

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
(повне найменування вищого навчального закладу)
Навчально-науковий інститут 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 впливу пульсацій
повітряного потоку в трубопроводах
пневмосистем при транспортуванні
цементу**

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

133 Галузеве машинобудування

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Мормуль Дмитро Сергійович

(прізвище та ініціали)

Керівник к.т.н. доцент. Васильєв А.В.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Аніщенко А.І.

(прізвище та ініціали)

Полтава – 2026 рік

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


**Дослідження впливу пульсацій повітряного потоку в
трубопроводах пневмосистем при транспортуванні цементу**

Кваліфікаційна робота магістра

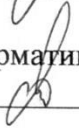
Лист затвердження

ГМтаМ 601мММ.011-00.00.000 КР


Технологічний контроль к.т.н., доц.

 О.С. Васильєв
„12” 01 2026р.


Нормативний контроль к.т.н., доц.

 О.С. Васильєв
„12” 01 2026р.

Розробив студент групи 601-мММ

 Д.С. Мормуль
„12” 01 2026р.

Керівник к.т.н., доц.


 А.В. Васильєв
„12” 01 2026р.

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ


Завідувач кафедри

галузевого машинобудування та мехатроніки

к.т.н., доц.

 О.В. Орисенко

Гарант ОП

 М.М. Нестеренко

Полтава – 2026 рік

№ рядок	Форм.	Позначення	Найменування	Кіл.	Прим.
1					
2			Документація загальна		
3					
4			Вперше розроблена		
5					
6	A4	ГМтаМ 601мММ.011-00.00.000ТЗ	Технічне завдання	1	
7	A4	ГМтаМ 601мММ.011-00.00.000А	Анотація	2	
8	A4	ГМтаМ 601мММ.011-00.00.000ПЗ	Пояснювальна записка	64	
9					
10			Документація наукова		
11					
12			Вперше розроблена		
13					
14	A4	ГМтаМ 601мММ.011-00.00.000ПМ	Дослідження впливу пульсацій		
15			повітряного потоку в трубопроводах		
16			пневмосистем при транспортуванні	10	
17			цементу		
18			Презентаційні матеріали		
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					

					ГМтаМ 601мММ.011--00.00.000ВМ		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Літ.	Лист	Листів
Розроб.		Мормуль		12.01	Н	1	1
Перев.		Васильєв		12.01			
Н.контр.		Васильєв		12.01			
Затв.		Орисенко		15.01			
					Дослідження впливу пульсацій повітряного потоку в трубопроводах пневмосистем при транспортуванні цементу Відомість кваліфікаційної роботи магістра		
					Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		

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 Магістр

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування (шифр і назва)

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач
кафедри галузевого
машинобудування та
мехатроніки
О.В. Орисенко
"03" 09 2026 р.

ЗАВДАННЯ
до кваліфікаційної роботи магістра

Мормуля Дмитра Сергійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи


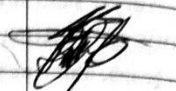
**«Дослідження впливу пульсацій повітряного потоку в трубопроводах
пневмосистем при транспортуванні цементу»**

керівник к.т.н., доц. Васильєв А.В.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 03 09 2025 р. № 10-1598

1. Строк подання студентом роботи 12. 01. 2026
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: Вібраційні конвеєри, особливості будови та експлуатації
Розділ 2: Теоретичні основи газової динаміки та нестационарного руху повітря в
трубопроводах. Розділ 3 Експериментальні дослідження резонансної інтенсифікації
процесу пневматичного транспортування цементу. Розділ 4 Впровадження,
експлуатація та оцінка ефективності модернізованої системи пневматичного
транспортування цементу
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Дослідження впливу пульсацій повітряного потоку в трубопроводах пневмосистем при
транспортуванні цементу (10 листів А4)

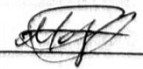
6. Консультанти розділів роботи

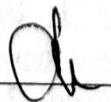
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1			
2	Нестеренко М.М.		
3	Білашченко Т.О.		


7. Дата видачі завдання_

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз літературних джерел, розрахунки	15.10.2025	+
2	Аналітичні дослідження робочого процесу обладнання	15.11.2025	+
3	Компонування пояснювальної записки	15.12.2025	+
4	Здача готової роботи	28.12.2025	+

Студент  Мормуль Д.О.

Керівник роботи  Васильев А.

Гарант  Нестеренко М.М.

Анотація

Кваліфікаційна робота магістра на тему: «Дослідження впливу пульсацій повітряного потоку в трубопроводах пневмосистем при транспортуванні цементу»

Кваліфікаційна робота магістра на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування – Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, 2026

Робота складається з чотирьох розділів.






Мета роботи – дослідити вплив пульсаційної подачі повітря на ефективність пневматичного транспортування цементу та обґрунтувати раціональні режими роботи пневмотранспортних систем з урахуванням резонансних явищ.

У першому розділі розглянуто сучасний стан пневматичних систем транспортування цементу, наведено їх класифікацію, конструктивні схеми та особливості формування повітряно-матеріальних потоків у трубопроводах. У другому розділі подано теоретичні основи газової динаміки, проаналізовано втрати тиску при русі стисливого повітря та обґрунтовано можливість виникнення нестационарних і резонансних явищ у пневматичних системах.

Третій розділ присвячено експериментальним дослідженням процесу пневматичного транспортування.

У четвертому розділі розглянуто питання монтажу, експлуатації та обслуговування модернізованої системи пневматичного транспортування цементу, а також вимоги з охорони праці та промислової безпеки з урахуванням впливу цементного пилу, тиску та шуму. Виконано техніко-економічне обґрунтування модернізації, яке підтвердило доцільність та ефективність її впровадження у промислових умовах.

Ключові слова: пневматичне транспортування, цемент, пульсації повітряного потоку, трубопровід, резонансні режими, енергоефективність.

				ГМтаМ 601мММ.011-00.00.000 А			
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат	Літ.	Лист	Листів
Розроб.		Мормуль		12.01	Н		
Перев.		Васильєв		12.01			
Керівн.							
Н. контр.		Васильєв		12.01			
Затв.		Орисенко		19.01			
Анотація					Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		

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 впливу пульсацій повітряного потоку в
трубопроводах пневмосистем при транспортуванні цементу**

Пояснювальна записка

Кваліфікаційної роботи магістра

ГМтаМ 601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Полтава – 2026рік

Зміст

Вступ.....	4
Розділ 1. Сучасний стан та особливості пневматичного транспортування цементу	7
1.1.Класифікація та конструктивні схеми пневматичних систем транспортування цементу	7
1.2. ...Характеристика повітряно-матеріальних потоків у трубопроводах пневматичних систем	16
1.3. Фізико-механічні властивості цементу як об'єкта пневматичного транспортування	18
1.4 Апаратурно-технологічні схеми силосних складів із системами пневматичного транспортування цементу	20
Висновки до розділу 1.	24
Розділ 2: Теоретичні основи газової динаміки та нестационарного руху повітря в трубопроводах	25
2.1. Фізичні властивості повітря та основні рівняння газової динаміки	25
2.2. Втрати тиску при русі повітря в трубопроводах пневматичних систем	27
2.3. Нестационарний рух повітря в трубопроводах та умови виникнення пульсацій	30
2.4 Розрахунок лінії пневматичного транспортування цементу	33
Висновки до розділу 2.	37

м.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат
озроб.	Мормуль		<i>[Signature]</i>	12.01
перев.	Васильєв		<i>[Signature]</i>	
перічник			<i>[Signature]</i>	

ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Зміст

Лім.	Лист	Листів
Н	2	
Національний університет «Полтавська політехніка»		

Розділ 3 Експериментальні дослідження резонансної інтенсифікації процесу пневматичного транспортування цементу	39
3.1 Дослідження пульсаційної подачі повітря при транспортуванні цементу	39
3.2 Опис експериментальної установки та методика дослідження резонансних режимів	42
Висновки до розділу 3.	50
Розділ 4 Впровадження, експлуатація та оцінка ефективності модернізованої системи пневматичного транспортування цементу	51
4.1 Монтаж модернізованого обладнання	51
4.2. Експлуатація та обслуговування модернізованої системи	53
4.3. Охорона праці і промислова безпека	55
4.3.1 Запиленість повітря та заходи захисту	56
4.3.2 Небезпека, пов'язана з роботою під тиском	57
4.3.3 Шум і вібрація	58
Висновки до розділу 4.	59
ВИСНОВКИ.....	60
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	62

Додатки Презентаційні матеріали за темою «Дослідження впливу пульсацій повітряного потоку в трубопроводах пневмосистем при транспортуванні цементу»

					БМіО.601МММ.011-00.00.000 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підп.</i>	<i>Дата</i>		3

Вступ

Сучасні технології виробництва будівельних матеріалів характеризуються значними обсягами переміщення сипучих дисперсних матеріалів, серед яких цемент посідає одне з ключових місць. Пневматичні системи транспортування цементу широко застосовуються на цементних заводах, бетонних вузлах, у складських і перевантажувальних комплексах завдяки їх герметичності, гнучкості трасування та можливості транспортування матеріалу на значні відстані. Водночас експлуатація пневмосистем супроводжується низкою проблем, пов'язаних зі зростанням енергетичних витрат, нерівномірністю руху матеріалу, інтенсифікацією зносу трубопроводів і нестабільністю режимів транспортування.

Однією з недостатньо досліджених причин нестабільної роботи пневмотранспортних систем є пульсації повітряного потоку, що виникають у трубопроводах унаслідок роботи компресорного обладнання, нестационарних режимів подачі матеріалу, зміни геометрії тракту та взаємодії двофазного потоку «повітря – цемент». Пульсаційні явища призводять до коливань швидкості та тиску, локального осідання частинок, формування згустків матеріалу та періодичних закупорювань трубопроводів, що істотно знижує надійність і ефективність транспортування.

Незважаючи на значну кількість наукових праць, присвячених газодинаміці двофазних потоків і пневматичному транспортуванню сипучих матеріалів, більшість існуючих моделей ґрунтується на припущенні квазістационарного або усталеного руху потоку.

				ГМіМ.601МММ.007-00.00.000 ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат	Вступ		
Розроб.	Мормуль	<i>[підпис]</i>	12.01				
Перев.	Васильєв	<i>[підпис]</i>	12.01				
Керівник							
Н. контр.	Васильєв	<i>[підпис]</i>	12.01				
Затв.	Орисенко	<i>[підпис]</i>	13.01				
					Літ.	Лист	Листів
					Н	4	
					Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		

– сформулювати практичні рекомендації щодо оптимізації режимів роботи пневматичних систем транспортування цементу.

Об'єктом дослідження є процес пневматичного транспортування цементу в трубопроводах.

Предметом дослідження є пульсаційні процеси повітряного потоку та їх вплив на динаміку руху цементу в пневмосистемах.

Методи дослідження включають аналіз і узагальнення науково-технічної літератури, теоретичне моделювання процесів руху двофазних потоків, експериментальні дослідження на лабораторній або напівпромисловій установці, а також методи математичної обробки й аналізу експериментальних даних.

Структурно магістерська робота складається зі вступу, трьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. У першому розділі наведено огляд існуючих пневматичних систем транспортування цементу та аналіз проблем, пов'язаних із пульсаціями повітряного потоку. Другий розділ присвячений теоретичному дослідженню динаміки руху двофазного потоку в трубопроводах з урахуванням пульсаційних режимів. У третьому розділі подано результати експериментальних досліджень та їх порівняльний аналіз з теоретичними залежностями.

