипучих матеріалів.

У роботах [4, 6, 7] літературі є рекомендації щодо методики розрахунку мінімального діаметра отвору в днищі бункера, через який цемент може

витікати без перешкод.

Для уточнення цього питання проведено дослідження [5] властивостей цементу як сипучого матеріалу. В інженерній практиці властивості сипучих тіл зазвичай аналізують на основі кулонівського тертя. Основними параметрами в цьому випадку є кути внутрішнього та зовнішнього тертя, а також початкове напруження зрізу. Ці параметри визначаються за допомогою простих приладів – тестерів зрізу [9] (рисунок 2.2).

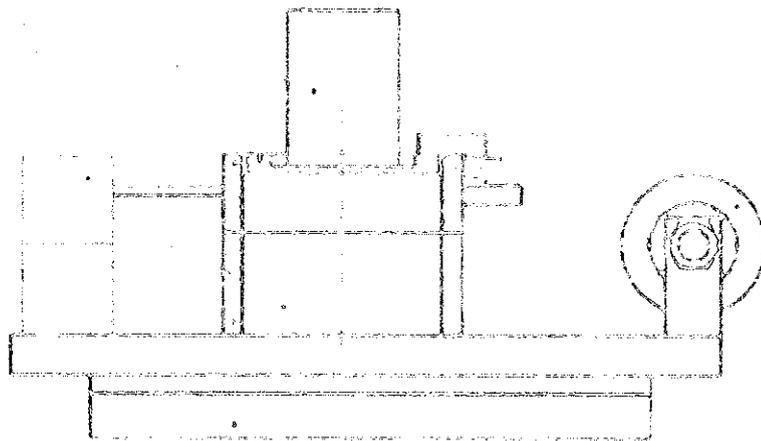


Рисунок 2.2 – Схема приладу для досліджень [5]

Конструктивно тестер зрізу складається з циліндричного корпусу 1 з поглибленням, заповненого сипучим матеріалом 2. На ньому встановлено кільце 3, що також заповнюється сипучим матеріалом і має можливість зсуву. Кільце закривається зверху плоскою кришкою 4, яка центрується гвинтом і

здійснює тиск на поверхню сипучого матеріалу. До корпусу прикріплена гнучка нитка, перекинута через блок 5. На кінці нитки підвішено ємність 6, в яку з мірного посуду наливають воду, що забезпечує зрізувальне зусилля S . Кришка 4 має майданчик для розміщення вантажів 7, які забезпечують стисне (нормальне до поверхні зрізу) зусилля V . Момент початку переміщення кільця 3 під впливом зрізувального зусилля фіксується датчиком переміщення 8. Значення зрізувального зусилля фіксується вагами 9. Сигнал від датчика переміщення і вагів надходить на комп'ютер.

Вимірювання на тестері виконуються наступним чином: сипучий матеріал підлягає попередньому ущільненню. Потім на кришку 4 встановлюється необхідна кількість вантажів, що створюють стисне нормальне зусилля V . Поступово наливаючи в ємність 6 рідину, збільшують зрізувальне зусилля до величини S , що викликає переміщення кільця 3. Момент початку переміщення і вага, при якій відбулося переміщення, фіксуються на комп'ютері. Навіть невелике переміщення кільця свідчить про досягнення граничного стану матеріалу при даних комбінаціях нормальної V і зрізувальної S навантажень (нормального і зсувного напружень). Вимірювання продовжуються з поступовим зниженням нормальної навантаження від зусилля попереднього ущільнення до мінімально можливого нормального зусилля, і за результатами вимірювань будується графік залежності граничного зрізувального навантаження від стисного. Кут внутрішнього тертя сипучого матеріалу (далі позначається $\phi_{\text{вн}}$) на цьому графіку відповідає кута нахилу графіка до осі V , а граничне напруження зрізу характеризується відрізком, який графік перетинає на осі S . Якщо сипучий матеріал не має зчеплення, графік проходить через початок координат, і граничне напруження зрізу дорівнює нулю.

На тому ж тестері можна визначити кут зовнішнього тертя, якщо в корпус 1 помістити не сипучий матеріал, а вставку з твердого матеріалу, для вивчення тертя по якому. Кут зовнішнього тертя є кут нахилу графіка

залежності зрізувальної навантаження від стисної при переміщенні сипучого матеріалу по досліджуваній твердій поверхні.

Графік залежності зрізувального зусилля від нормальної навантаження фактично є огинаючою граничних кругів Мора для сипучого матеріалу [9]. Ця огинаюча є механічною характеристикою матеріалу [46], і, оскільки для сипучого матеріалу відсутні діаграми розтягування-сжаття, це є єдиною механічною характеристикою. Як відомо, найбільше і найменше значення, відкладені кругом Мора на осі нормального навантаження, є два головних нормальних напруження.

Сипучий матеріал, що знаходиться в бункері з закритим випускним отвором, є нерухомим. Якщо раптово відкрити отвір, матеріал може почати витікати при достатньо великому отворі. Якщо отвір малий, а матеріал має зчеплення, сипучий матеріал залишиться нерухомим. Для кількісної оцінки поведінки сипучого матеріалу біля відкритого отвору слід звернути увагу на те, що для сипучого матеріалу, що знаходиться біля випускного отвору, менше головне нормальне напруження дорівнює нулю. Тому, якщо побудувати круг Мора з нульовим меншим головним напруженням, по огинаючій можна знайти мінімальне нормальне навантаження V_{min} , при якому сипучий матеріал обрушиться біля випускного отвору бункера. За цією величиною нормальної навантаження можна знайти мінімальне руйнуюче касальне зрізувальне зусилля S_{min} біля випускного отвору, а також мінімальний розмір отвору D_{min} , що забезпечить витікання матеріалу.

Уточнюючі вимірювання параметрів ряду сипучих матеріалів, що використовуються в нафтовій та газовій промисловості, проведені автором на тестері зрізу власного виготовлення з площею поверхні зрізу 19,8 см².

Тестер який використовувався нами для проведення дослідів зображено на рисунках рисунок 2.3-2..