Розділ 1. Сучасний стан та особливості пневматичного транспортування цементу

1.1. Класифікація та конструктивні схеми пневматичних систем транспортування цементу

Пневматичне транспортування цементу є одним із найбільш поширених способів переміщення дрібнодисперсних сипучих матеріалів у виробництві будівельних матеріалів. Застосування пневмосистем обумовлене можливістю герметичного транспортування, зниженням втрат матеріалу, мінімізацією запилення навколишнього середовища та гнучкістю трасування трубопроводів [1]. Залежно від конструктивного виконання та режиму роботи пневматичні системи транспортування цементу класифікують за рядом ознак.

Найбільш поширеною є класифікація за способом створення рушійної сили повітряного потоку. За цією ознакою розрізняють всмоктувальні (вакуумні), нагнітальні (напірні) та комбіновані пневматичні системи [2]. У всмоктувальних системах розрідження створюється вакуумними насосами або вентиляторами, що дозволяє забирати цемент із декількох точок та транспортувати його до одного приймального вузла. Такі системи відрізняються підвищеною безпекою та зручністю експлуатації, проте мають обмеження за довжиною траси та продуктивністю.

Нагнітальні пневмосистеми працюють за рахунок подачі стисненого повітря компресором, яке транспортує цемент від одного джерела до кількох пунктів розвантаження. Саме цей тип систем є найбільш поширеним у цементній промисловості, оскільки дозволяє забезпечити транспортування матеріалу на значні відстані та висоти. Типова конструктивна схема нагнітальної пневмотранспортної установки включає компресор, живильний пристрій (камерний або шлюзовий), транспортний трубопровід, систему розвантаження та апарати очищення повітря [3-6].

					ГМіМ.601мММ.011-00.00.000 ПЗ		
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат			
Розроб.		Мормуль	<i>[підпис]</i>	12.01	Літ.	Лист	Листів
Перев.		Васильєв	<i>[підпис]</i>	12.01	Н	7	
Керівник			<i>[підпис]</i>		Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
Н. контр.		Васильєв	<i>[підпис]</i>	12.01			
Затв.		Орисенко	<i>[підпис]</i>	12.01			

Узагальнена класифікація машин і установок безперервної дії, зокрема пневматичних транспортних систем, наведена на рисунку 1.1

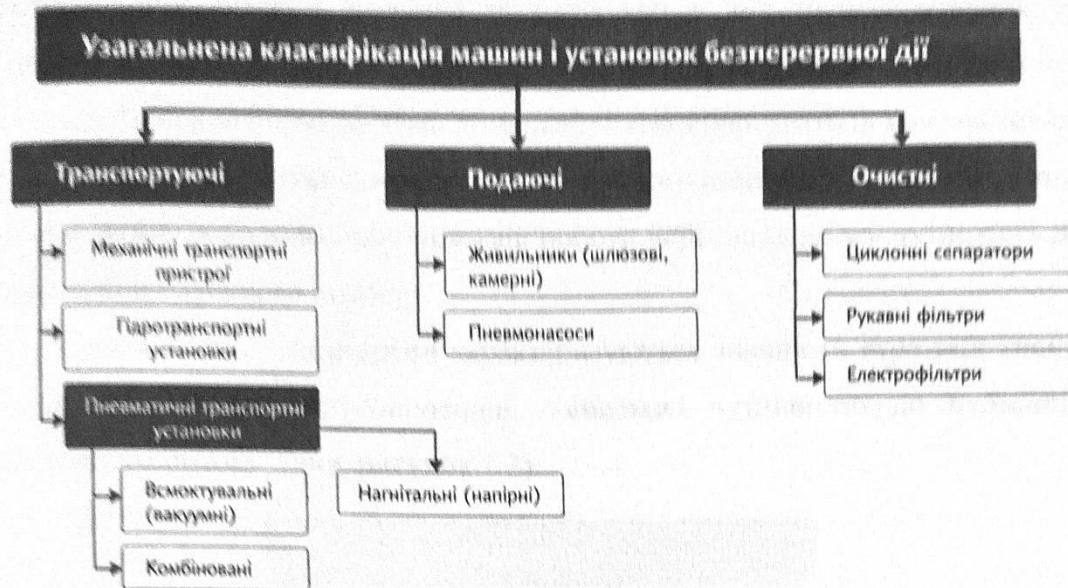


Рисунок 1.1 – Узагальнена класифікація машин і установок безперервної дії

Комбіновані системи поєднують елементи всмоктувального та нагнітального транспорту і застосовуються у складних технологічних схемах, де необхідно одночасно забезпечити забирання цементу з кількох джерел і подачу його до різних споживачів. Такі системи є більш складними з точки зору керування та налаштування режимів, однак забезпечують високу гнучкість виробничого процесу.

За режимом руху матеріалу в трубопроводі пневматичні системи поділяють на системи транспортування у зваженому стані (розріджена фаза) та системи з високою концентрацією матеріалу (щільна фаза). Транспортування цементу у зваженому стані відбувається при відносно високих швидкостях повітряного потоку, що забезпечує повне підхоплення частинок і запобігає їх осіданню.

Залежно від робочого тиску пневматичні системи транспортування цементу поділяють на низьконапірні, середньонапірні та високонапірні. Низьконапірні системи зазвичай застосовуються для транспортування на невеликі відстані та характеризуються відносно простими конструктивними схемами. Високонапірні системи дозволяють транспортувати цемент на значні відстані та висоти, однак потребують складнішого компресорного обладнання і більш ретельного контролю режимів роботи через підвищену чутливість до пульсацій повітряного потоку.

Разом з тим, такі режими характеризуються значними втратами тиску, підвищеним зносом трубопроводів і високою чутливістю до пульсацій повітряного потоку (див. рисунок 1.2).

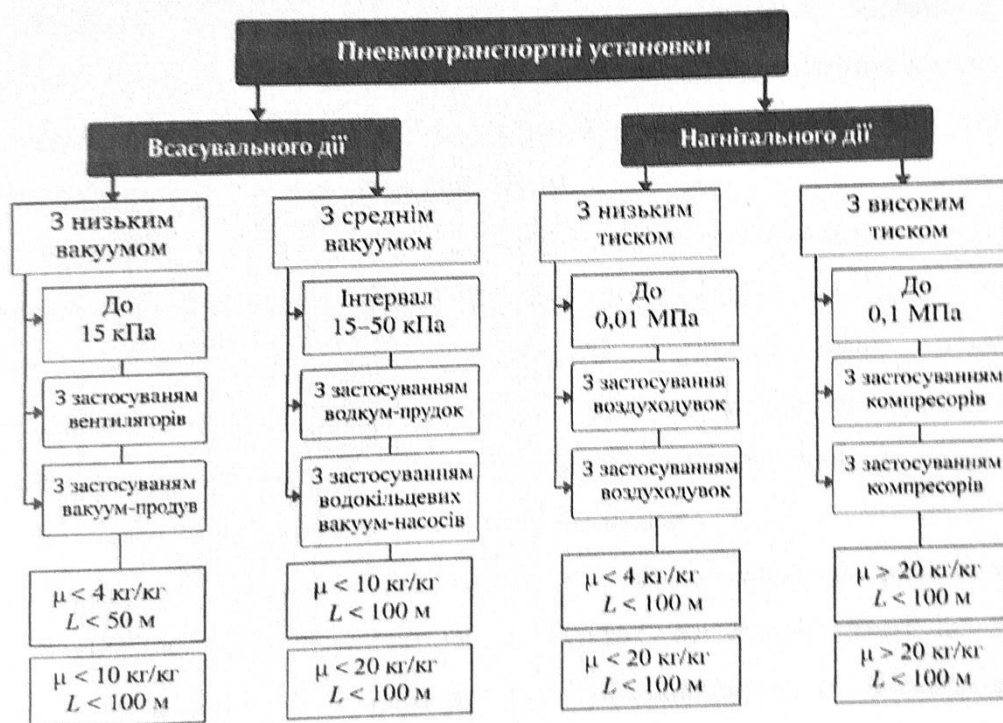


Рисунок 1.2 – Схема класифікації пневмотранспортних установок за статичним тиском

Системи щільнофазного транспортування працюють при менших швидкостях повітря, але з більшою масовою концентрацією цементу. У цьому випадку матеріал переміщується у вигляді поршнів, пробок або шарів, що дозволяє знизити енерговитрати та знос обладнання. Проте стабільність таких систем істотно залежить від рівномірності подачі повітря та відсутності пульсацій, що може призводити до порушення руху матеріалу та закупорювання трубопроводів.

Конструктивно пневматичні системи транспортування цементу складаються з ряду функціональних елементів, кожен з яких істотно впливає на гідродинаміку повітряно-матеріального потоку. До основних елементів належать компресорне обладнання, живильні пристрої, транспортні трубопроводи з колінами та відводами, а також системи відокремлення цементу від повітря. Типові схеми та склад пневмотранспортних установок, що застосовуються для транспортування сипучих матеріалів, зокрема цементу, детально наведені у роботах [1-6].

Особливу роль у формуванні режимів роботи пневмосистем відіграють транспортні трубопроводи. Зміна діаметра труб, наявність колін, трійників і перепадів висот зумовлюють виникнення локальних втрат тиску та нестационарних явищ у потоці. Саме в цих зонах найчастіше спостерігаються пульсації швидкості та тиску повітря, які істотно впливають на характер руху цементу та загальну ефективність транспортування.

Важливим елементом конструктивної схеми пневматичних систем транспортування цементу є живильні пристрої, які забезпечують дозоване введення матеріалу в повітряний потік. У практиці цементної промисловості найбільшого поширення набули камерні живильники періодичної дії, шлюзові живильники безперервної дії, а також пневмонасоси. Камерні живильники дозволяють реалізувати режими транспортування з високою концентрацією цементу та забезпечують зменшення питомих витрат стисненого повітря,

Зм.	Лист	№ доквм.	Підп.	Дата

ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Лист
10

складною взаємодією між елементами обладнання. Кожен із конструктивних вузлів – компресор, живильник, трубопровід, коліна та розвантажувальні апарати – вносить свій вклад у формування гідродинамічних характеристик повітряно-матеріального потоку. Це зумовлює появу нестационарних режимів руху, зокрема пульсацій швидкості та тиску, які необхідно враховувати при аналізі та розрахунку пневматичних систем транспортування цементу.

При роботі повітродувки у режимі всмоктування багато з них здатні створювати розрідження до 50 % від атмосферного тиску. У зв'язку з цим пневматичні транспортні установки, що працюють із такими повітродувками, відносять до систем із середнім вакуумом. Такі системи широко застосовуються для транспортування дрібнодисперсних матеріалів, зокрема цементу, на обмежені відстані та за відносно невеликої продуктивності.

Схему пневматичної транспортної установки всмоктувального типу наведено на рисунку 1.3. Установка включає забірне сопло 1, транспортний трубопровід 2, розвантажувальний пристрій – пилоуловлювач 3, а також вакуумний насос 4.

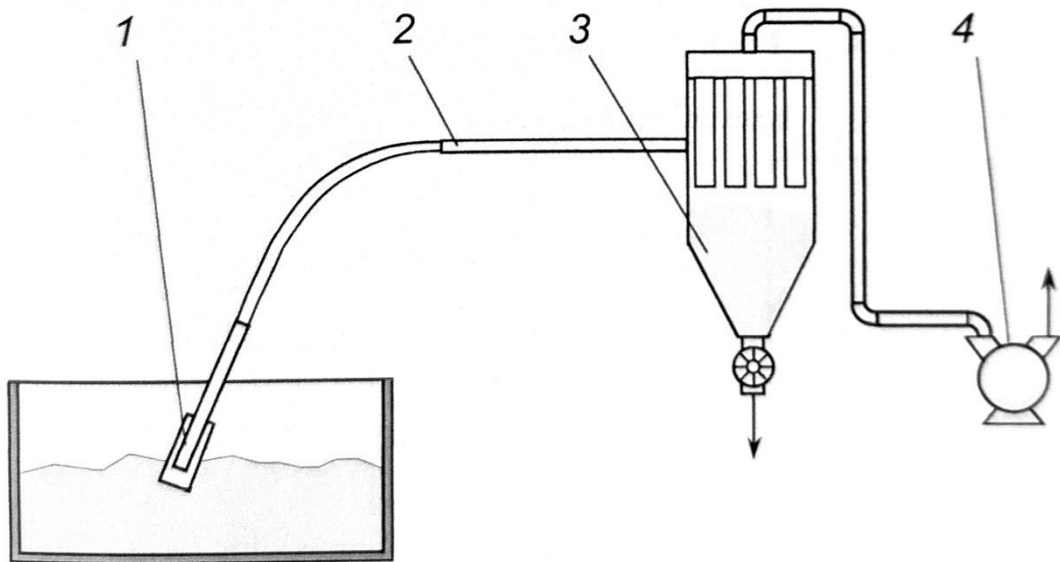


Рисунок 1.3 – Схема пневматичної транспортної установки всмоктувального типу

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Рух повітряно-матеріального потоку в такій системі здійснюється за рахунок створення розрідження у трубопроводі, що забезпечує підсмоктування цементу з відкритих або частково герметизованих ємностей. Основними перевагами всмоктувальних систем є підвищена безпека та можливість забору матеріалу з кількох точок, однак вони мають обмеження за довжиною транспортного тракту та масовою концентрацією матеріалу.

Схему пневматичної транспортної установки нагнітального типу з використанням пневмогвинтового насоса показано на рисунку 1.4. Установка складається з пневмогвинтового насоса 2, вузла підведення стисненого повітря 1, транспортного трубопроводу 3, приймального бункера 4 та рукавного фільтра 5. Відомо, що у робочій камері пневмогвинтових насосів надлишковий тиск стисненого повітря, як правило, не перевищує 1,5 атм. Тому, незважаючи на використання компресорного повітря, такі пневматичні системи доцільно відносити до систем середнього тиску безперервної дії. Вони характеризуються відносно рівномірною подачею цементу та стабільнішими режимами руху повітряно-матеріального потоку порівняно з вакуумними установками.

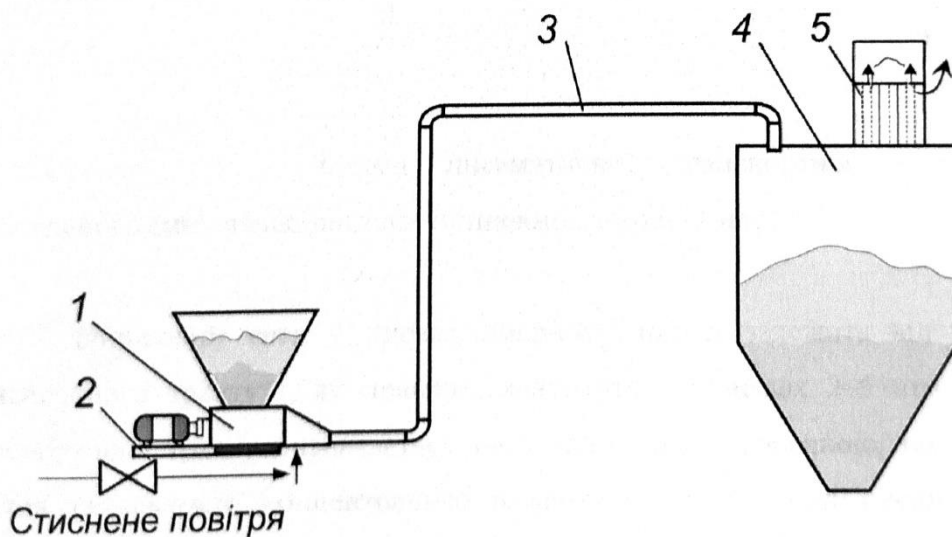


Рисунок 1.4 – Схема пневматичної транспортної установки нагнітального типу з використанням пневмогвинтового насоса

На рисунку 1.5 наведено схему пневматичної транспортної установки нагнітального типу з використанням пневмокамерного насоса. До складу установки входять пневмокамерний насос 2, вузол підведення стисненого повітря 1, транспортний трубопровід 3, приймальний бункер 4 та рукавний фільтр 5. Пневмокамерний насос являє собою посудину високого тиску, у якій накопичується цемент перед його періодичною подачею в транспортний трубопровід.

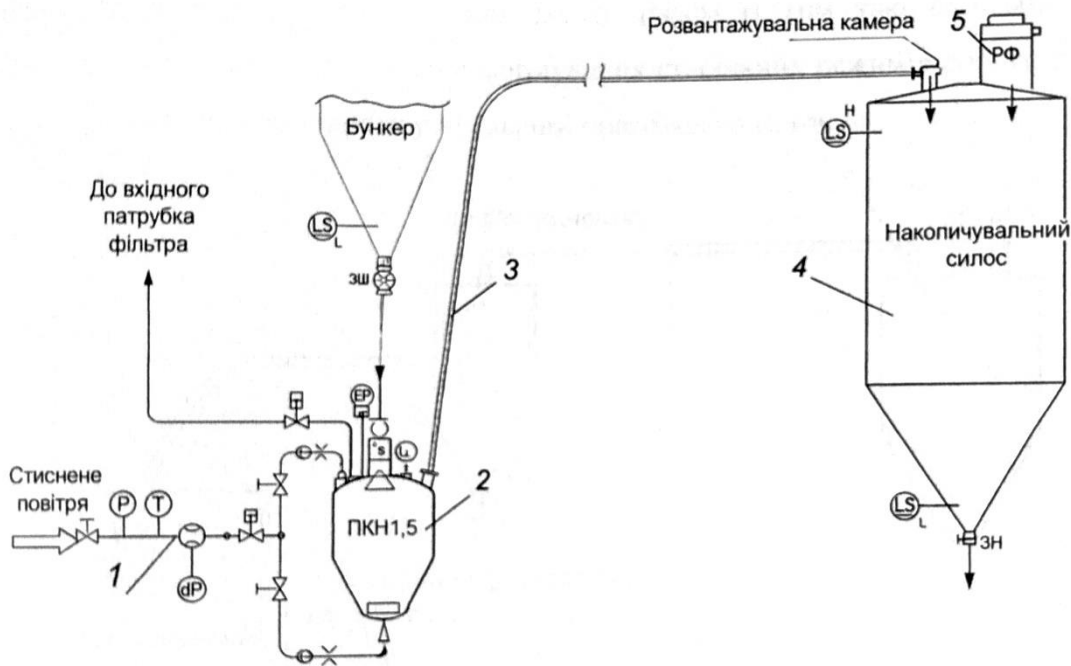


Рисунок 1.5 – Схема пневматичної транспортної установки нагнітального типу з використанням пневмокамерного насоса

Надлишковий тиск у пневмокамерному насосі залежить від опору транспортного тракту і, як правило, знаходиться в межах 2–5 атм. Опір транспортного тракту визначається його геометрією, довжиною, витратою повітря та масовою концентрацією цементу в потоці. Такі пневматичні установки слід відносити до високонапірних систем пневмотранспорту періодичної дії, які дозволяють реалізувати транспортування цементу на

значні відстані та при високих концентраціях матеріалу, але характеризуються вираженою нестационарністю режимів.

Схему пневматичної транспортної установки комбінованого типу наведено на рисунку 1.6. Установка включає забірне сопло 1, транспортний трубопровід 2, розвантажувальний пристрій 3, струминний насос 4, приймальний бункер 5 та рукавний фільтр 6. Комбіновані системи поєднують елементи всмоктувального та нагнітального транспорту і дозволяють підвищити гнучкість технологічної схеми. Разом із тим такі системи є найбільш складними з точки зору формування стабільних режимів роботи та потребують детального аналізу пульсацій повітряного потоку.

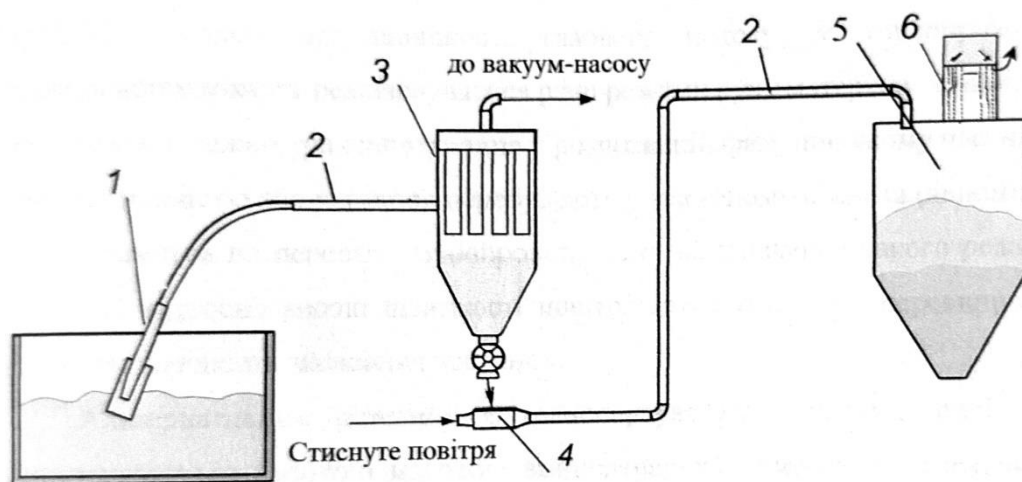


Рисунок 1.6 – Схема пневматичної транспортної установки комбінованого типу

Зазначені особливості конструктивних схем і режимів роботи пневмосистем є підґрунтям для подальшого розгляду характеристик повітряно-матеріальних потоків у трубопроводах, що буде детально проаналізовано у наступному підрозділі.

1.2. Характеристика повітряно-матеріальних потоків у трубопроводах пневматичних систем

Процес пневматичного транспортування цементу в трубопроводах реалізується у вигляді складного двофазного потоку, що складається з газової фази (повітря) та дисперсної твердої фази (частинок цементу). Характер руху такого повітряно-матеріального потоку визначається співвідношенням між швидкістю повітря, масовою концентрацією матеріалу, геометрією трубопроводу та режимом роботи пневматичної системи.

Залежно від співвідношення масової витрати цементу до витрати повітря, а також від швидкості газового потоку, у трубопроводах пневмосистем можуть реалізовуватися різні режими руху матеріалу. Найбільш поширеним є режим транспортування у розрідженій фазі, при якому частинки цементу повністю або частково перебувають у зваженому стані та рівномірно розподіляються по перерізу трубопроводу. Для забезпечення такого режиму необхідні відносно високі швидкості повітряного потоку, що перевищують критичну швидкість зависання частинок.