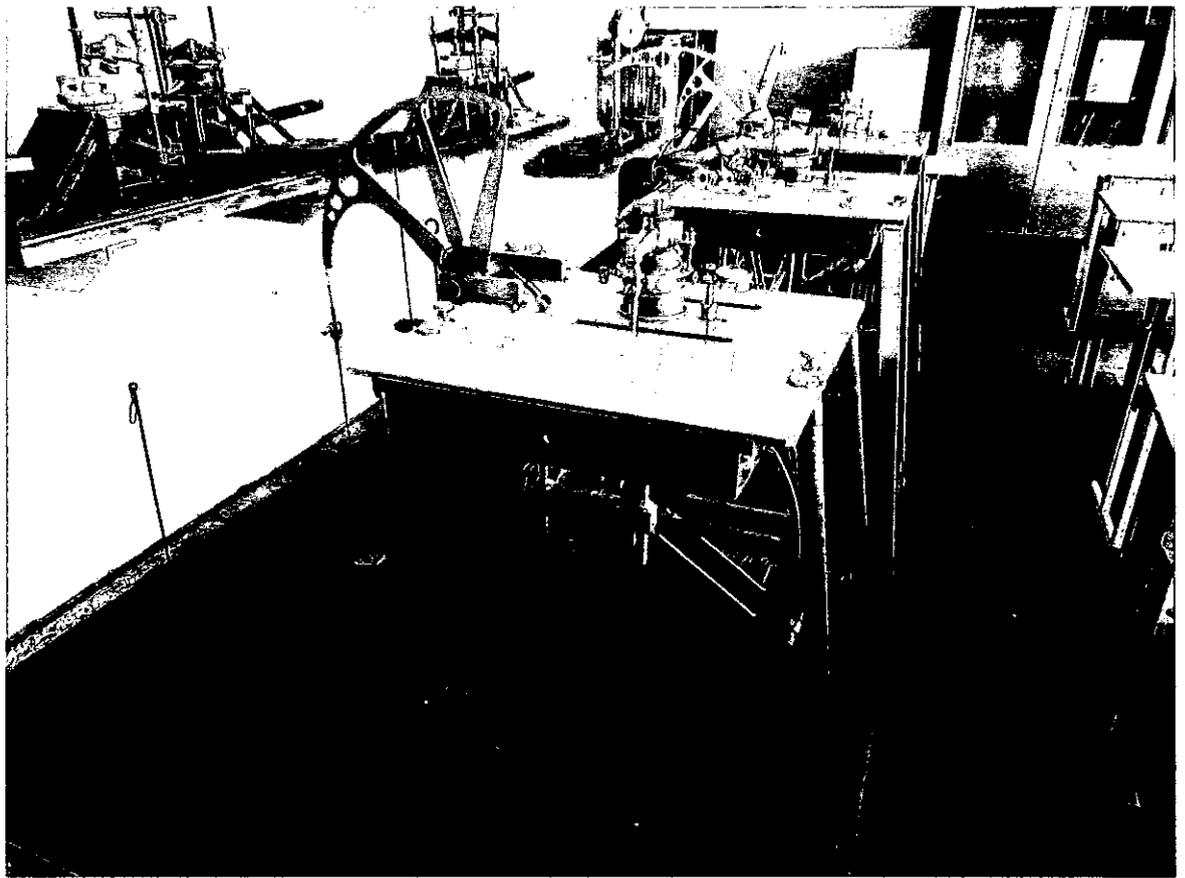


Рисунок 2.3 – Прилад ля проведення досліджень

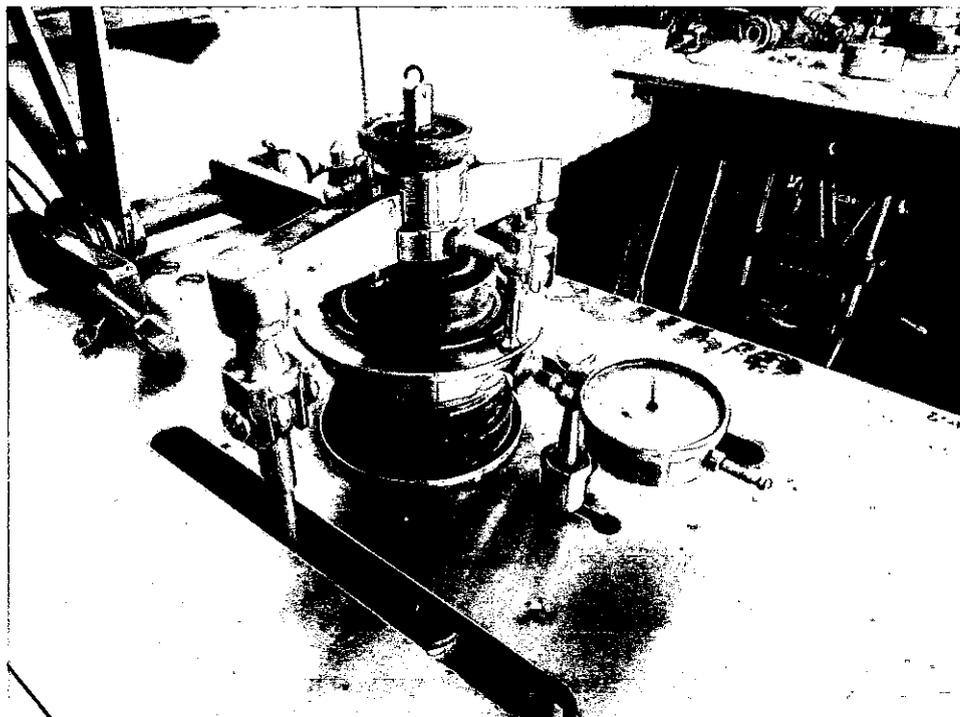


Рисунок 2.4 – Прилад ля проведення досліджень

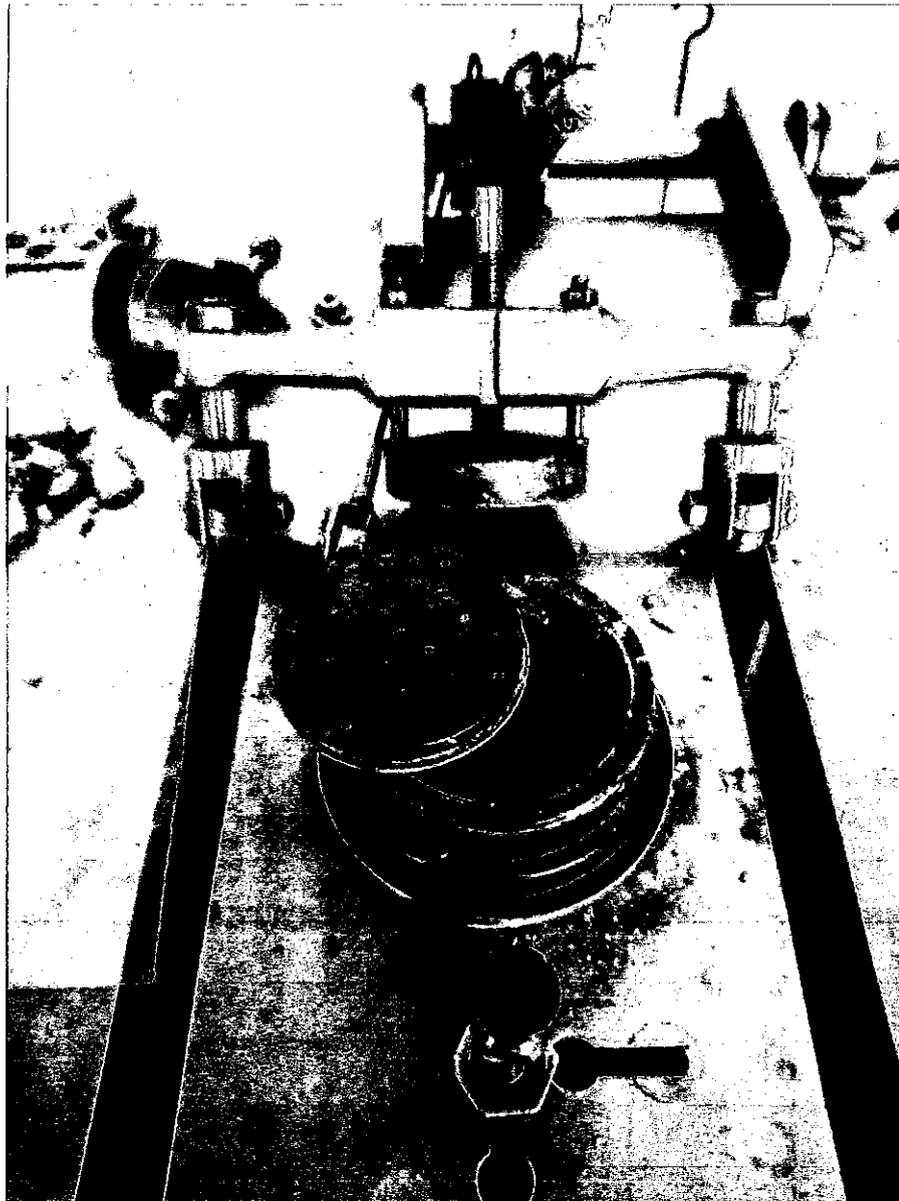


Рисунок 2.5– Прилад ля проведення досліджень

Для порівняння були експериментально досліджені різні сипучі матеріали, і встановлено різне ущільнення при однаковому тиску. Для перевірки працездатності тестера досліджено сухий пісок насипною масою 1400 кг/м^3 , просіяний через сито з осередком $1 \times 1 \text{ мм}$, вологість піску $0,4 \%$. Графік залежності зрізувального зусилля від нормальної навантаження для піску представлений на рисунку 2.7. Графік лінійний і проходить через нуль, що свідчить про те, що пісок не має зчеплення і не ущільнюється під дією стисного навантаження.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ

Лист

24

Для портланд цементу графік залежностей здвигу від нормальної навантаження наведено на рисунку 2.7 та на рисунку 2.8 для цементу який попередньо був навантажений тиском 20кПа.

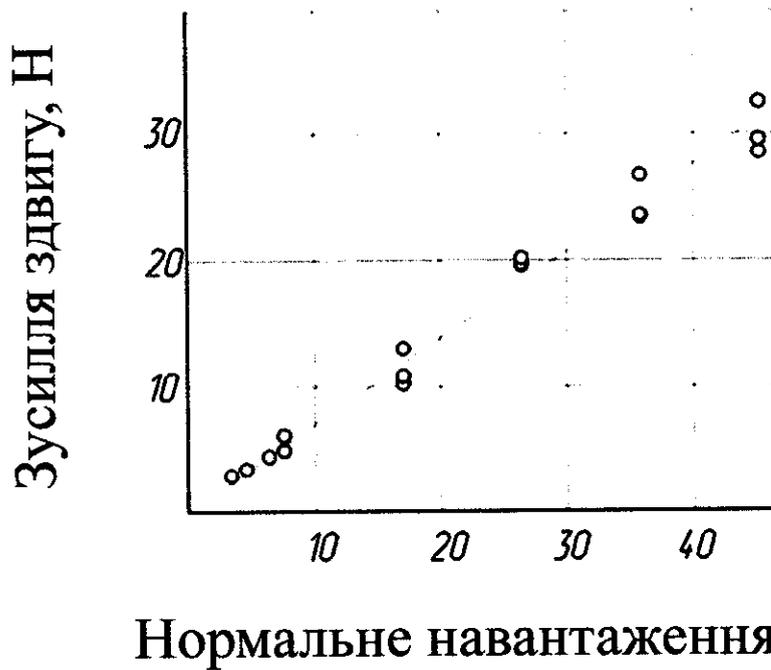


Рисунок 2.6 – Графік залежностей здвигу від нормальної навантаження (пісок)

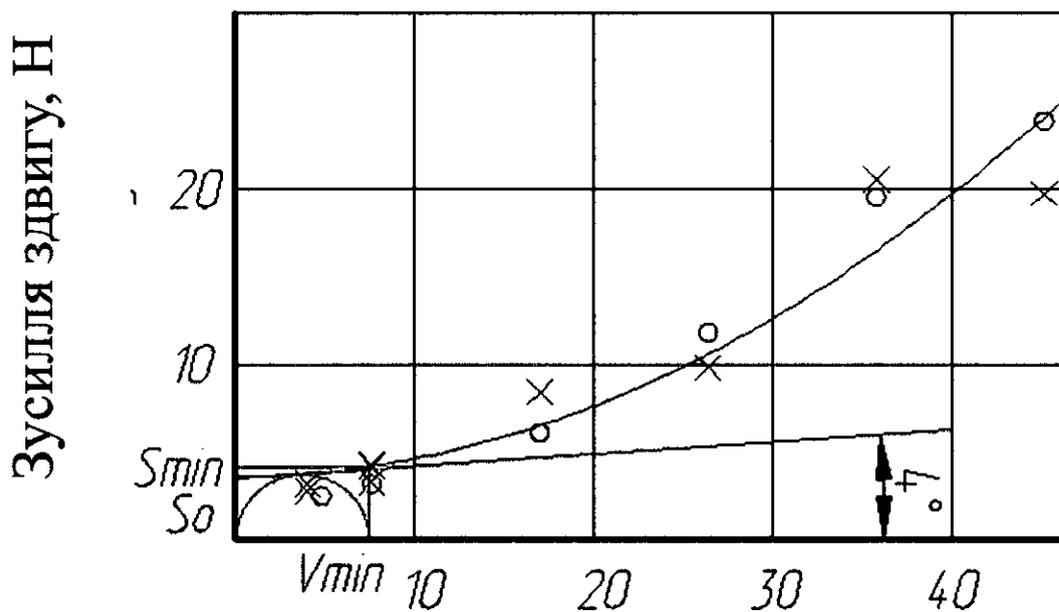


Рисунок 2.7 – Графік залежностей здвигу від нормальної навантаження (цемент)

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ

Лист
25



Нормальне навантаження, Н

Рисунок 2.8 – Графік залежностей здвигу від нормальної навантаження (для цементу який попередньо був навантажений тиском 20кПа.)

2.3 Аналіз впливу кута нахилу стінок бункера на процес випуску цементу через донний отвір

Розмір діаметра випускного отвору бункера, достатнього для вивантаження матеріалу, не повністю характеризує закінчення. Якщо стінки бункера недостатньо круті, то течія обмежиться тільки центральною областю, розташованої над отвором, а решта об'єму матеріалу може зависнути, якщо його не спонукати до течії, руйнуючи склепіння.

Наступним етапом роботи було підбір дозуючого елемента бункера, спочатку було проведено аналіз класифікації бункерів наведений на рисунку 2.9.

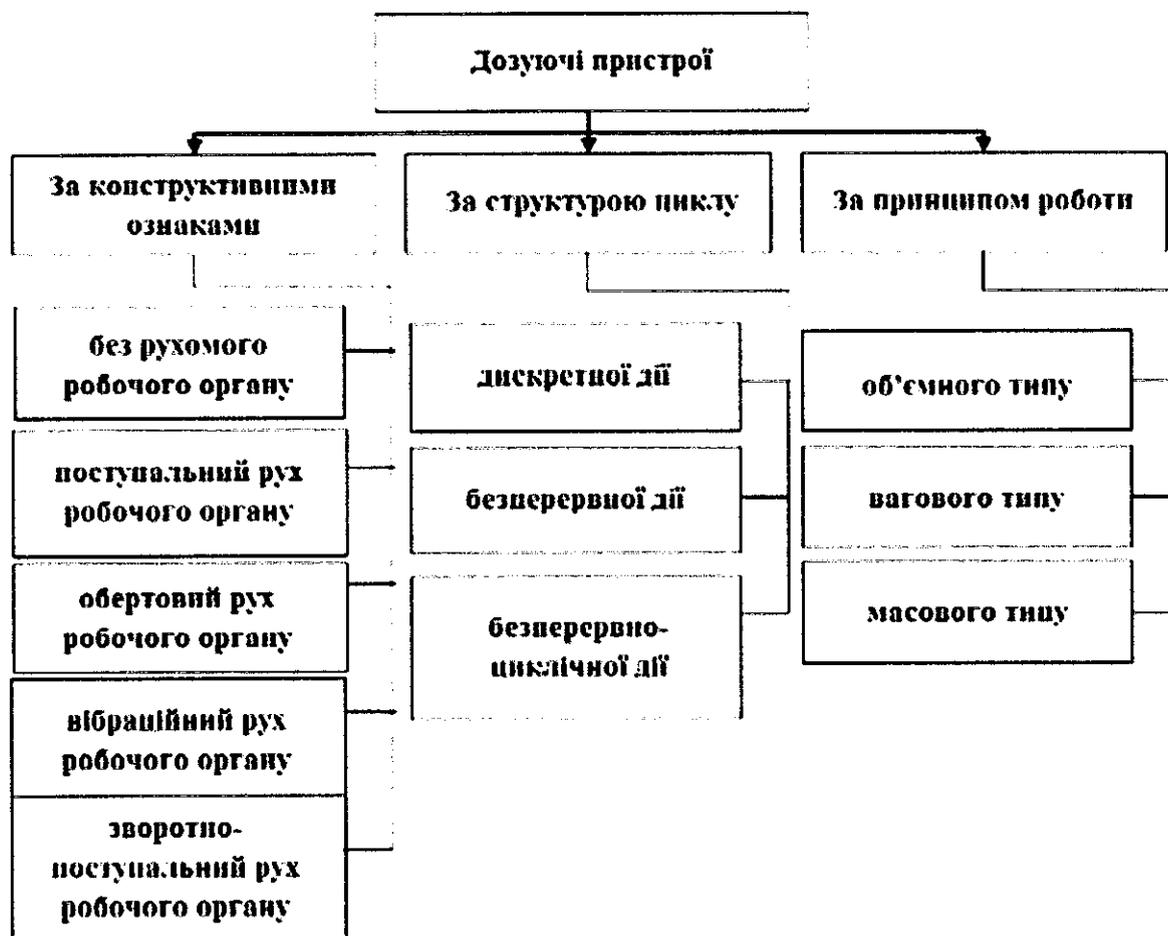


Рисунок 2.9 – Класифікація дозуючих пристроїв

Граничну крутість стінок, що забезпечує масовий рух, зазвичай визначають за допомогою розрахункових або експериментальних графіків. Один із варіантів такого графіка [11] представлений на рис 2.10.

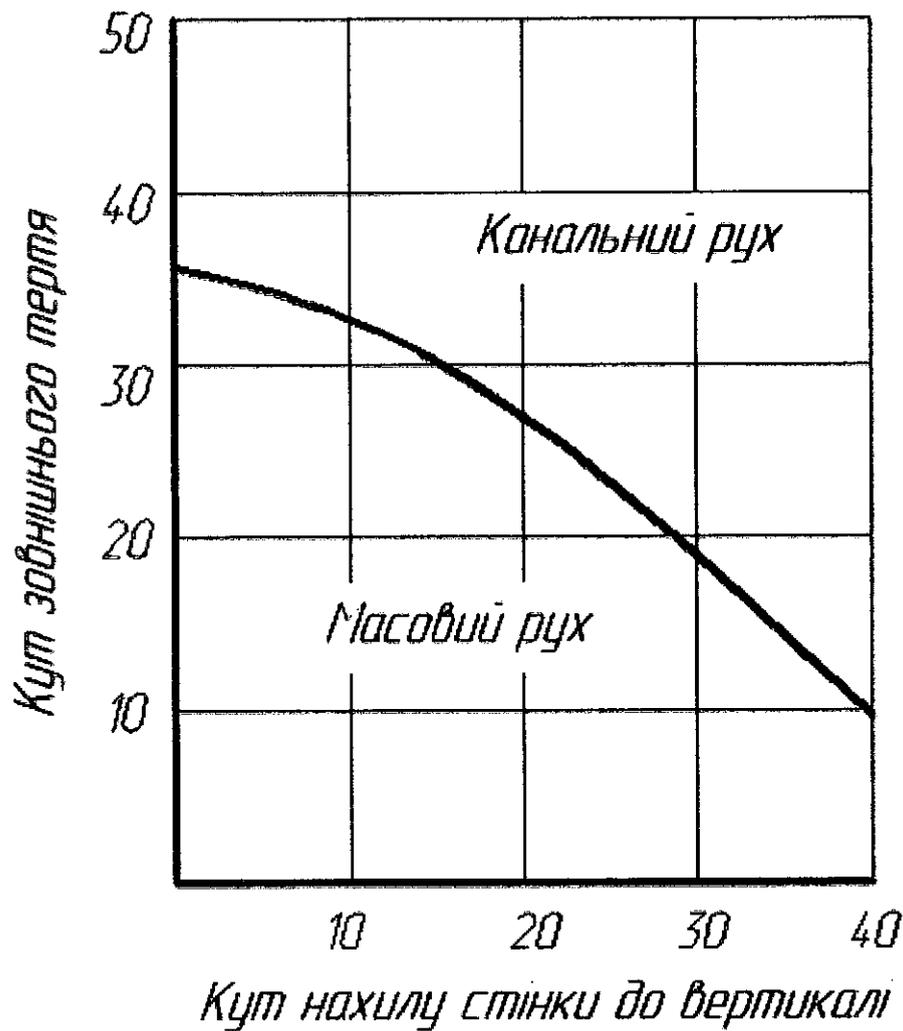


Рисунок 2.10 Графік визначення виду закінчення

Аналогічні рекомендації можна знайти у [9]. Для використання графіка визначення виду руху рис. 2.10 необхідно знати кут зовнішнього тертя матеріалу за його ковзання по матеріалу стінок. Вимірювання кута зовнішнього тертя для ущільненого цементу шліфованої сталі представлені на рис. 2.11. Апроксимуюча лінійна регресія побудована шляхом найменших квадратів аналогічно попередньому графіку.