Альтернативним режимом є транспортування у щільній фазі, яке характеризується високою масовою концентрацією цементу та зниженими швидкостями повітря. У цьому випадку матеріал переміщується у вигляді пробок, поршнів або шарів, що чергуються з газовими прошарками. Щільнофазний транспорт дозволяє зменшити питомі енерговитрати та знос трубопроводів, однак є значно чутливішим до змін режимів подачі повітря і матеріалу, що підвищує ймовірність виникнення нестійких і пульсаційних режимів.

Однією з основних характеристик повітряно-матеріального потоку є швидкість руху повітря, яка безпосередньо впливає на характер взаємодії між фазами. За недостатньої швидкості повітря відбувається осідання частинок

					ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ	Лист
						16
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

цементу на нижній стінці трубопроводу з подальшим формуванням відкладень і пробок. Надмірне збільшення швидкості призводить до зростання втрат тиску, інтенсифікації зносу обладнання та підвищеного пилоутворення.

Не менш важливим параметром є масова концентрація цементу в потоці, яка визначає гідродинамічний опір трубопроводу та стабільність транспортування. Зі збільшенням концентрації різко зростають втрати тиску, а рух потоку набуває нестационарного характеру. У таких умовах навіть незначні коливання витрати повітря або подачі матеріалу можуть спричинити виникнення пульсацій швидкості та тиску. На рисунку 1.7

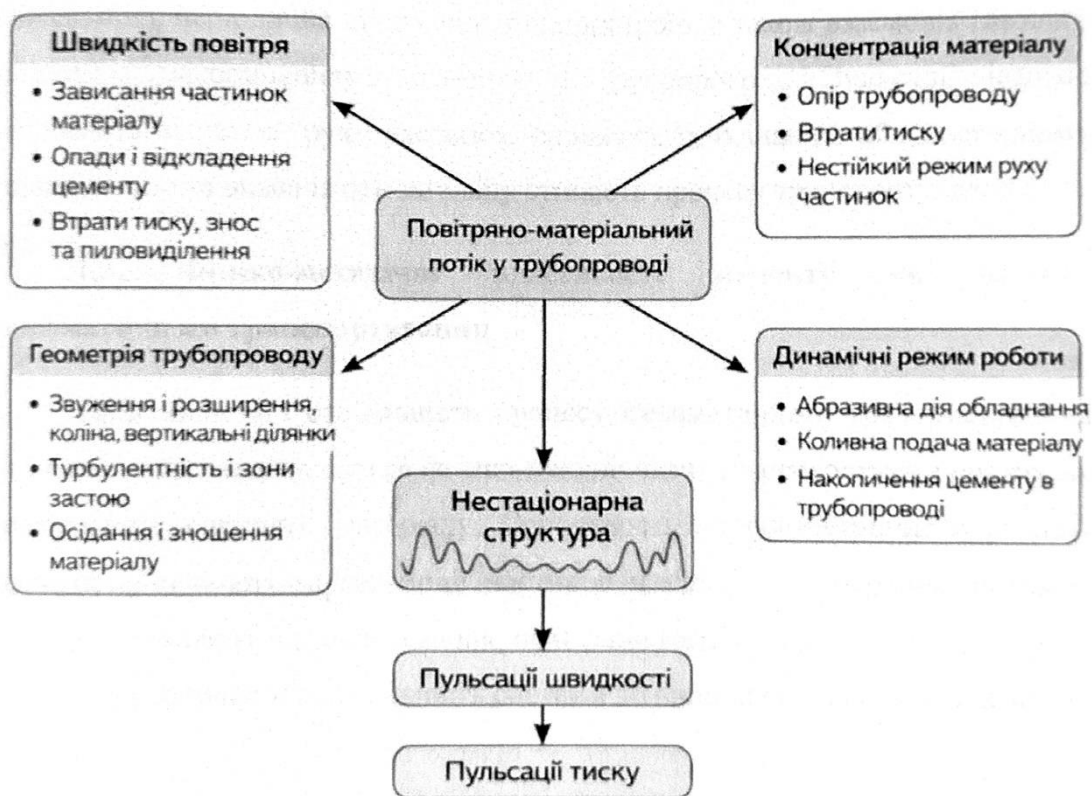


Рисунок 1.7 – Фактори, що визначають характеристики повітряно-матеріального потоку в пневматичних трубопроводах

Геометрія транспортного трубопроводу також істотно впливає на характер повітряно-матеріального потоку. Наявність колін, вертикальних ділянок, звужень і розширень призводить до локальних змін швидкості та тиску, що сприяє виникненню зон підвищеної турбулентності та нестационарних процесів. Особливо чутливими до таких змін є системи з великою довжиною трубопроводів та високою концентрацією цементу.

В реальних пневматичних системах транспортування цементу повітряно-матеріальний потік, як правило, має пульсаційний характер, що проявляється у періодичних коливаннях тиску, швидкості та концентрації матеріалу. Джерелами пульсацій можуть бути робота компресорного обладнання, періодична дія живильних пристроїв, а також взаємодія газового потоку з накопиченнями цементу в трубопроводі. Пульсації істотно впливають на умови руху частинок, сприяють їх осіданню або повторному підхопленню та визначають загальну стійкість процесу транспортування.

1.3. Фізико-механічні властивості цементу як об'єкта пневматичного транспортування

Ефективність і стабільність процесу пневматичного транспортування значною мірою визначаються фізико-механічними властивостями цементу як дисперсного сипучого матеріалу. Особливості гранулометричного складу, щільності, сипкості та взаємодії частинок цементу з повітряним потоком істотно впливають на формування повітряно-матеріального потоку, втрати тиску в трубопроводах і схильність системи до виникнення нестійких режимів руху.

Цемент належить до дрібнодисперсних порошкоподібних матеріалів з характерним розміром частинок переважно у діапазоні 1–100 мкм. Такий гранулометричний склад зумовлює високу сумарну питому поверхню частинок, що сприяє інтенсивній взаємодії цементу з повітряним потоком. Водночас дрібнодисперсність обумовлює підвищену схильність цементу до

агрегації, утворення грудок і налипання на стінки трубопроводів, особливо за наявності підвищеної вологості або нестационарних режимів руху.

Однією з важливих характеристик цементу є насипна густина, значення якої зазвичай знаходиться в межах 1100–1500 кг/м³ залежно від виду цементу, ступеня ущільнення та умов зберігання. Насипна густина визначає масову концентрацію матеріалу в повітряно-матеріальному потоці та істотно впливає на втрати тиску в трубопроводі. Зі збільшенням концентрації цементу зростає гідродинамічний опір потоку, що підвищує чутливість системи до коливань швидкості та тиску.

Важливу роль у процесі пневматичного транспортування відіграє сипкість цементу, яка характеризується кутом природного укосу та коефіцієнтами внутрішнього і зовнішнього тертя. Низька сипкість та підвищене внутрішнє тертя ускладнюють рівномірну подачу матеріалу з бункерів і живильників, що призводить до нерівномірного надходження цементу в трубопровід. Такі коливання подачі є одним із факторів виникнення пульсації масової концентрації та швидкості повітряно-матеріального потоку.

Цемент також характеризується високою абразивністю, що зумовлює інтенсивний знос внутрішніх поверхонь трубопроводів, колін і живильних пристроїв. Абразивна дія частинок особливо проявляється при транспортуванні у розрідженій фазі за високих швидкостей повітря, а також у зонах локальних турбулентних вихорів. Зміна внутрішнього діаметра труб у процесі експлуатації призводить до зміни гідравлічних характеристик тракту та може спричиняти додаткові пульсації тиску.

Суттєвий вплив на процес транспортування має вологість цементу. Навіть незначне підвищення вологості призводить до зростання сил зчеплення між частинками, зниження сипкості та утворення агломератів. Це ускладнює рух цементу в трубопроводі, сприяє осіданню матеріалу та формуванню відкладень, що різко знижує стабільність режимів пневмотранспортування і підвищує ризик аварійних закупорювань.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМіМ.601мММ.011-00.00.000 ПЗ

Лист
19

Взаємодія цементу з повітряним потоком супроводжується явищем псевдозрідження, при якому матеріал набуває властивостей рідини за умови досягнення певної швидкості повітря. У пневматичних системах транспортування цементу псевдозрідження може мати як позитивний ефект, полегшуючи рух матеріалу, так і негативний – спричиняючи нерівномірність потоку та підвищену чутливість до пульсацій тиску.

1.4 Апаратурно-технологічні схеми силосних складів із системами пневматичного транспортування цементу

На рисунку 1.8 наведено прикладову апаратурно-технологічну схему силосного складу, обладнаного системою пневматичного транспортування цементу, яка забезпечує приймання, переміщення, дозування, змішування та відвантаження продукції.

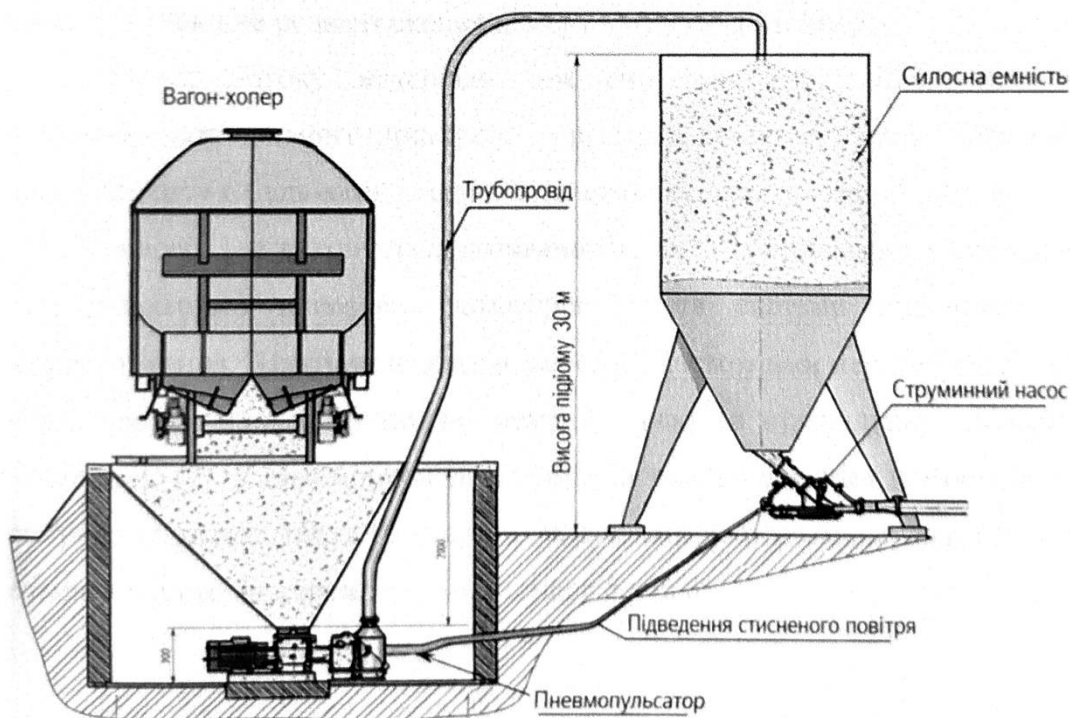


Рисунок 1.8 – Апаратурно-технологічна схема силосного складу

Наступна схема зображена на рисунку 1.9 показує розвантаження автомобілів та вагонів цементовозів здійснюється за допомогою власного компресора цементовоза або із застосуванням стаціонарної компресорної установки — газодувки (1). Стиснене повітря використовується для подачі цементу в силоси 1–4, кожен з яких має ємність 110 т. Такий підхід забезпечує гнучкість логістики та можливість приймання цементу з різних транспортних засобів.

Розвантаження залізничних вагонів-хоперів виконується на під'їзних коліях у циліндро-конічний бункер (3) об'ємом 9 м³, розташований під залізничним полотном. У нижній частині бункера встановлено гвинтовий пневмопідіймач типу ТА-53 (4), який здійснює транспортування цементу або піску до силосів 1–4. У пневмопідіймач подається стиснене повітря від газодувки (1), а переміщення матеріалу відбувається по пневмопроводу (5). Газодувка (1) може працювати як на розвантаження вагонів із бункера (3) у силоси 1–4, так і на розвантаження цементовозів та контейнерів.

Розподіл потоку матеріалу між силосами 1–4 здійснюється за допомогою розподільчого пристрою — розвантажувача (9), який забезпечує подачу цементу в будь-який із силосів залежно від технологічних потреб.

Із силосів 1–4 виконується дозування цементу різних марок у силоси 5 і 6 за допомогою шлюзових дозаторів (6) та системи пневматичного транспортування. Шлюзові дозатори, керовані частотними перетворювачами, забезпечують регульовану подачу цементу, піску та мінеральних добавок у пневмолінію (7). У пневмопроводі (7) відбувається змішування компонентів у повітряному потоці, після чого суміш за допомогою розвантажувача (10) або перемикача потоків спрямовується у силос 5 або 6.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМіМ.601мММ.011-00.00.000 ПЗ

Лист

21

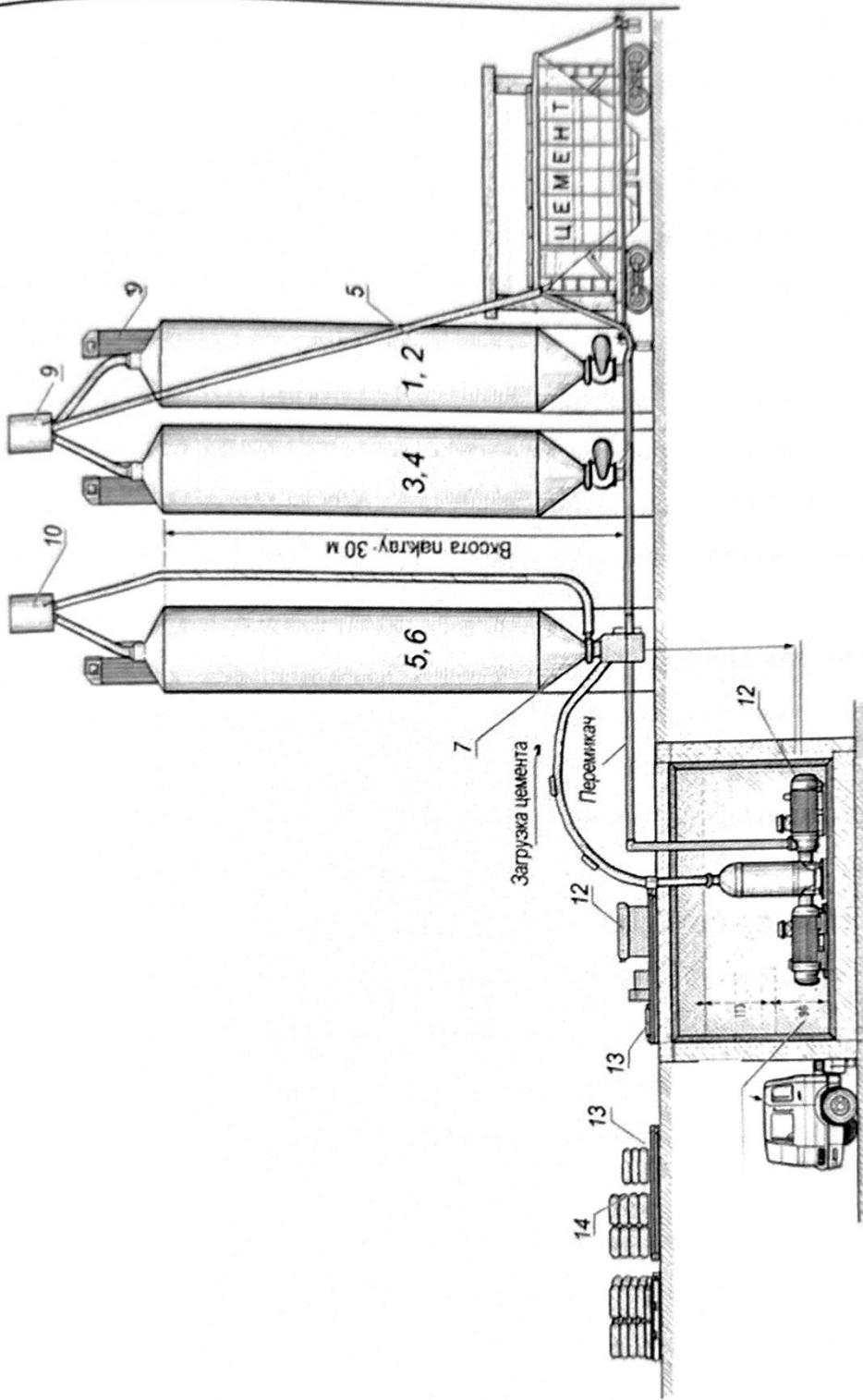


Рисунок 1.9 – Розвантаження вагонів цементовозів

Зм.	Лист	№ докв.	Підп.	Дата

ГМіМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Подача повітря в пневмотрасу (7) здійснюється роздільно від двох повітродувок (2), кожна з яких обслуговує окрему пневмолінію (силоси 1,3 та силоси 2,4). Вище за ходом потоку ці дві пневмолінії об'єднуються в одну, що дозволяє реалізувати дозування до чотирьох компонентів. На практиці, як правило, змішують 2–3 компоненти. Точність дозування становить 5–7 %, що є прийнятним для більшості технологічних процесів виробництва цементних сумішей.

Для контролю подачі матеріалу в пневмотрасу на кожному шлюзовому дозаторі встановлено датчики, які сигналізують про надходження матеріалу. Силоси обладнані системами аерації для запобігання зависанню матеріалу в кінчній частині. З метою підвищення точності дозування компонентів доцільно застосовувати вібраційні днища силосів.

Схемою також передбачено можливість завантаження цементовозів продукцією безпосередньо з силосів 1–4 через пневмотрасу (7). Для цього на пневмолінії встановлено перемикач (8). На кожному силосі змонтовано картриджний фільтр (11), призначений для очищення надлишкового повітря від цементного пилу.

Цемент із силосів 5 та 6 надходить до затарювальної машини (13), де виконується фасування в мішки масою 25 або 50 кг. Далі продукція транспортером (14) подається до вузла укладання мішків на піддони. Після укладання та пакування стрейч-плівкою мішки по рольгангах (15) транспортуються на вантажну площадку, де здійснюється їх навантаження навантажувачем.

Продуктивність лінії розвантаження вагонів становить до 80 т цементу за годину. Продуктивність пневмопроводу для завантаження силосів 5, 6 та цементовозів складає 40–50 т/год. Кожен шлюзовий дозатор типу BL-250, встановлений під силосами 1–4, має регульовану продуктивність у межах 10–20 т/год, що забезпечується частотним перетворювачем.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Лата

ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Лист

23

Потужність газодувки (1) становить 45 кВт. Дві повітродувки (2), які працюють на пневмолінію (7), оснащені електродвигунами потужністю по 37кВт кожна.

Висновки до розділу 1.

Виконано аналіз сучасного стану пневматичних систем транспортування цементу, розглянуто їх класифікацію, конструктивні схеми та основні режими роботи. Показано, що характер повітряно-матеріального потоку в трубопроводах істотно залежить від режиму транспортування, геометрії магістралі та фізико-механічних властивостей цементу. Встановлено, що наявність нестационарних процесів і пульсацій повітряного потоку є однією з ключових причин нестабільності роботи пневмосистем і утворення цементних заторів. Отримані узагальнення створюють необхідне підґрунтя для подальшого теоретичного аналізу нестационарного руху повітря та експериментального дослідження резонансних режимів транспортування цементу.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМіМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Лист

24

Розділ 2: Теоретичні основи газової динаміки та нестационарного руху повітря в трубопроводах

2.1. Фізичні властивості повітря та основні рівняння газової динаміки

Повітря, яке використовується як транспортує середовище у пневматичних системах, належить до стисливих газів, фізичні властивості яких суттєво залежать від температури та тиску. Для аналізу руху повітря в трубопроводах пневматичних систем зазвичай застосовують спрощені газодинамічні моделі, що ґрунтуються на припущеннях про одновимірність потоку, сталість перерізу трубопроводу та ізотермічний або квазіізотермічний характер процесу.

До основних фізичних властивостей повітря, які визначають його рух у трубопроводах, належать густина, в'язкість, температура та тиск. Густина повітря визначається рівнянням стану ідеального газу

$$\rho = \frac{P}{RT} \quad (2.1)$$

Де ρ – густина повітря, кг/м³;

P – абсолютний тиск, Па;

T – абсолютна температура, К;

R – газова стала для повітря, $R=287$ Дж

Динамічна в'язкість повітря залежить від температури і для інженерних розрахунків може бути визначена за формулою Сазерленда

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + C}{T + C} \quad (2.2)$$

ГМіМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ				
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат
Розроб.		Мормуль	<i>[підпис]</i>	12.01
Перев.		Васильєв	<i>[підпис]</i>	12.01
Сервісник				
Н. контр.		Васильєв	<i>[підпис]</i>	12.01
			Теоретичні основи газової динаміки та нестационарного руху повітря в трубопроводах	
		Лім.	Лист	Листів
		Н	25	
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»				

Де μ – динамічна в'язкість, Па·с;

μ_0 – в'язкість при температурі ;

C – стала Сазерленда.

Кінематична в'язкість повітря визначається як

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.3)$$

Рух повітря в трубопроводах пневматичних систем описується системою основних рівнянь газової динаміки. Першим із них є рівняння неперервності, яке для стаціонарного одновимірного потоку має вигляд

$$\rho w A = \text{const}$$

Де w – середня швидкість повітряного потоку, м/с;

A – площа поперечного перерізу трубопроводу, м².

Для нестисливого газу рівняння спрощується до

$$w A = \text{const}$$

однак у пневматичних системах транспортування цементу стисливість повітря, як правило, необхідно враховувати.

Другим базовим рівнянням є рівняння руху (рівняння Ейлера), яке для одновимірного потоку в трубопроводі з урахуванням сил тертя може бути записане у вигляді

$$\rho w \frac{dw}{dx} = -\frac{dp}{dx} - \frac{2\tau}{D} \quad (2.4)$$

Де x – координата вздовж трубопроводу;

τ – дотичне напруження на стінці труби;

D – внутрішній діаметр трубопроводу.

Зм.	Лист	№ докum	Підп.	Дата

ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Лист

26

Для практичних розрахунків дотичне напруження пов'язують зі швидкістю потоку через коефіцієнт гідравлічного тертя

$$\tau = \frac{\lambda \rho w^2}{8}, \quad (2.5)$$

Де λ – коефіцієнт гідравлічного опору.