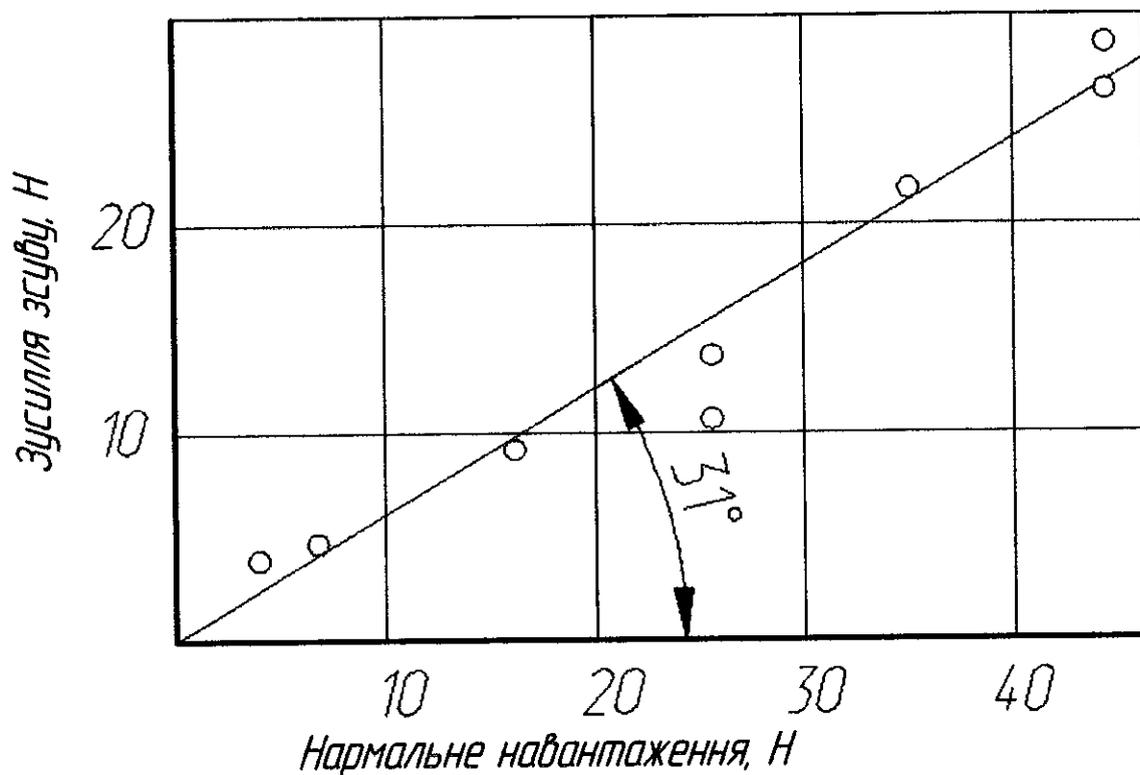


Рисунок 2.11– Вимірювання кута зовнішнього тертя ущільненого цементу по шліфованій сталі

Відповідно до цих вимірів кут зовнішнього тертя цементу по сталі становить близько 31° . Відповідно до рисунка 2.11 масовий рух цементу із сталевого бункера буде забезпечене при кутах нахилу стінок до вертикалі приблизно менше 140° . Очевидно, що для більшості цементувальних установок такі круті стінки недосяжні

Одним із способів зниження кута зовнішнього тертя сипких матеріалів служить футерування внутрішньої поверхні бункерів полімерними антифрикційними матеріалами. На рис. 2.12 наведено результат вимірювань кута зовнішнього тертя для пари цемент-фторопласт. При розвантаженні кут тертя становить 170° , що згідно з рис. 2.10 дозволяє використовувати бункер із кутами нахилу стінок до вертикалі менше 320° . Щоправда, при високих ущільненнях кут тертя полімерного покриття зростає, тобто при вивантаженні бункера з цементом, ущільненим транспортуванням, можуть виникнути

проблеми. Крім того, футерування ускладнює конструкцію і застосовується тільки в крайніх випадках.

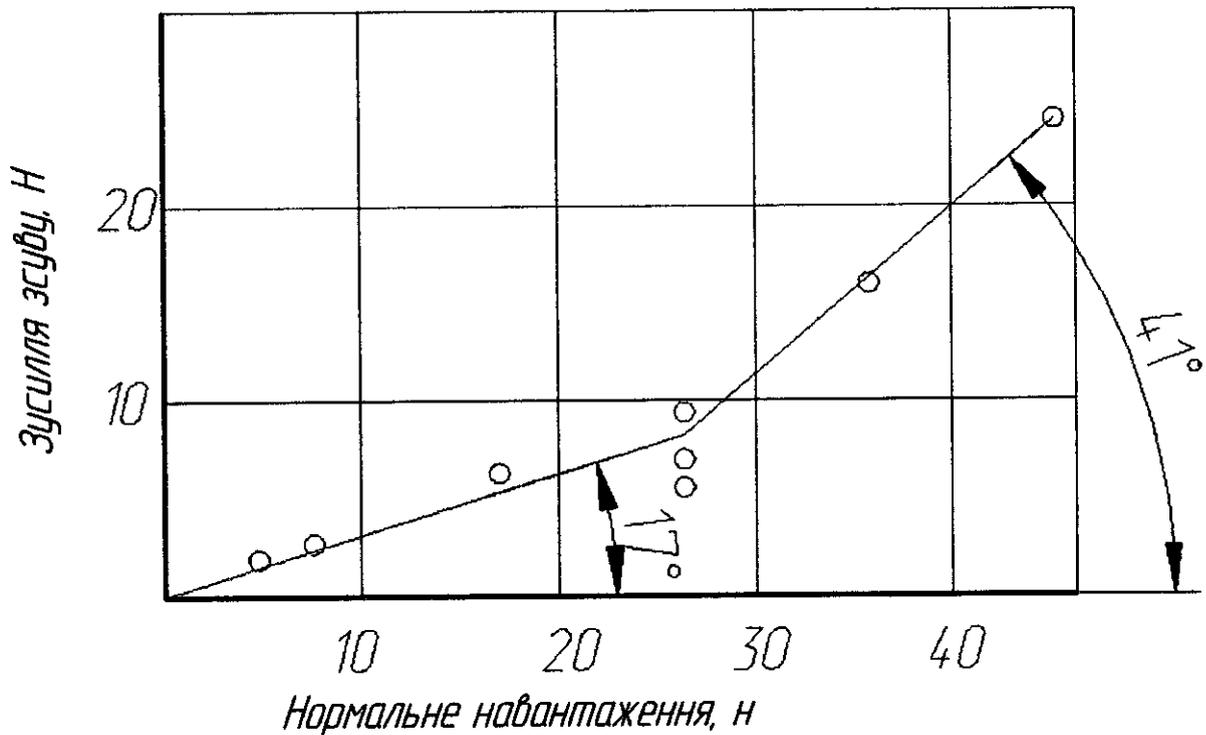


Рисунок 2.12 Вимірювання кута зовнішнього тертя для пари цемент – фторопласт

Таким чином, режим вільного руху цементу з бункера цементувальної установки з кутом нахилу більше 170 буде каналний, а повне випорожнення такого бункера через нижній отвір без аерації або інших спонукання.

2.4 Рух в шнековому живильнику

Виконані дослідження процесу закінчення цементу з донних випускних отворів бункерів привели до висновку, що через інтенсивне свідоутворення вільний рух цементу з бункера через нижній отвір не забезпечить стабільного дозованого приготування суміші. У зв'язку з цим було перевірено можливість стабілізувати рух цементу з отвору бункера за допомогою шнекового живильника традиційної схеми.

Шнек має значний опір руху і при визначенні швидкості закінчення ми повинні враховувати цей опір. За основу візьмемо формулу Беверло , але уточнимо величину коефіцієнта опору з поправкою на шнек. Для виведення розрахункової формули, перш за все, необхідно відзначити, що витки шнека, що безперервно проходять під випускним отвором бункера, зрізуючи з кожним оборотом порцію цементу, одночасно відновлюють цілісність цементної арки над випускним отвором. Арка тому руйнується циклічно.

Рух цьому випадку стає перемежуючим (в англомовній літературі цей режим називають “ intermittent flow ”[5]), швидкість руху циклічно змінюється від нуля до максимуму. Візуально спостерігається виразний переривчастий процес просування цементу до випускного отвору. Причому частота пульсацій шару цементу приблизно збігається із частотою обертання шнека. Очевидно, що для цього випадку коефіцієнт опору повинен бути знижений приблизно вдвічі, тобто в середньому для переміщення цементу в шнек $C=3,0$.

Шнек може розглядатися як місцевий опір та враховуватись за аналогією з гідродинамічними формулами коефіцієнтом місцевого опору ζ . Величина цього коефіцієнта також за аналогії з гідродинамічними процесами може вважатися пропорційною деякою мірою від швидкості потоку або у разі шнека із заданим кроком витків – від частоти обертання шнека n

$$\zeta = A n^x, \quad (2.12)$$

де A, x – деякі позитивні числа.

У гідродинаміці для ламінарного перебігу $x = 1$, для перехідного $x = 4, 1$ для турбулентного $x = 2$ [2]. Оскільки потік сипучого матеріалу важко однозначно ідентифікувати з точки зору гідродинамічних режимів приймемо попередньо $x = 4,1$, маючи на увазі можливість уточнення показника ступеня у формулі (2.12). Оцінимо порядок величини коефіцієнта пропорційності A у співвідношенні (2.12). І тому зауважимо, що з $n = 0$ протягом матеріалу відсутня, тобто $\zeta = 0$. При деякому досить великому n величина витрати наближається до

максимуму, що досягає вільного руху (переміщення), тобто, ймовірно до величини коефіцієнта опору C при вільному русі. Тому як граничне можна покласти $\zeta = 5,0$ при деякій досить великій величині n . Як таку величину n можна прийняти частоту обертання шнека, при якій ідеальна швидкість матеріалу в шнеку виявиться рівною ідеальній швидкості руху. Оскільки ідеальна швидкість матеріалу в шнеку дорівнює:

$$v_{ш} = t \frac{n}{60}, \quad (2.13)$$

де t - крок шнека, м, причому оскільки зазвичай $t \approx 2D_{ш}$, а діаметр шнека $D_{ш}$ як правило близький до діаметра випускного отвору бункера D , то можна вважати,

що $v_{ш} \approx D \frac{n}{120},$

$$\sqrt{gD} \approx D \frac{n}{120}, \quad (2.14)$$

звідки отримаємо оцінку частоти обертання, при якій досягається рівність ідеальних швидкостей витікання та транспортування шнека:

$$n \approx 120 \sqrt{\frac{g}{D}}. \quad (2.15)$$

З умови $\zeta = 5,0$ при цьому значенні n виведемо оцінку коефіцієнта рівняння

А

$$A \approx \frac{0,5}{\left(120\sqrt{\frac{g}{D}}\right)^{1,4}} . \quad (2.16)$$