Третім фундаментальним співвідношенням є рівняння енергії, яке для ізотермічного руху газу в трубопроводі набуває спрощеного вигляду. За умови сталої температури газу ($T = \text{const}$) рівняння стану дозволяє пов'язати зміну тиску зі зміною густини, що істотно спрощує подальший аналіз.

Для характеристики режиму руху повітряного потоку використовується критерій Рейнольдса

$$Re = \frac{\rho w D}{\mu} \quad (2.6)$$

який дозволяє визначити характер течії – ламінарний або турбулентний.

У пневматичних системах транспортування цементу, як правило, реалізується турбулентний режим течії, для якого втрати тиску та нестационарні ефекти проявляються найбільш інтенсивно.

2.2. Втрати тиску при русі повітря в трубопроводах пневматичних систем

При русі повітря в трубопроводах пневматичних систем частина механічної енергії потоку витрачається на подолання сил внутрішнього тертя та взаємодію газу зі стінками труби і місцевими опорами. У результаті цього відбувається зменшення повного тиску вздовж довжини трубопроводу, що є однією з визначальних характеристик працездатності пневматичних систем транспортування цементу.

						ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата			27

Загальні втрати тиску в трубопроводі складаються з втрат по довжині та місцевих втрат, що можуть бути записані у вигляді

$$\Delta p = \Delta p_l + \sum \Delta p_m, \quad (2.7)$$

Де Δp_l – втрати тиску по довжині трубопроводу, Па;

Δp_m – місцеві втрати тиску, Па.

Втрати тиску по довжині трубопроводу

Основним рівнянням для визначення втрат тиску при русі повітря в прямолінійній ділянці трубопроводу є рівняння Дарсі–Вейсбаха

$$\Delta p_l = \lambda \frac{L \rho w^2}{D \cdot 2}, \quad (2.8)$$

де

λ коефіцієнт гідравлічного опору;

L довжина трубопроводу, м;

D внутрішній діаметр труби, м;

ρ густина повітря, кг/м³;

w – середня швидкість повітря, м/с.

Коефіцієнт гідравлічного опору λ залежить від режиму течії та відносної шорсткості внутрішньої поверхні труби. Для ламінарного режиму течії ($Re < 2300$) він визначається співвідношенням

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (2.9)$$

У турбулентному режимі ($Re > 4000$), характерному для пневматичних систем транспортування цементу, коефіцієнт λ визначається за емпіричними залежностями, зокрема рівнянням Колбрука–Уайта

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right) \quad (2.10)$$

Де ε – абсолютна шорсткість внутрішньої поверхні труби, м
 Місцеві втрати тиску

Окрім втрат по довжині, у пневматичних системах істотну роль відіграють місцеві втрати тиску, що виникають у колінах, грійниках, звуженнях, розширеннях та на вході й виході з трубопроводу. Місцеві втрати визначаються за формулою:

$$\Delta p_m = \zeta \frac{\rho w^2}{2} \quad (2.11)$$

Де ζ – коефіцієнт місцевого опору.

У реальних пневматичних системах транспортування цементу сумарні місцеві втрати можуть досягати значної частки загальних втрат тиску, особливо за наявності великої кількості колін і змін напрямку руху потоку. У таких зонах відбувається різка перебудова структури потоку, що сприяє виникненню нестационарних явищ та пульсацій тиску.

Ізотермічний рух стисливого газу в трубопроводі

Для повітря як стисливого газу при відносно невеликих перепадах тиску та наявності теплообміну з навколишнім середовищем рух у трубопроводі часто приймають ізотермічним. За цієї умови температура газу залишається сталою ($T = \text{const}$), а густина змінюється відповідно до рівняння стану.

Для ізотермічного руху газу в трубі рівняння втрат тиску набуває вигляду

$$p_1^2 - p_2^2 = \lambda \frac{L}{D} \frac{2RT}{A^2} \dot{m}^2, \quad (2.12)$$

де

p_1^2, p_2^2 – тиск на початку та в кінці трубопроводу, Па;

\dot{m} – масова витрата повітря, кг/с;

A – площа поперечного перерізу труби, m^2 .

Ця залежність показує, що при ізотермічному русі втрати тиску зростають нелінійно зі збільшенням масової витрати повітря та довжини трубопроводу. У пневматичних системах транспортування цементу це призводить до підвищеної чутливості потоку до коливань витрати повітря, які можуть викликати пульсації тиску та швидкості.

2.3. Нестационарний рух повітря в трубопроводах та умови виникнення пульсацій

У реальних пневматичних системах транспортування цементу рух повітря в трубопроводах, як правило, має нестационарний характер, що проявляється у вигляді періодичних або випадкових коливань тиску, швидкості та масової витрати. Такі коливання прийнято називати пульсаціями повітряного потоку, і вони суттєво впливають на стабільність процесу транспортування сипучого матеріалу.

Нестационарний рух газу характеризується тим, що основні параметри потоку є функціями не лише координати, а й часу:

$$\begin{aligned} p &= p(x, t), \\ w &= w(x, t), \\ \rho &= \rho(x, t) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Для опису нестационарного руху повітря в трубопроводі використовується нестационарне рівняння неперервності

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} = 0 \quad (2.14)$$

та нестационарне рівняння руху в одновимірній постановці

$$\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\lambda w |w|}{2D} \quad (2.15)$$

Ці рівняння показують, що будь-які часові зміни тиску або швидкості в одній частині трубопроводу поширюються вздовж потоку, формуючи хвилі тиску та швидкості.

Джерела виникнення пульсацій повітряного потоку

Основними джерелами пульсацій у пневматичних системах транспортування цементу є:

- робота компресорів і повітродувок з періодичним характером подачі;
- циклічна робота камерних і пневмокамерних живильників;
- нерівномірна подача цементу в трубопроводі;
- локальні зміни геометрії трубопроводу (коліна, звуження, розширення);
- періодичне утворення та руйнування скупчень матеріалу.

Схеми руху матеріалу в повітряному потоці наведені на рисунку 2.1.

Коливання тиску зазвичай мають квазігармонічний характер і можуть бути описані у вигляді

$$p(t) = p_0 + \Delta p \sin(\omega t), \quad (2.16)$$

Де p_0 – середній тиск;

Δp – амплітуда пульсацій тиску;

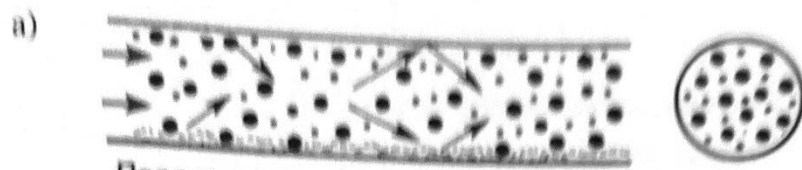
$\omega = 2\pi f$ – кругова частота пульсацій;

f – частота пульсацій.

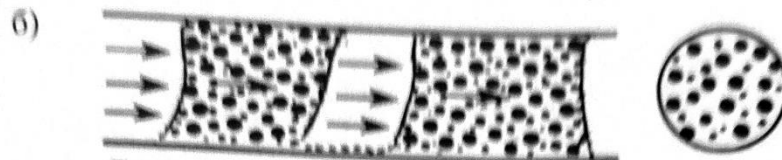
Відповідні коливання швидкості повітря можуть бути подані як

$$w(t) = w_0 + \Delta w \sin(\omega t + \varphi)$$

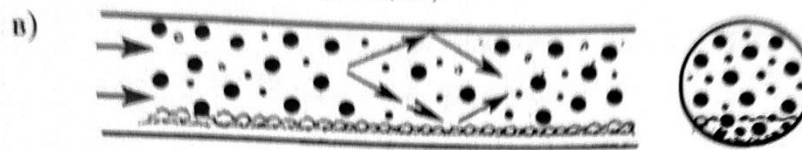
де φ – фазовий зсув між коливаннями тиску та швидкості.



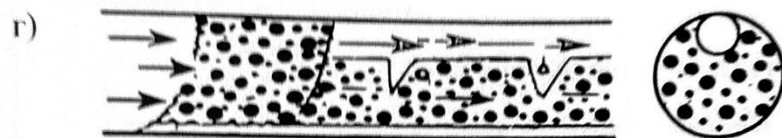
Подача в потоці стисненого повітря



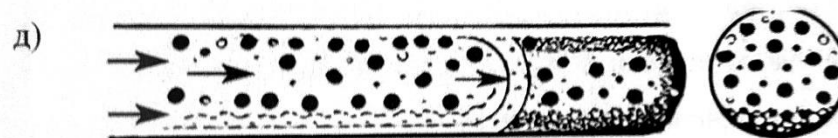
Подача з підстильним шаром («Флюїд-Ліфт»)



Подача у гнучкому трубопроводі з підстильним шаром («Флюїд-Флекс»)



Імпульсна подача з утворенням пробок матеріалу на початку транспортного трубопроводу (Такт-Шуб)



Імпульсна подача з утворенням пробок матеріалу на початку транспортного трубопроводу

е) лінії пневматичного транспортування цементу

Рисунок 2.1 – Схеми руху матеріалу трубопроводом в повітряному

потоці

Поширення пульсацій у трубопроводі

Пульсації тиску поширюються вздовж трубопроводу у вигляді хвиль стисливого газу зі швидкістю, близькою до швидкості звуку

$$a = \sqrt{k R T}, \quad (2.17)$$

Де a – швидкість звуку в повітрі, м/с;

k – показник адіабати (для повітря $k=1,4$).

У довгих трубопроводах можливе накладання прямих і відбитих хвиль, що призводить до виникнення резонансних явищ. Резонансні частоти трубопроводу можуть бути оцінені за формулою

$$f_n = \frac{na}{2L}, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.18)$$

Де L – довжина трубопроводу.

За збігу частоти збудження пульсацій з власною частотою трубопроводу амплітуда коливань тиску різко зростає, що негативно впливає на стабільність роботи пневматичної системи.

Вплив пульсацій на процес пневматичного транспортування цементу

Пульсації повітряного потоку істотно змінюють умови руху цементу в трубопроводах. У періоди зниження швидкості повітря можливе локальне осідання частинок цементу, тоді як у фазі підвищення швидкості відбувається їх повторне підхоплення. Це призводить до періодичних змін масової концентрації матеріалу, додаткових втрат тиску та підвищеного зносу обладнання.

2.4 Розрахунок лінії пневматичного транспортування цементу

Для розрахунку лінії пневматичного транспортування цементу продуктивністю 10 т/год, було використано класичну схему для

					ГМіМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ	Лист
						33
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

транспортування цементу від місця доставки транспортом до місця зберігання зображену на рисунку 2.2.

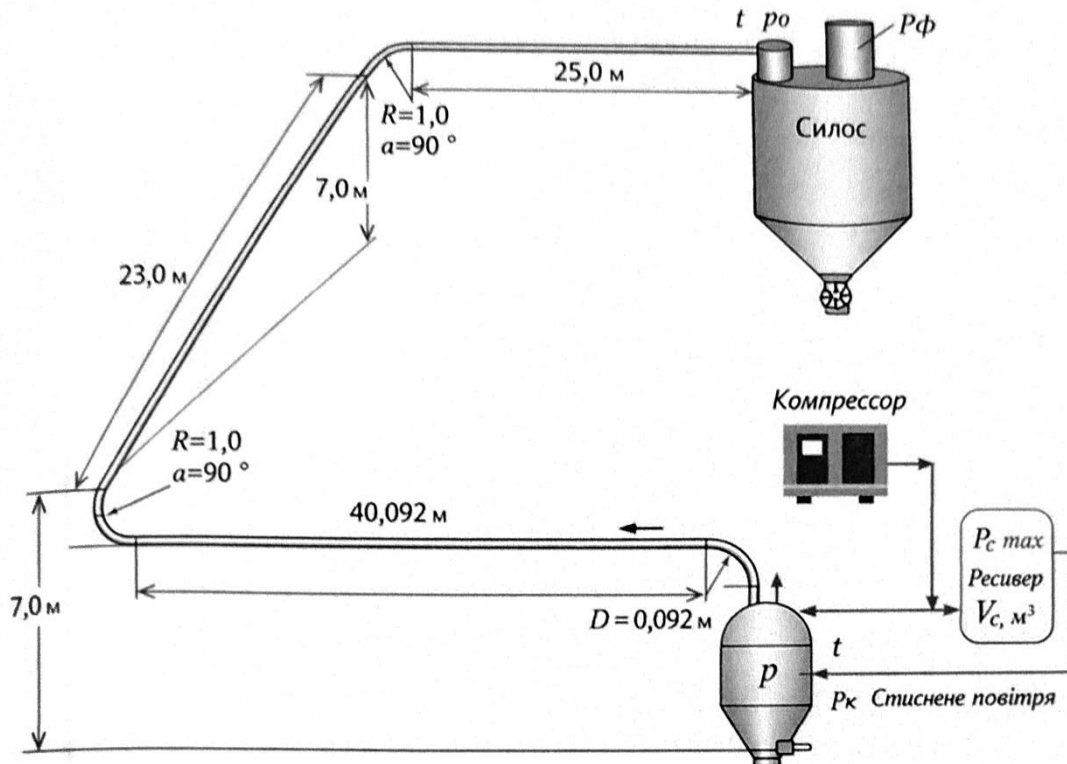


Рисунок 2.2 – Лінія пневматичного транспортування цементу

Але для більш надійного транспортування без утворення заторів цементу в середину трубопроводу встановлено перфоровану трубку яка створює додаткові імпульси на систему через коротко імпульсну подачу стиснутого повітря.

1) Продуктивність по цементу:

$$G_t = 10 \text{ т/год} = \frac{10000}{3600} \approx 2.78 \text{ кг/с} \quad (2.19)$$

Приймемо повітря $\sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$\rho \approx 1.2 \text{ кг/м}^3 \text{ кг/м}^3$$

2) Вибір робочого режиму (прийняті значення)

Для цементу в розрідженій фазі типово беруть:

швидкість повітря в трубі $w = 18 \dots 22 \text{ м/с}$

масове навантаження:

$$\mu = \frac{G_a}{G_t} \approx 10 \dots 15 \quad (2.20)$$

Візьмемо $\mu = 12$ і $w = 20 \text{ м/с}$

3) Витрата повітря

Масова витрата повітря:

$$G_a = \frac{G_t}{\mu} = \frac{2.78}{12} \approx 0.23 \text{ кг/с} \quad (2.21)$$

Об'ємна витрата (при $\rho = 1.2$):

$$Q = \frac{G_a}{\rho} = \frac{0.23}{1.2} \approx 0.193 \text{ м}^3 / \text{с} = 695 \text{ м}^3 / \text{ГОД} \quad (2.22)$$

4) Діаметр трубопроводу

Площа перерізу:

$$A = \frac{Q}{w} = \frac{0.193}{20} \approx 0.00965 \text{ м}^2 \quad (2.23)$$

Діаметр:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.00965}{3.1416}} \approx 0.111 \text{ м} \quad (2.24)$$

Висновок по трубі: внутрішній діаметр потрібен близько 110 мм → практично це DN100–DN125 (залежно від фактичного внутрішнього діаметра труби).

якщо взяти ID ≈ 100 мм то швидкість буде вища (~ 23 м/с)
якщо ID ≈ 125 мм то швидкість впаде ($\sim 15-16$ м/с), може зрости ризик осідання

5) Оцінка втрат тиску і потужності (приклад)

Точні втрати тиску дуже залежать від довжини, колін, вертикального підйому, схеми живлення.

5.1 Втрати тиску по повітрю (Дарсі-Вейсбах)

$$\Delta p_{\text{air}} = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho w^2}{2} \quad (2.25)$$

де $\lambda \approx 0.02$ (турбулентний режим, гладка/середня труба як стартова оцінка).

Наприклад, якщо $L = 100$ м, $D = 0.111$ м, $w = 20$ м/с:

$$\Delta p_{\text{air}} = 0.02 \cdot \frac{100}{0.111} \cdot 1.2 \cdot 20^2 \quad (2.26)$$

$\Delta p_{\text{air}} \approx 0.02 \cdot 901 \cdot 240 \approx 4325$ Па = 0.043 бар

5.2 Втрати “повітря + цемент” (інженерна оцінка)

У пневмотранспорті основні додаткові втрати створює тверда фаза (прискорення частинок, удари/тертя, локальні зони). На практиці часто беруть:

$$\Delta p_{\text{mix}} \approx K \cdot \Delta p_{\text{air}} + \Delta p_{\text{loc}} \quad (2.27)$$

Де K для цементу в розрідженій фазі може бути порядку 5...20 (дуже залежить від концентрації, вологості, колін, вертикалі).

Для нашого розрахунку візьмемо $K = 12$:

$$\Delta p_{\text{mix}} \approx 12 \cdot 0.043 \approx 0.52 \text{ бар} \quad (2.28)$$

Місцеві втрати:

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Лист

36

$$\Delta p_{\text{loc}} = \sum \zeta_i \frac{\rho w^2}{2} \quad (2.29)$$

Для 6–8 колін + арматури легко набігає 0.1–0.3 бар (як порядок).

Отримаємо для прикладу (100 м траси + кілька колін):

$$\Delta p_{\Sigma} \approx 0.6 \dots 0.9 \text{ бар}$$

5.3 Потужність компресора

$$N = \frac{\Delta p_{\Sigma} Q}{\eta} \quad (2.30)$$

де $\eta \approx 0.65 \dots 0.75$

Візьмемо $\Delta p_{\Sigma} = 0.8 \text{ бар} = 8.0 \times 10^4 = 80000 \text{ Па}$, $Q = 0.193 \text{ м}^3 / \text{с}$,
 $\eta = 0.7$

$$N = \frac{80000 \cdot 0.193}{0.7} \approx 22000 \text{ Вт} \approx 22 \text{ кВт кВт} \quad (2.31)$$

Висновки до розділу 2.

Розглянуто фізичні властивості повітря та основні рівняння газової динаміки, які описують рух стисливого газу в трубопроводах пневматичних систем. Проаналізовано втрати тиску при ізотермічному русі повітря з урахуванням гідравлічного опору та нестационарних складових потоку, зокрема пульсацій тиску і швидкості. Показано, що за певних частот збурення в трубопроводі можливе виникнення хвильових і резонансних явищ, які істотно впливають на енергетичні характеристики процесу транспортування. Отримані теоретичні положення є основою для постановки та інтерпретації експериментальних досліджень пульсаційної подачі повітря, представлених у наступному розділі.

Розділ 3 Експериментальні дослідження резонансної інтенсифікації процесу пневматичного транспортування цементу

3.1 Дослідження пульсаційної подачі повітря при транспортуванні цементу

Для проведення експериментальних досліджень було використано практичні напрацювання та виробничий досвід з перевантаження цементу, отримані на підприємстві «Павлоград-цемент і КО», яке експлуатує промислові системи пневматичного транспортування сипучих матеріалів. На підприємстві застосовується установка для розвантаження цементу з залізничних вагонів, принципова схема якої наведена на рисунку 3.1.

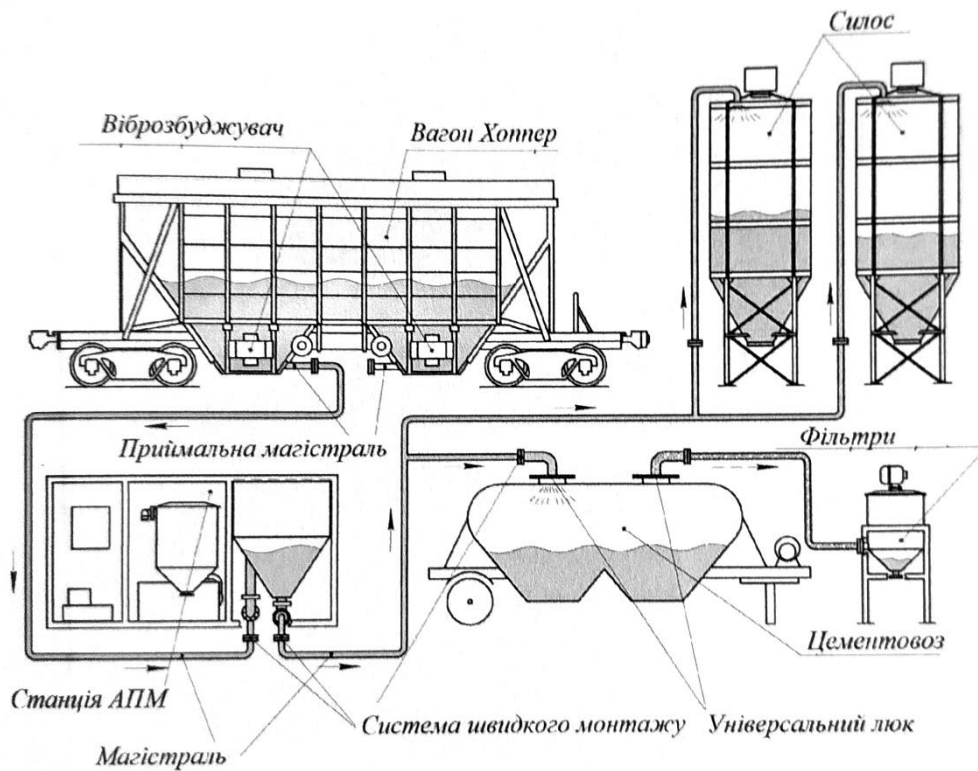


Рисунок 3.1 – Схема установки для пневматичного розвантаження цементу

					ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат				
Розроб.	Мормуль		<i>[Signature]</i>	12.01	Експериментальні дослідження резонансної інтенсифікації процесу пневматичного транспортування цементу	Літ.	Лист	Листів
Перев.	Васильєв		<i>[Signature]</i>	12.01		Н	39	
Керівник						Национальний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»		
Н. контр.	Васильєв		<i>[Signature]</i>	12.01				
Затв.	Орисенко		<i>[Signature]</i>	12.01				

У процесі експлуатації пневматичних систем транспортування цементу одним із найбільш характерних і проблемних явищ є утворення заторів і пробок із осілого матеріалу в магістральних трубопроводах. Такі явища виникають, як правило, за умов зниження швидкості повітряного потоку нижче критичного значення, необхідного для стійкого перенесення частинок цементу у зваженому стані. Додатковими чинниками, що сприяють осіданню цементу, є підвищена вологість матеріалу, нерівномірність подачі повітря, наявність локальних опорів, а також горизонтальні та похилі ділянки трубопроводів значної довжини.

На рисунку 3.2 показано фотографії обладнання яке використовується на підприємстві.