З урахуванням цих зауважень розрахункове співвідношення для масової витрати цементу через отвір бункера, оснащеного шнеком, набуде вигляду:

$$G_{\text{ц}} = \frac{4C\zeta}{\pi} S\rho\sqrt{gD} , \quad (2.17)$$

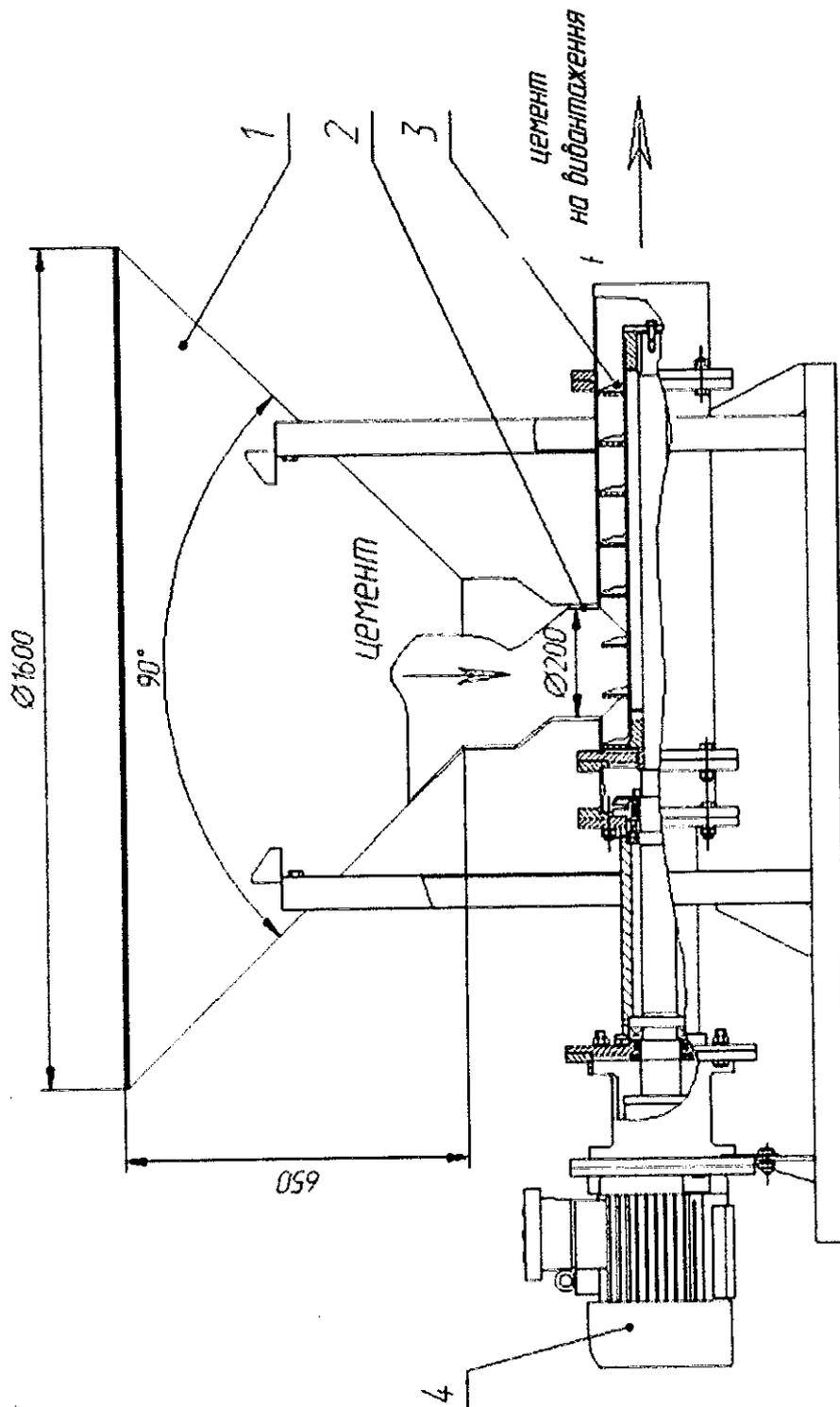
або після підстановок:

$$G_{\text{ц}} = \frac{0,6}{\pi} \left(\frac{n}{120\sqrt{\frac{g}{D}}} \right)^{1,4} S\rho\sqrt{gD} . \quad (2.18)$$

Обладнання на якому спостерігається процес шнекового вивантаження з лійки схематично зображено рис. 2.9. Встановлення включає воронку 1 місткістю близько 600 кг цементу, оснащену випускним отвором 2. Отвір повідомлено з входом в корпус горизонтального шнека 3. Діаметр шнека 260 мм, зовнішній діаметр валу шнека дорівнює 108 мм, крок 96 мм, довжина 790 мм. Привід шнека здійснювався від електродвигуна 4 з частотою обертання, регульованої перетворювачем частоти змінного струму. Кут нахилу направляючої конуса вирви 45°. Діаметр випускного отвору прийнято для пухкого цементу - 200 мм. Витрата цементу визначали за часом випорожнення

					ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ	Лист
						33
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

вирви. На рис. 2.13 показано фотографію вивантажувального кінця шнека обладнання.



1 – лійка; 2 - випускний отвір; 3 – корпус горизонтального шнека; 4 – електродвигун

Рисунок 2.13 Обладнання для переміщення цементу

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМтаМ 601ММВ.008-00.00.000 ПЗ

Лист
34

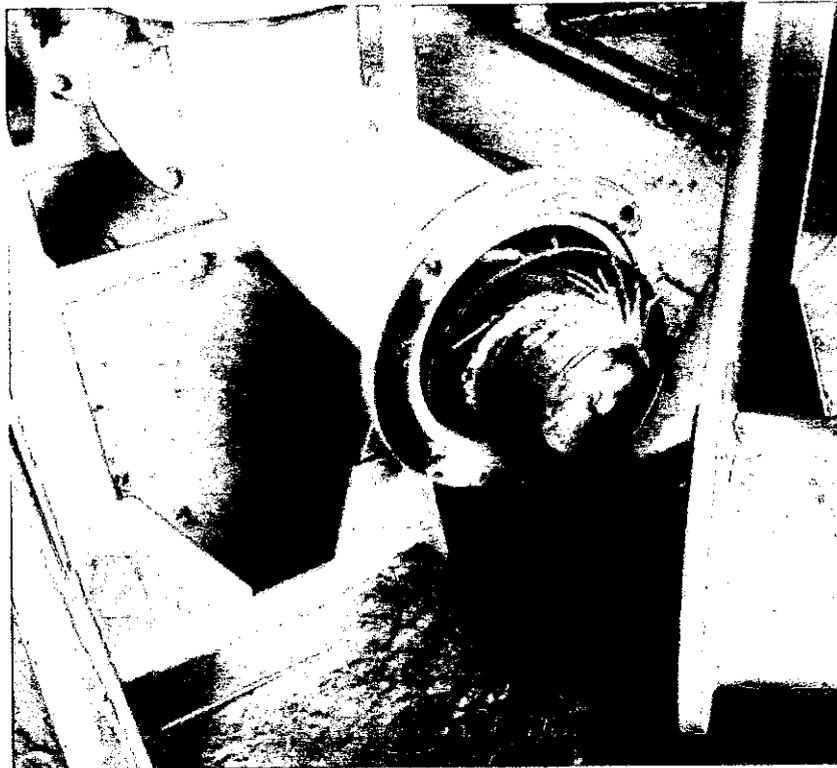


Рисунок 2.14 Вивантажувальний кінець шнека

Розрахункові криві залежності витрати цементу від частоти обертання шнека представлені графічно рисунках (2.15.-2.18)

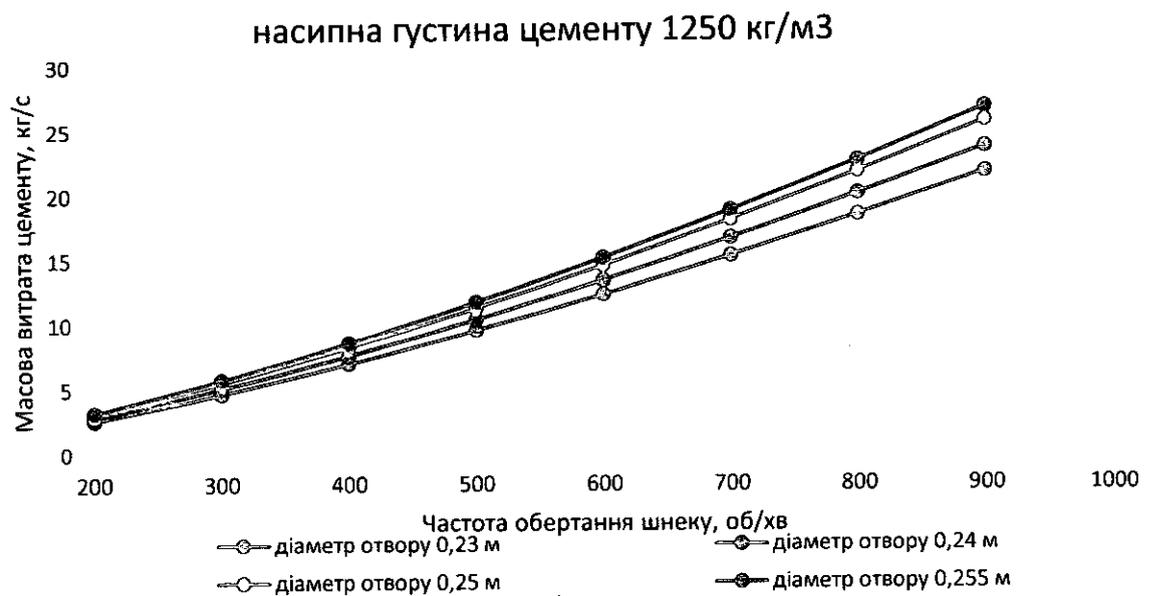


Рисунок 2.15 Розрахункові криві залежності витрати цементу від частоти обертання шнека (при густині 1250 кг/м³)

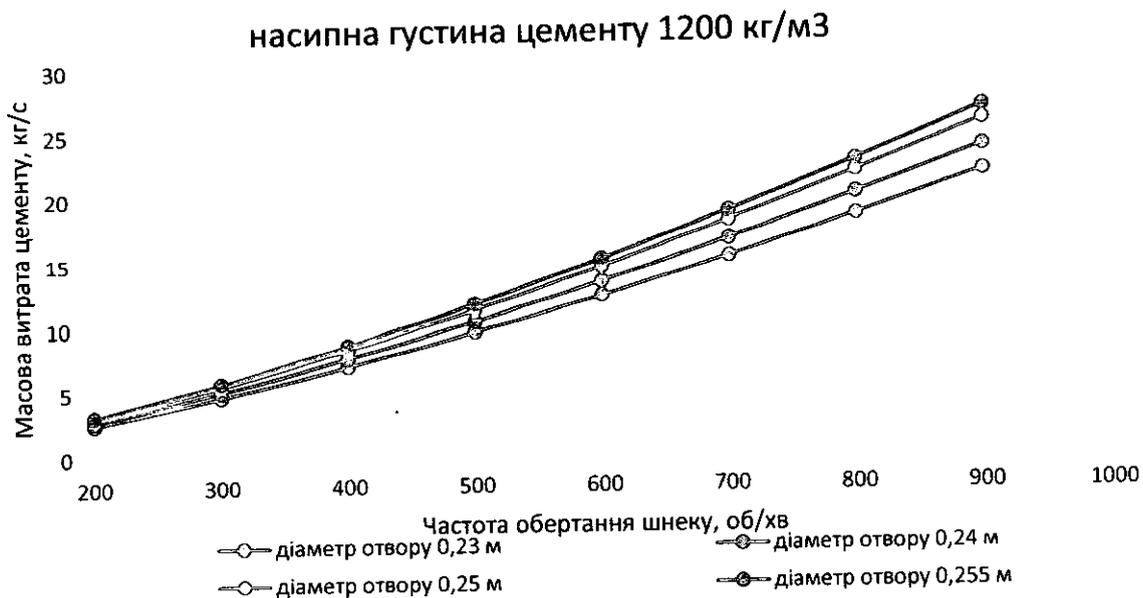


Рисунок 2.16 Розрахункові криві залежності витрати цементу від частоти обертання шнека (при густині 1200 кг/м³)

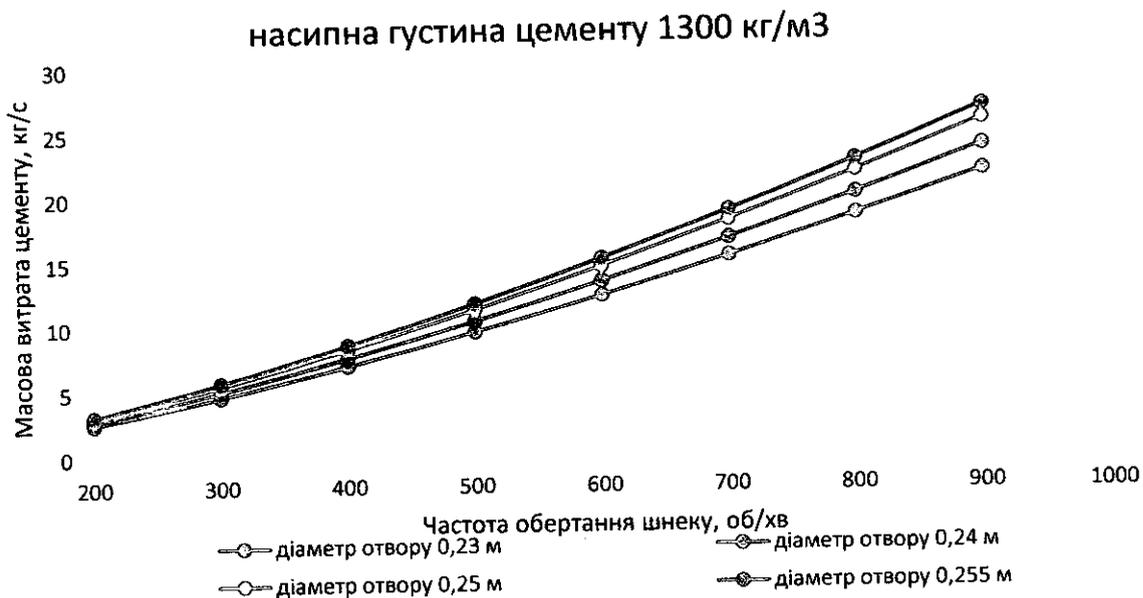


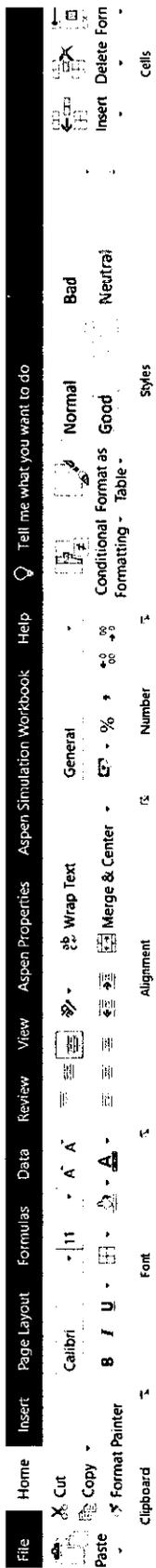
Рисунок 2.17 Розрахункові криві залежності витрати цементу від частоти обертання шнека (при густині 1300 кг/м³)

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМтаМ 601ММВ.008-00.00.000 ПЗ

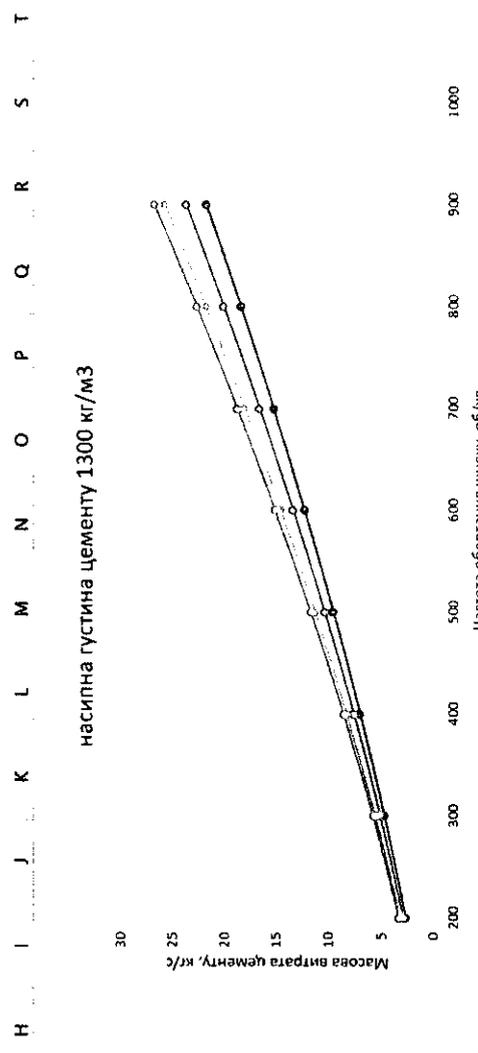
Лист

36



d	A	B	C	D	E	F	G
0,23	0,041527	200	2,653392	2,889137	3,134914	3,261565	
0,24	0,045216	300	4,680897	5,09678	5,530361	5,753787	
0,25	0,049063	400	7,002342	7,624478	8,273089	8,607321	
0,255	0,051045	500	9,570119	10,42039	11,30685	11,76365	
		600	12,35296	13,45048	14,59471	15,18434	
		700	15,32839	16,69027	18,1101	18,84175	
		800	18,47929	20,12112	21,83281	22,71486	
		900	21,79209	23,72825	25,7468	26,78697	

4	D	0,26
5		
6		
7		Густина 1300



насипна густина цементу 1300 кг/м³

Рисунок 2.18 Розрахункові криві залежності витрати цементу від частоти обертання шнека (етапи розрахунку)

Виявлено, що масова витрата цементу від частоти обертання шнеку на малих обертах при різних діаметрах випускових отворів майже не змінюється. При цьому починаючи з значення частоти 600 об/хв, значення масової витрати цементу збільшується суттєво. Якщо порівняти залежності масової витрати цементу при різних значення насипної густини цементу, то ці значення теж відрізняються не суттєво. Це говорить про те, що найбільш вплив на процес переміщення цементу буде мати частота обертання шнеку.

На рисунку 2.19 зображена розроблена модель бункера.

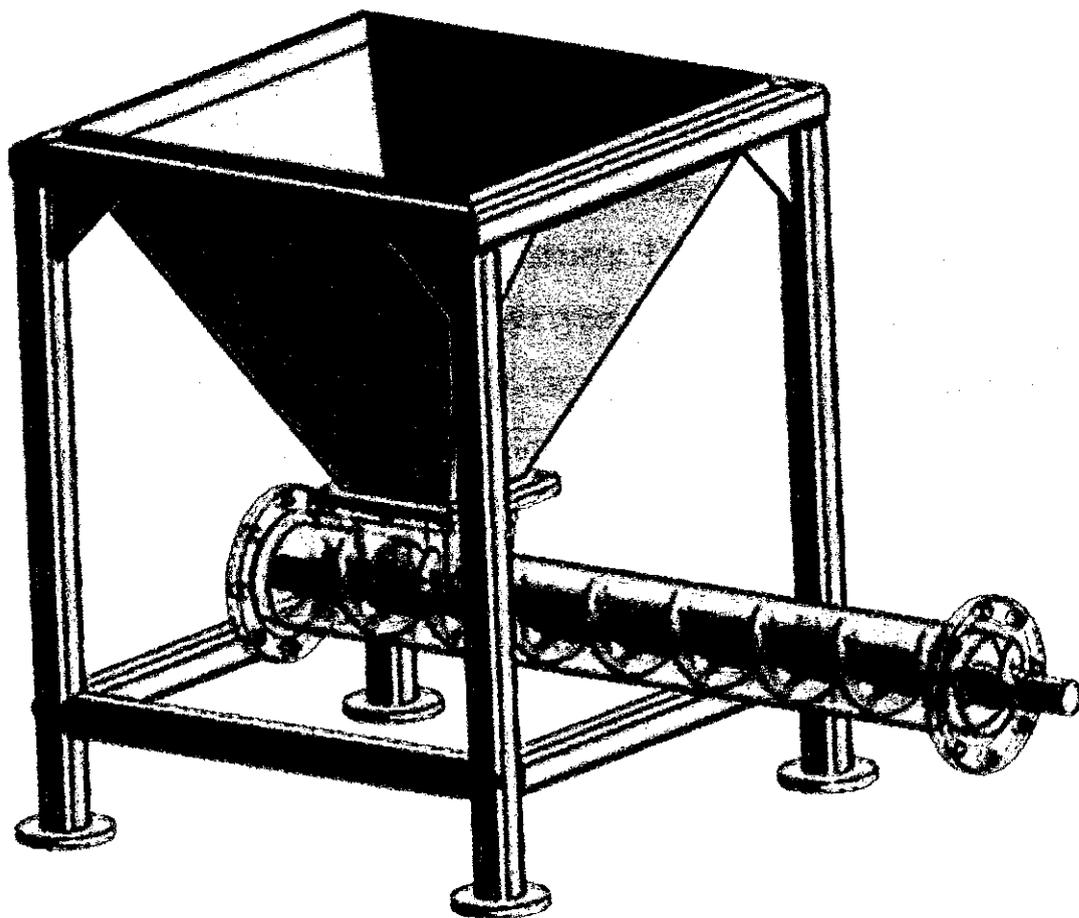


Рисунок 2.19 – Розроблена модель бункера для сипких матеріалів із шнековим дозатором

Висновки

У рамках проведеного дослідження була детально проаналізована методика визначення мінімального діаметра отвору в днищі бункера, через який цемент може витікати без перешкод. Було виявлено, що в науковій літературі не існує узагальненої методики для точного розрахунку цього параметра, і більшість авторів обмежуються загальними міркуваннями без конкретних рекомендацій.

Для уточнення цього питання проведено експериментальне дослідження властивостей цементу як сипучого матеріалу. Виявлено, що основними параметрами, які визначають поведінку сипучих матеріалів, є кути внутрішнього та зовнішнього тертя, а також початкове напруження зрізу. Ці параметри були визначені за допомогою тестера зрізу, що дозволило отримати дані про механічні властивості цементу.

Результати дослідження показали, що явище сводовутворення відіграє ключову роль у процесі витікання цементу. При недостатньому діаметрі отвору утворюється стійка аркова структура, що може блокувати витікання матеріалу. Формула Беверло підтверджує важливість врахування цього явища для забезпечення безперешкодного витікання.

Експериментально визначені параметри, такі як мінімальне нормальне навантаження і мінімальне зрізувальне зусилля, що є необхідними для забезпечення витікання матеріалу, дозволяють точніше прогнозувати і проектувати системи вивантаження цементу. Проведене дослідження на тестері зрізу дало можливість встановити механічні характеристики різних сипучих матеріалів, що дозволяє адаптувати технології обробки і зберігання в залежності від їхніх властивостей.

					ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ		
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат			
Розроб.		Костенко			Лім.	Лист	Листів
Перев.		Орисенко			Н		
Керівн.					Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
Н. контр.		Васильєв		22.08			
Затв.		Орисенко					

Висновки

Виявлено, що масова витрата цементу від частоти обертання шнеку на малих обертах при різних діаметрах випускових отворів майже не змінюється. При цьому починаючи з значення частоти 600 об/хв, значення масової витрати цементу збільшується суттєво. Якщо порівняти залежності масової витрати цементу при різних значення насипної густини цементу, то ці значення теж відрізняються не суттєво. Це говорить про те, що найбільш вплив на процес переміщення цементу буде мати частота обертання шнеку.

Отримані результати можуть бути використані для подальших розробок у галузі проектування бункерів та систем вивантаження сипучих матеріалів, що забезпечить підвищення ефективності і надійності таких систем у промисловій практиці.

					ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		40

Список літератури

1. Григоров О. В., Петренко Н. О. Вантажопідйомні машини: Навч. посібник. Харків: НТУ «ХП», 2005. 304 с.
2. Фізичні властивості вуглецевих сипучих матеріалів [Електронний ресурс] : моногр. / Т. В. Чирка, Г. М. Васильченко, Е. Н. Панов та ін. – К.: НТУУ «КП», 2016. – 152 с.: іл. – Бібліогр.: с. 141–149.
3. Політучий О.І. Буріння нафтових і газових свердловин : навч. посіб. / О.І. Політучий. – Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2021. – 170 с.
4. Банніков Д.О. Проектування сталевих бункерних ємностей за панельною конструктив-ною схемою / Д. О. Банніков // Металеві конструкції. –2011. – Т. 17, № 2. –С. 107-104.
5. Мобіло Л.В. Будівельна техніка: Електронний навчальний посібник – Рівне: НУВГП, 2013.– 185 с.
6. Шаповал С. В. Будівельна техніка та виробнича база будівництва: конспект лекцій для студентів усіх форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія / С. В. Шаповал, О. М. Болотських ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2020. – 140 с.
7. Будівельна техніка: підручник. – 2-ге вид., перероб. і доп. / О.Г. Онищенко, В.О. Онищенко, С.Л. Литвиненко, Б.О. Коробко / За ред. В.О. Онищенка та С.Л. Литвиненка. - К. : Кондор-Видавництво, 2017. – 424 с.
8. Білецький В.С. Моделювання у нафтогазовій інженерії: навчальний посібник. / В.С. Білецький – Львів: Видавництво "Новий Світ – 2000", – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 306 с.
9. Білецький В. С., Орловський В. М., Вітрик В. Г. Основи нафтогазової інженерії : підруч. для студ. спец. 185 «Нафтогазова інженерія та

ГМтаМ 601ММв.008-00.00.000 ПЗ				
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат
Розроб.	Костенко			
Перев.	Орисенко			
Керівн.				
Н. контр.	Васильєв			22.08
Затв.	Орисенко			
Список літератури				
			Лім.	Лист
			Н	Листів
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»				

- технології» / Білецький В. С., Орловський В. М., Вітрик В. Г.; НТУ «ХП», ХНУМГ ім. О. М. Бекетова. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2018. – 415 с.
10. Технологічні основи формоутворення спеціальних профільних гвинтових деталей / [Б. М. Гевко, О. Л. Ляшук, І. Б. Гевко та ін.]. – Тернопіль: ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008. – 367 с.
11. Цизь І. Є., Дідух В. Ф. Дозування сипких зв'язних матеріалів під час виробництва органо-мінеральних добрив: монографія. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2017. – 184 с.
12. Суберляк О. В., Баштаник П. В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів. Львів : Растр, 2007. 375 с.
13. Рогатинський Р. Оптимізація параметрів гвинтових транспортно-технологічних систем / Р. Рогатинський, І. Гевко, Л. Рогатинська // Вісник ТНТУ. – 2013. – №1 (69). – С. 123–230.
14. Cleary, P. W., (2010). “DEM prediction of industrial and geophysical particle flows”, *Particuology*, 8 (2), pp. 106–118.
15. Bharadwaj, R., “Using DEM to solve bulk material handling problems”, *Chemical Engineering Progress*, September 2012.

Додатки

Презентаційні матеріали за темою:

**Дослідження та оптимізація конструкції бункера
для сипких матеріалів**

**Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки**

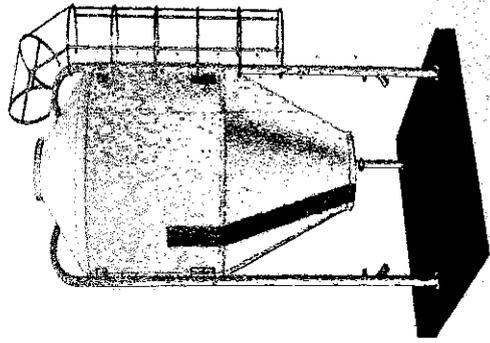
Кваліфікаційна робота магістра

на тему:

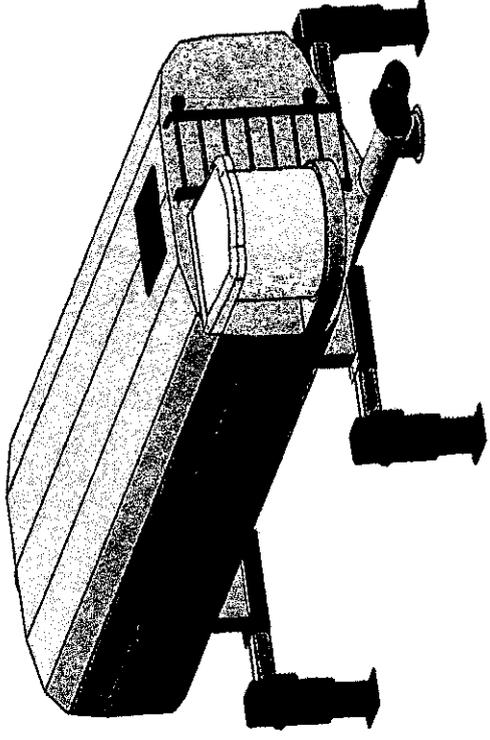
**Дослідження та оптимізація конструкції бункера
для сипких матеріалів**

**Виконав: студент VI курсу, групи 601ММВ
133 Галузеве машинобудування
Костенко Євгеній Олександрович
Керівник к.т.н. доцент Орісенко О.В.**

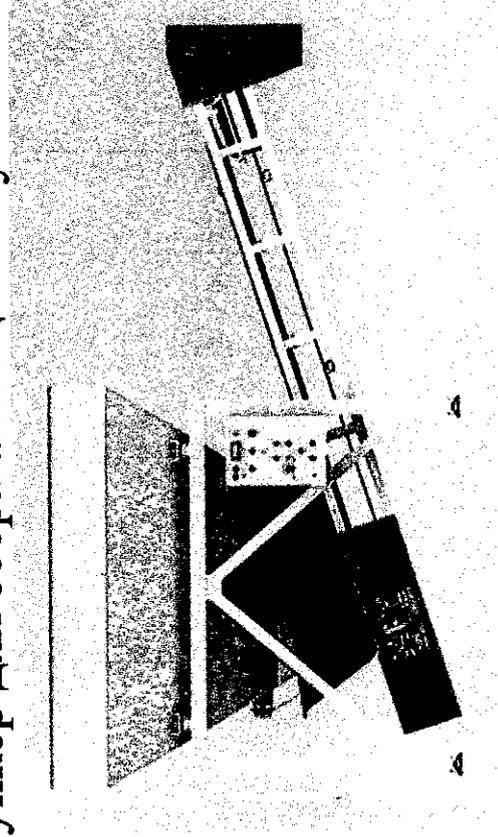
Полтава 2024



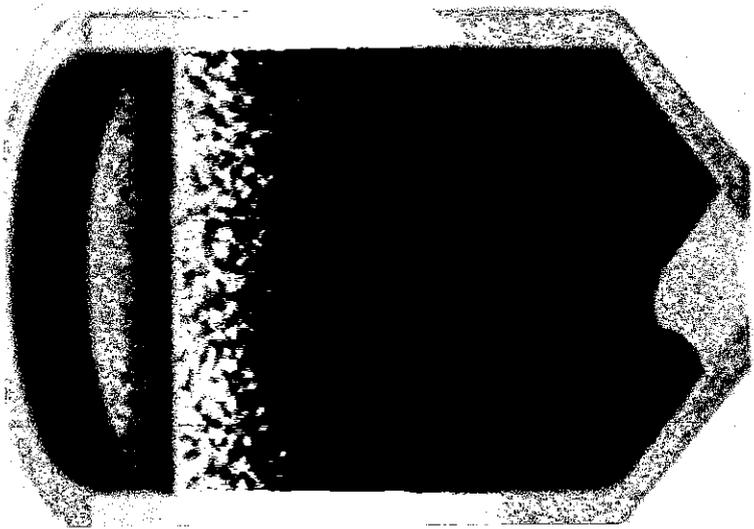
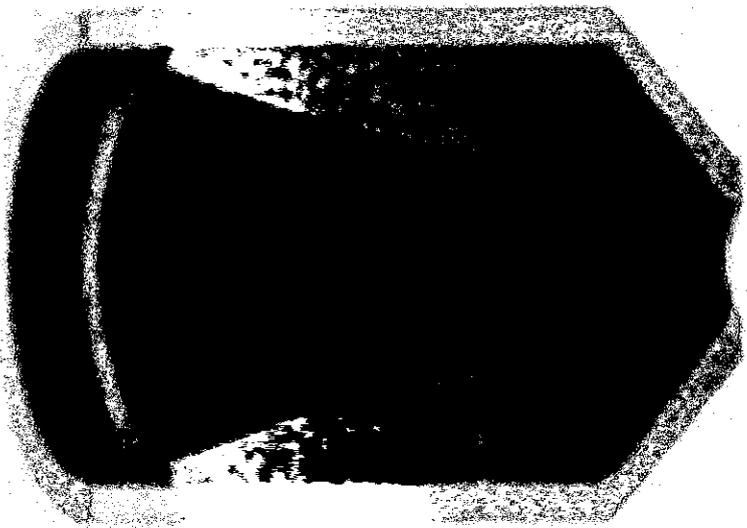
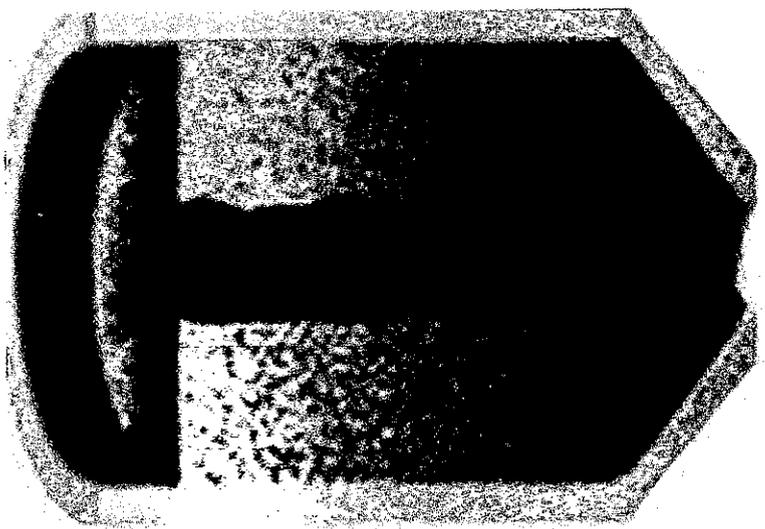
Бункер для зберігання цементу



Бункер для транспортування цементу



Бункер для дозування цементу



Утворення склепінь, зависань та воронок

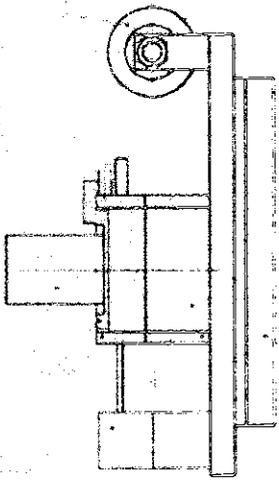
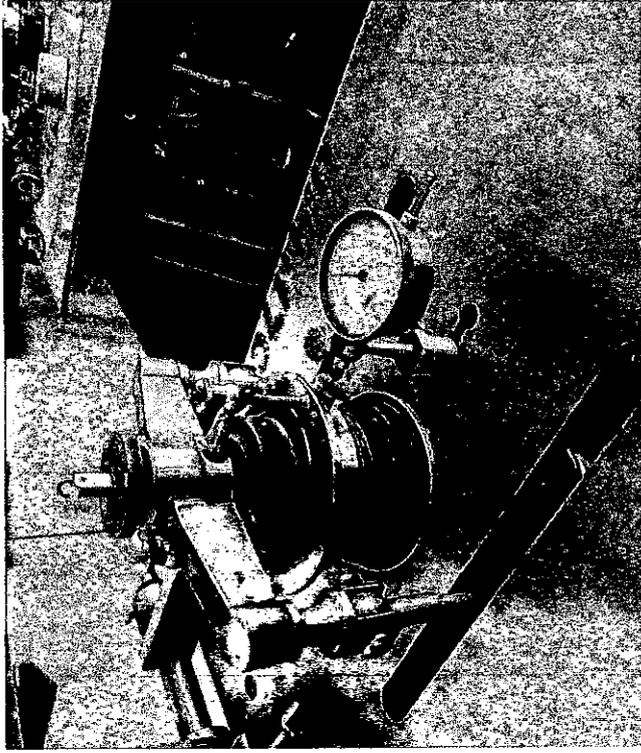
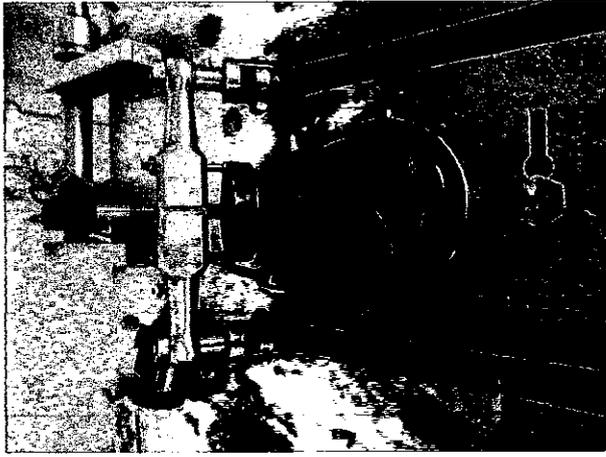
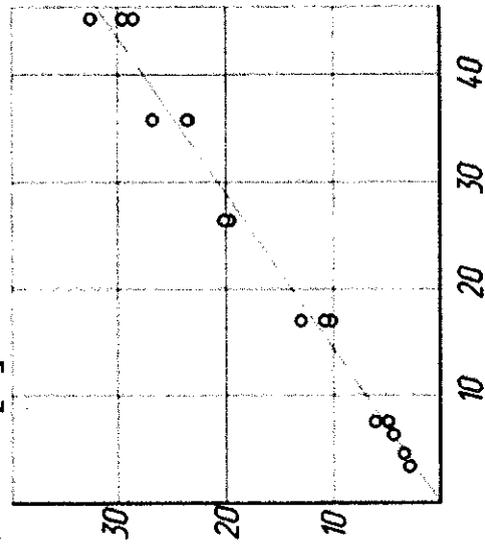


Схема приладу для досліджень [5]



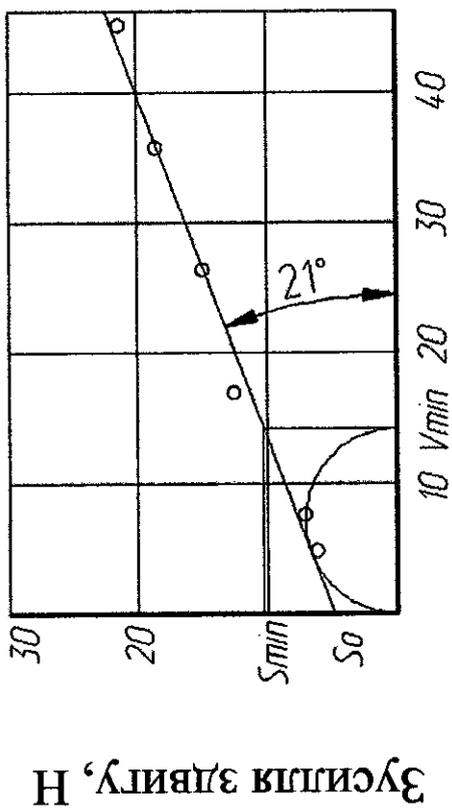
Прилад ля проведення досліджень



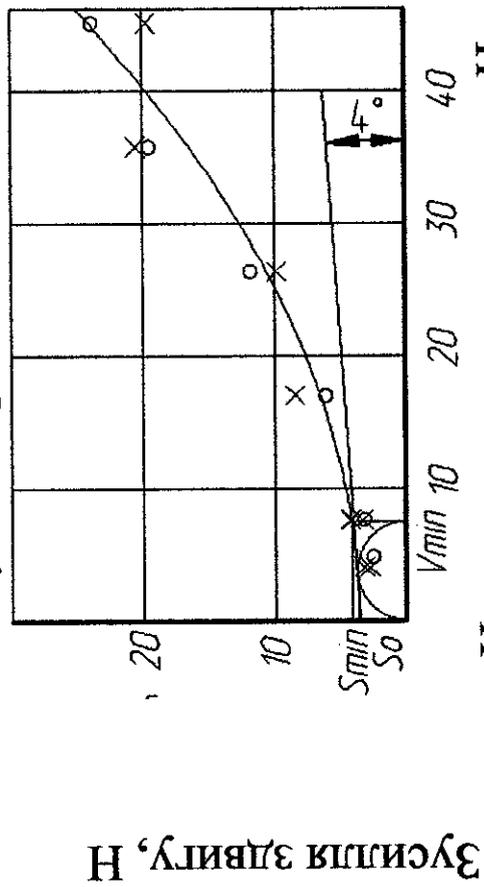
Зусилля здвигу, Н

Нормальне навантаження, Н

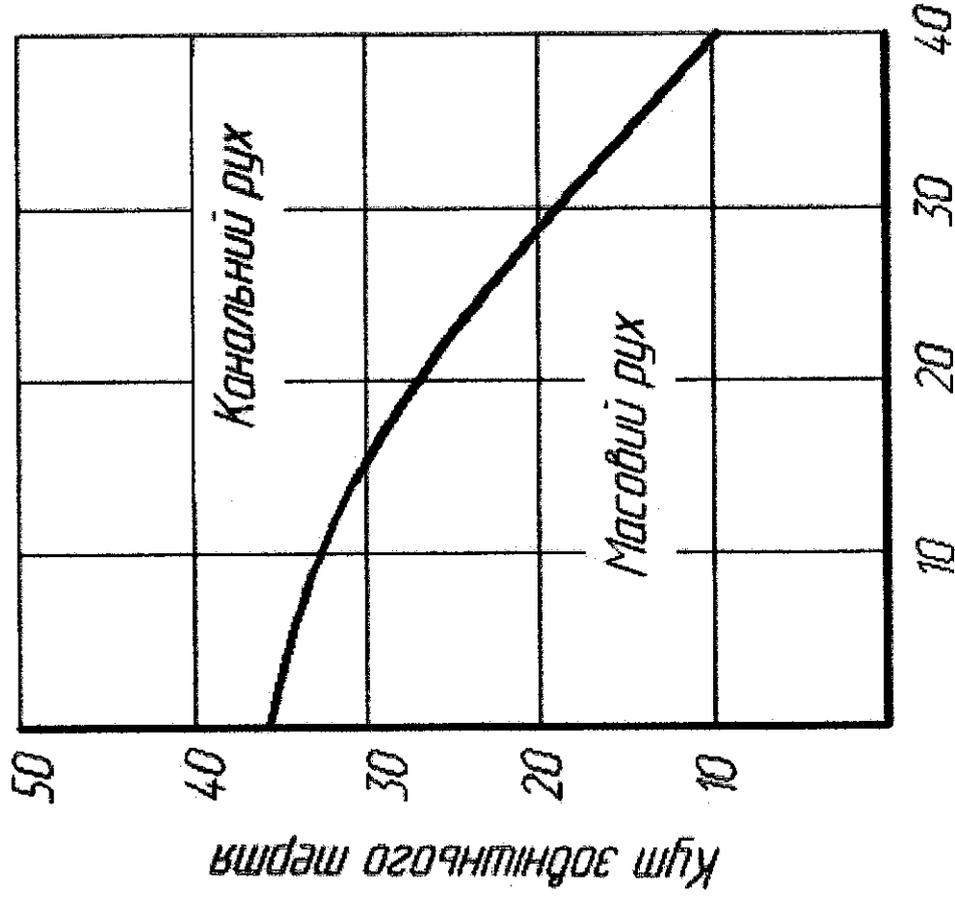
Графік залежностей здвигу від нормальної навантаження (пісок)



Нормальне навантаження, Н
Графік залежностей здвигу від нормальної навантаження (цемент)

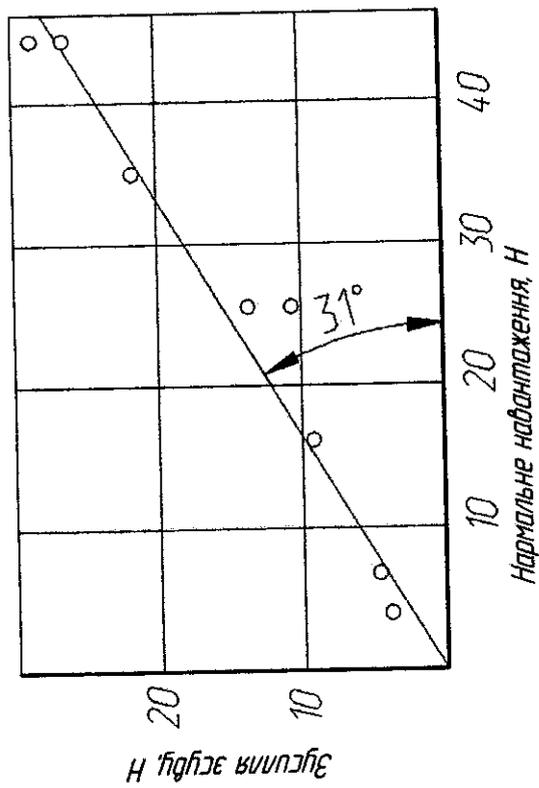


Нормальне навантаження, Н
Графік залежностей здвигу від нормальної навантаження (для цементу який попередньо був навантажений тиском 20кПа.)

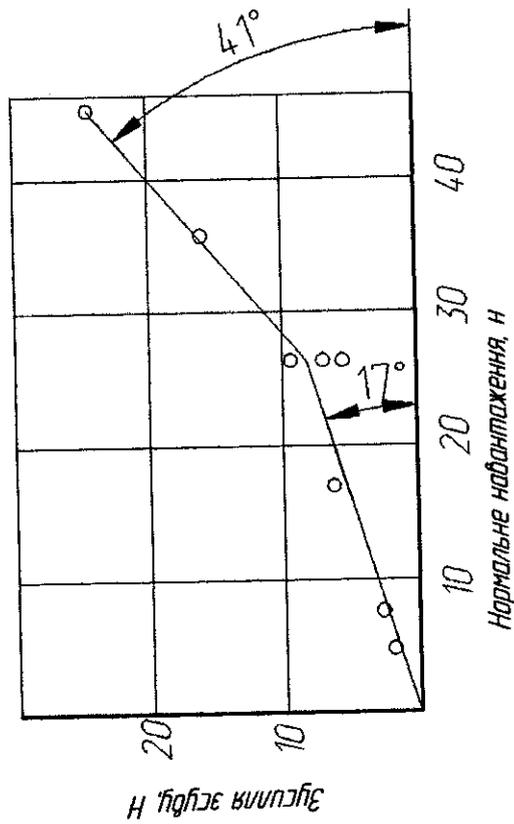


Кут нахилу стінки до вертикалі

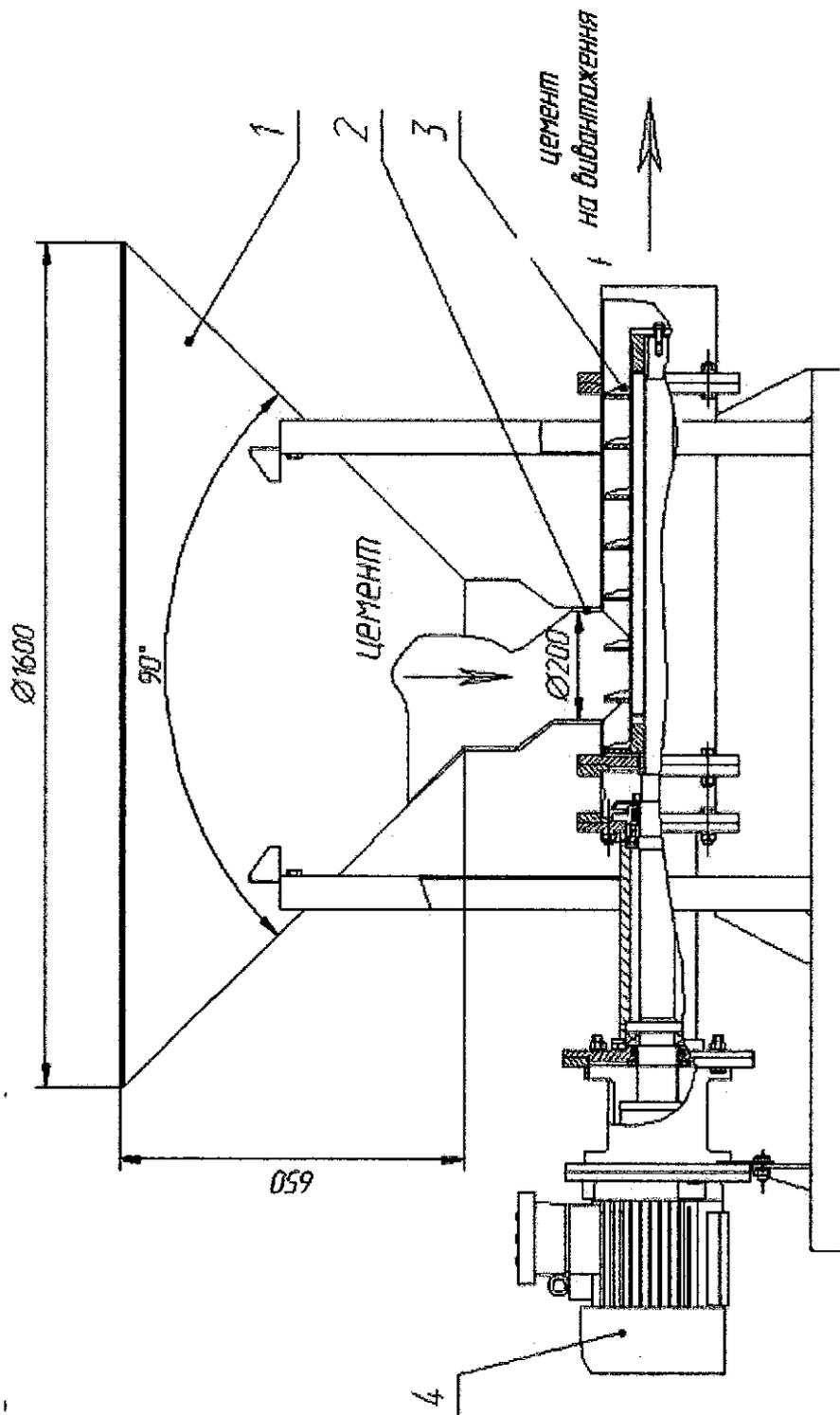
Графік визначення виду закінчення



Вимірювання кута зовнішнього тертя ущільненого цементу по шліфованій сталі

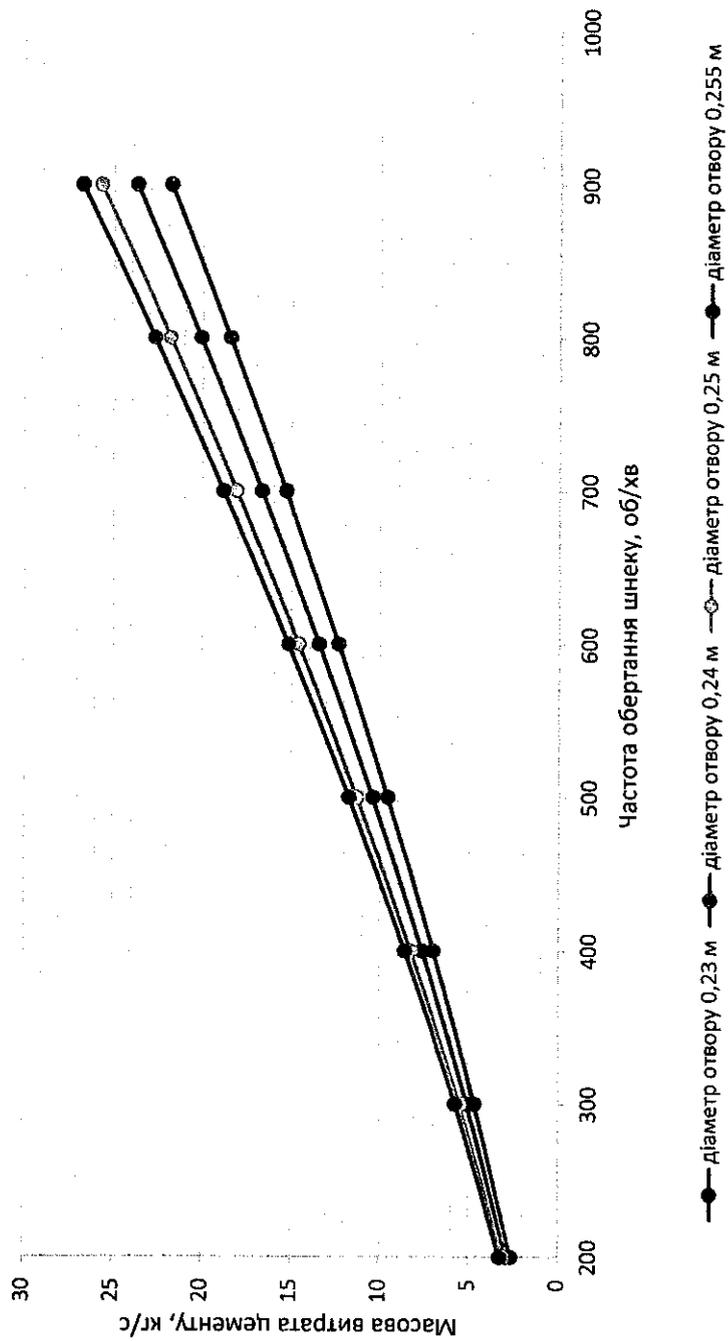


Вимірювання кута зовнішнього тертя для пари цемент – фторопласт



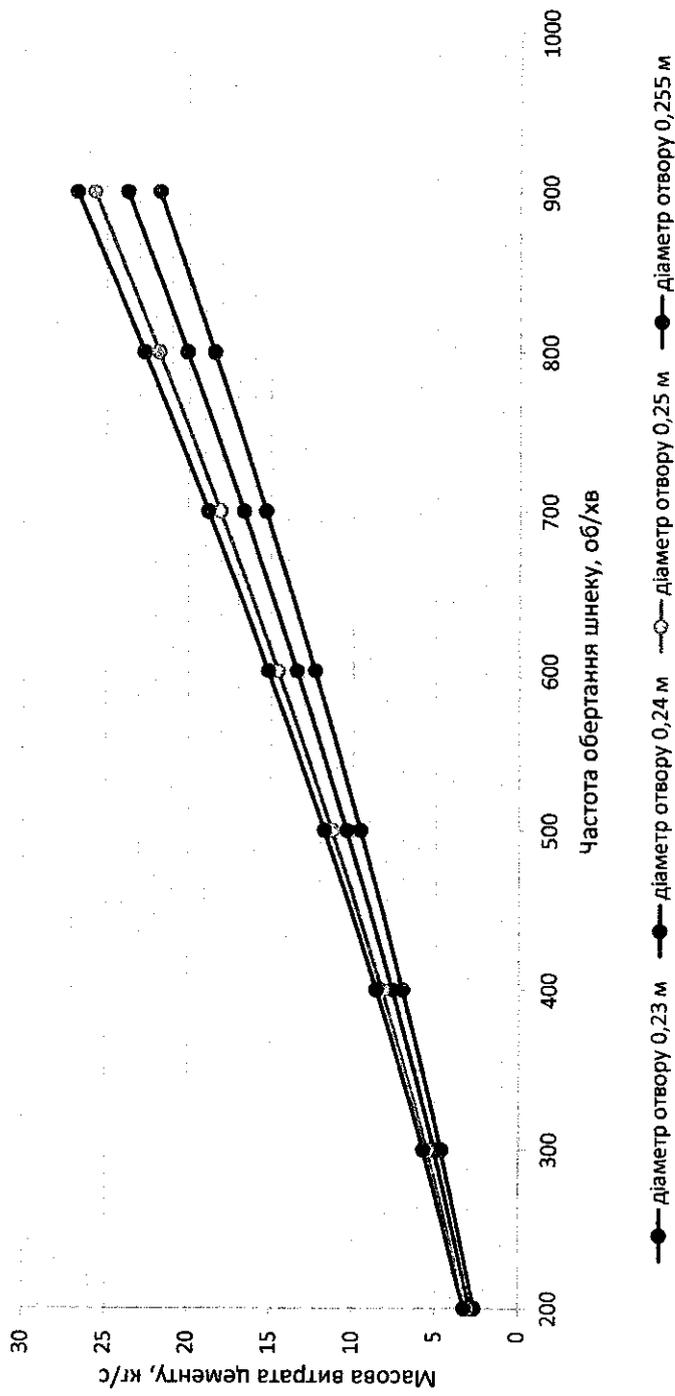
1 – лійка; 2 - випускний отвір; 3 – корпус горизонтального шнека; 4 – електродвигун
Обладнання для переміщення цементу

насіпна густина цементу 1250 кг/м³



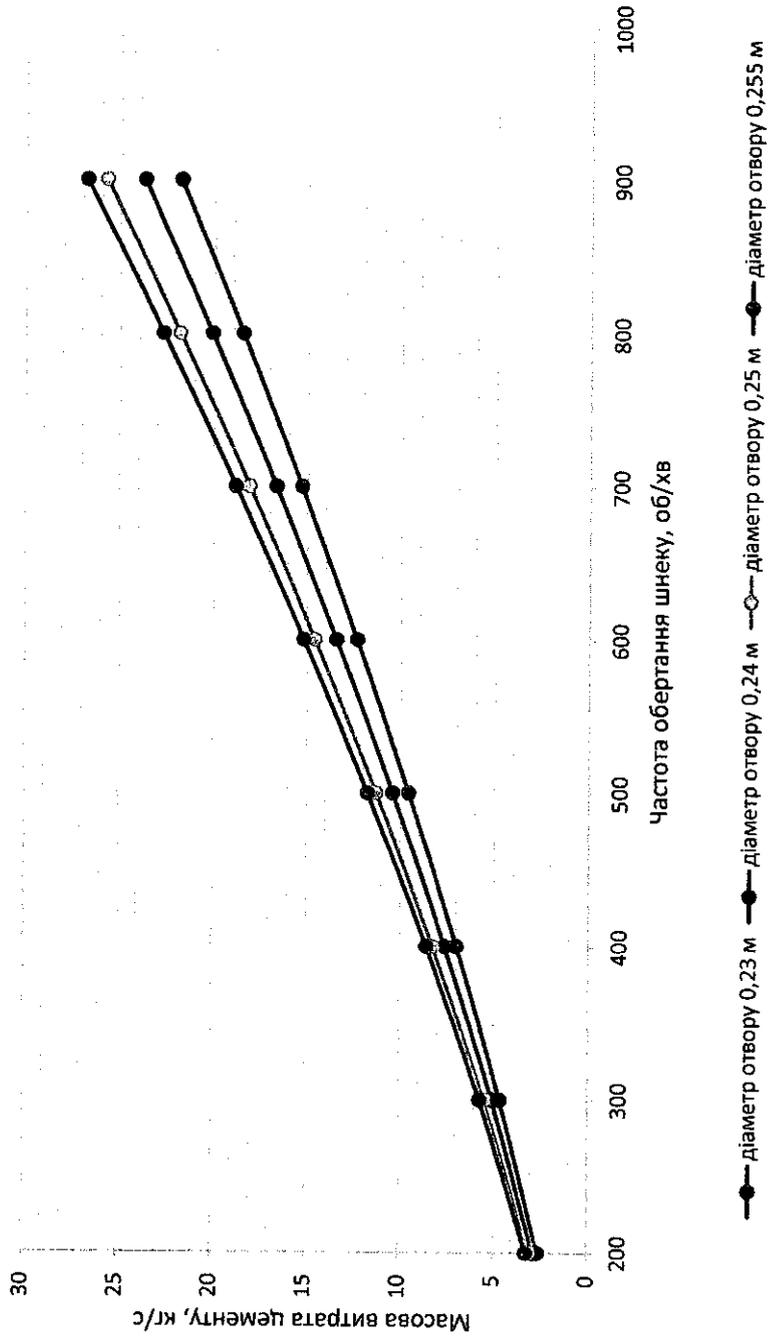
Розрахункові криві залежності витрати цементу від частоти обертання шнека
(при густині 1250 кг/м³)

насіпна густина цементу 1200 кг/м³

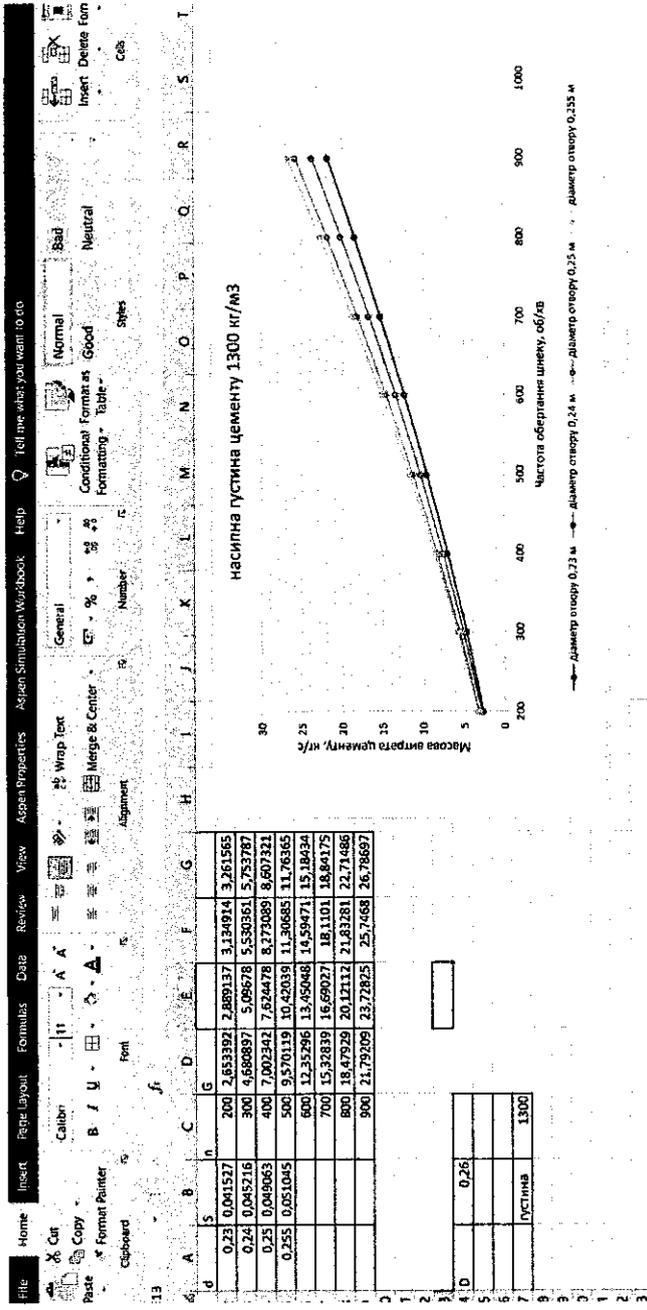


Розрахункові криві залежності витрати цементу від частоти обертання шнека
(при густині 1200 кг/м³)

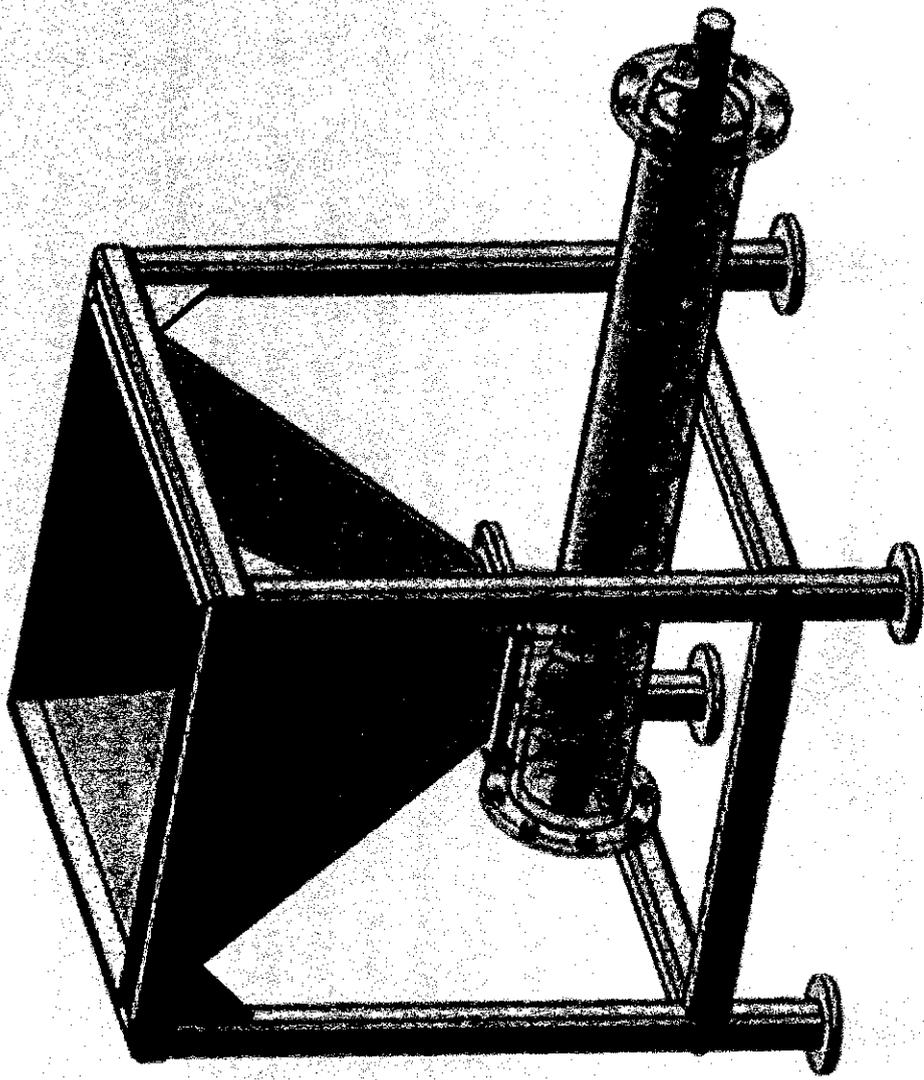
насіпна густина цементу 1300 кг/м³



Розрахункові криві залежності витрати цементу від частоти обертання шнека
(при густині 1300 кг/м³)



Розрахункові криві залежності витрати цементу від частоти обертання шнека (етапи розрахунку)



Розроблена модель бункера для сипких матеріалів із шнековим дозатором

Висновки

У рамках проведеного дослідження була детально проаналізована методика визначення мінімального діаметра отвору в днищі бункера, через який цемент може витікати без перешкод. Було виявлено, що в науковій літературі не існує узагальненої методики для точного розрахунку цього параметра, і більшість авторів обмежуються загальними міркуваннями без конкретних рекомендацій.

Для уточнення цього питання проведено експериментальне дослідження властивостей цементу як сипучого матеріалу. Виявлено, що основними параметрами, які визначають поведінку сипучих матеріалів, є кути внутрішнього та зовнішнього тертя, а також початкове напруження зрізу. Ці параметри були визначені за допомогою тестера зрізу, що дозволило отримати дані про механічні властивості цементу.

Результати дослідження показали, що явище сводовутворення відіграє ключову роль у процесі витікання цементу. При недостатньому діаметрі отвору утворюється стійка аркова структура, що може блокувати витікання матеріалу. Формула Беверло підтверджує важливість врахування цього явища для забезпечення безперешкодного витікання.

Експериментально визначені параметри, такі як мінімальне нормальне навантаження і мінімальне зрізувальне зусилля, що є необхідними для забезпечення витікання матеріалу, дозволяють точніше прогнозувати і проектувати системи вивантаження цементу. Проведене дослідження на тестері зрізу дало можливість встановити механічні характеристики різних сипучих матеріалів, що дозволяє адаптувати технології обробки і зберігання в залежності від їхніх властивостей.

Виявлено, що масова витрата цементу від частоти обертання шнеку на малих обертах при різних діаметрах випускових отворів майже не змінюється. При цьому починаючи з значення частоти 600 об/хв, значення масової витрати цементу збільшується суттєво. Якщо порівняти залежності масової витрати цементу при різних значеннях насипної густини цементу, то ці значення теж відрізняються не суттєво. Це говорить про те, що найбільш вплив на процес переміщення цементу буде мати частота обертання шнеку.