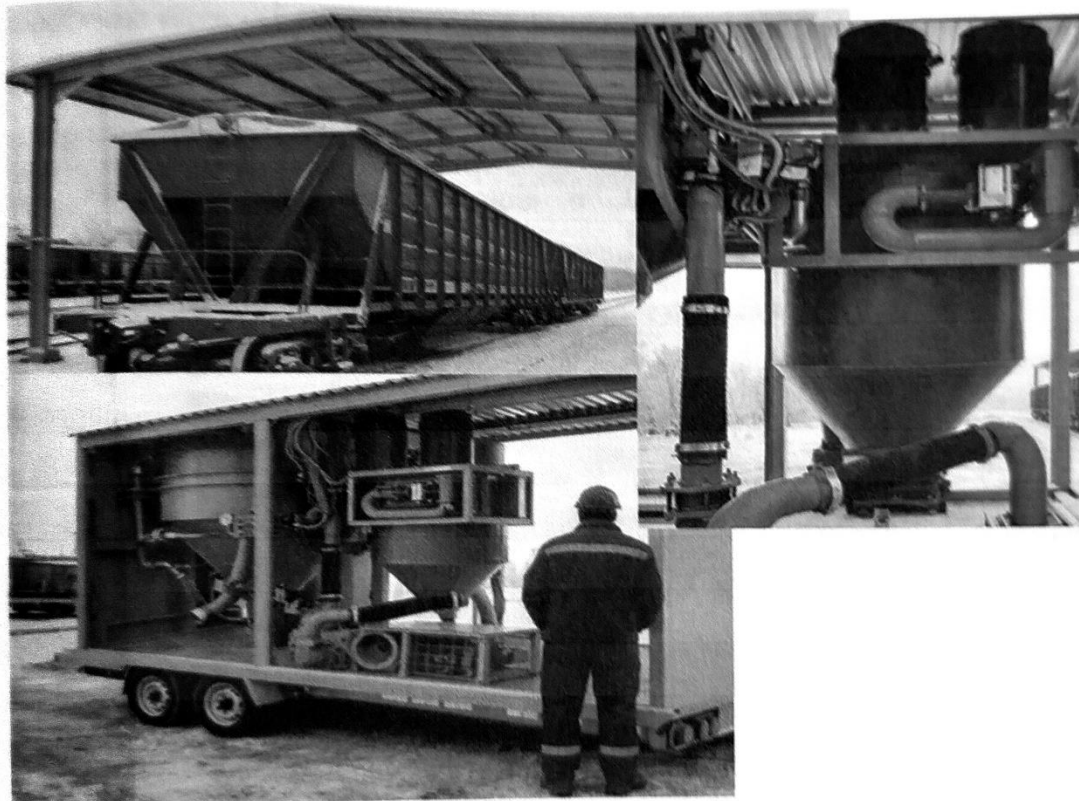


Рисунок 3.2 – Обладнання для перевантаження цементу

					ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		40

Осідання цементу на внутрішніх поверхнях труб призводить до поступового наростання шару матеріалу, який з часом може трансформуватися у щільну цементну пробку, що частково або повністю перекриває переріз трубопроводу. У таких умовах різко зростають втрати тиску, з'являються нестационарні коливання витрати повітря та матеріалу, а в окремих випадках відбувається повна зупинка транспортування.

Практичний досвід експлуатації систем пневмотранспорту на підприємстві «Павлоград-цемент і КО» показує, що пульсаційна подача повітря є одним з ефективних способів запобігання утворенню цементних пробок і руйнування вже сформованих локальних заторів. Накладання керованих пульсацій тиску на основний повітряний потік сприяє періодичному зростанню миттєвої швидкості газового потоку, що призводить до повторного підхоплення осілих частинок цементу та дестабілізації структури матеріального шару.

Крім газодинамічних методів інтенсифікації транспортування, у промислових пневматичних системах широко застосовуються гнучкі ділянки трубопроводів магістралі, виконані у вигляді гумотканинних або полімерних вставок. Такі гнучкі елементи встановлюються, як правило, у зонах підвищеної ймовірності утворення пробок — на виходах із бункерів, у місцях переходу діаметрів, а також на довгих горизонтальних ділянках.

Наявність гнучких частин магістралі дозволяє здійснювати локальні коливальні або ударні впливи на трубопровід, що призводить до механічного руйнування цементних пробок. Коливання магістралі можуть реалізовуватися як за рахунок зовнішніх механічних дій (вібратори, ручні або автоматизовані удари), так і внаслідок взаємодії пульсацій повітряного потоку з пружними властивостями гнучких вставок. У таких умовах відбувається розпушення та дезінтеграція ущільненого шару цементу, після чого матеріал повторно залучається до транспортування.

Поєднання пульсаційної подачі повітря з використанням гнучких

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Лист

41

ділянок трубопроводів створює передумови для виникнення резонансних коливань у системі «повітряний потік – трубопровід – сипучий матеріал». За певних співвідношень частоти пульсацій повітряного потоку та власних частот трубопровідної магістралі можливе суттєве підсилення коливань, що сприяє інтенсифікації процесу транспортування цементу та зниженню ймовірності утворення заторів.

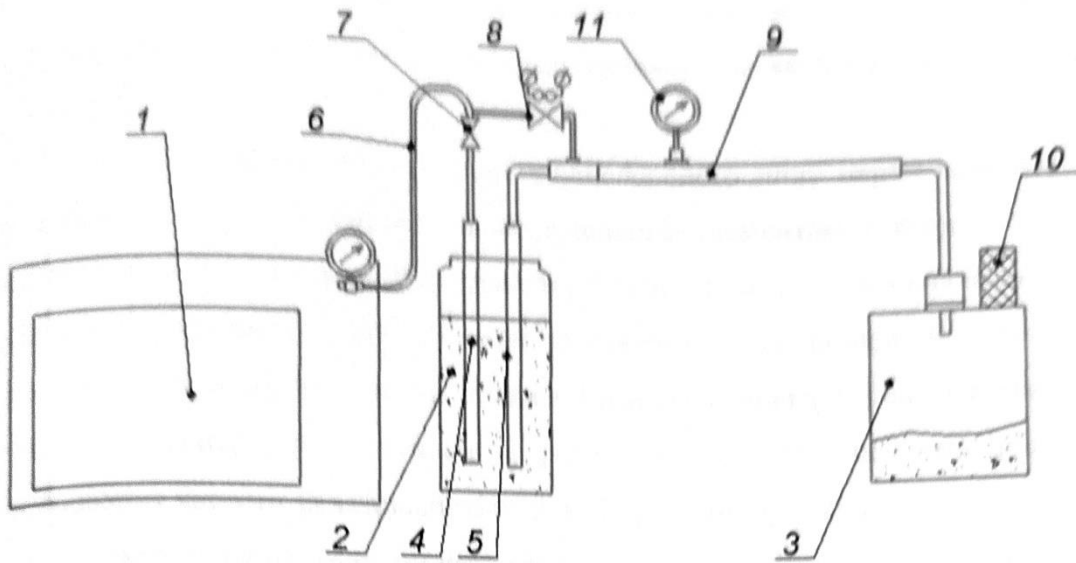
3.2 Опис експериментальної установки та методика дослідження резонансних режимів

Для дослідження резонансних режимів інтенсифікації пневматичного транспортування сипучого матеріалу при пульсаційній подачі повітря використано експериментальну установку, принцип дії якої базується на періодичному збуренні потоку несучого газу з наперед заданою частотою. Методика експерименту ґрунтується на підходах, апробованих у ряді фундаментальних досліджень з пневмотранспорту сипучих матеріалів у пульсуючих потоках газу, адаптованих до умов транспортування цементу.

Принципова схема експериментальної установки наведена на рисунку 3.3. Установка призначена для дослідження процесу пневматичного транспортування цементу в умовах пульсаційної подачі повітря та складається з ряду функціонально пов'язаних елементів, які забезпечують формування нестационарного повітряного потоку і контроль основних параметрів процесу.

Основним елементом установки є резервуар (бункер) для сипучого матеріалу, який частково заповнюється цементом або модельним порошком і відтворює умови реального пневматичного транспортування. У верхню частину резервуара через газопідвідну трубку подається стиснене повітря, яке створює необхідний тиск для захоплення та переміщення матеріалу. Забір сипучого матеріалу здійснюється за допомогою сифонної трубки, у якій під дією повітряного потоку формується повітряно-матеріальна суміш.

					ГМіМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		42



1 – компресор, 2 – резервуар для цементу, 3 – бункер, 4 – повітроподаюча трубка, 5 – сифонна трубка, 6 – трубопроводи, 7 – кран, 8 – електромагнітний клапан, 9 – магістраль з перфорованою трубкою всередині, 10 – фільтр, 11 – манометр

Рисунок 3.3 – Схема обладнання для дослідження

Формування пульсаційного режиму подачі повітря забезпечується електромагнітними клапанами, встановленими послідовно в лінії подачі стисненого повітря. Клапани виконують функцію пульсатора, здійснюючи періодичне відкривання та закривання газового каналу з наперед заданою частотою. Джерелом стисненого повітря є компресорна установка з редуктором тиску, що дозволяє підтримувати сталий середній рівень тиску в системі при зміні частоти пульсацій.

Переміщення повітряно-матеріальної суміші відбувається по транспортуючому трубопроводу, який у лабораторному варіанті має горизонтальне розташування, сталий внутрішній діаметр і фіксовану довжину. Така конфігурація трубопроводу дає змогу забезпечити відтворюваність умов течії та мінімізувати вплив геометричних факторів на результати досліджень.

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Лист
43

У кінцевій частині трубопроводу встановлено приймальний посуд, у якому відбувається осідання транспортованого матеріалу, тоді як повітря відводиться з системи.

Для очищення повітря від дрібнодисперсного пилу перед викидом у атмосферу установка обладнана фільтрувальним елементом. Контроль тиску та ресстрація його пульсацій у транспортуючій магістралі здійснюються за допомогою манометра, що дозволяє оцінювати нестационарний характер процесу. Керування режимами пульсацій подачі повітря реалізується за допомогою генератора імпульсів і реле часу, які забезпечують плавне регулювання частоти та тривалості імпульсів у заданому діапазоні.

Електромагнітні клапани керуються генератором імпульсів напруги, що дозволяє змінювати частоту та тривалість імпульсів подачі повітря. Таким чином формується пульсаційний режим транспортування за сталого середнього тиску газу.

Методика проведення експерименту

Перед початком досліджень резервуар заповнювався сипучим матеріалом на 85–90 % об'єму, що забезпечувало стабільні умови забору матеріалу та виключало вплив рівня заповнення на результати експерименту. При закритому електромагнітному клапані система попередньо герметизувалася, після чого за допомогою редуктора встановлювався заданий тиск стисненого повітря, який контролювався манометром.

Далі за допомогою генератора імпульсів встановлювалася необхідна частота пульсацій повітряного потоку, після чого електромагнітний клапан починав працювати у режимі періодичного відкривання та закривання прохідного каналу. У результаті стиснене повітря надходило в транспортуючу трубку імпульсами заданої частоти, формуючи нестационарний пульсуючий потік.

Транспортування сипучого матеріалу відбувалося за рахунок взаємодії повітряного потоку з частинками цементу в сифонній трубці, після чого

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Датум

ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Лист
44

повітряно-матеріальна суміш переміщувалася по транспортуючому трубопроводу до приймального посуду. Осілий матеріал накопичувався в приймальному посуді, а повітря очищалося фільтром і відводилося в атмосферу.

Кількість переміщеного матеріалу визначалася методом зважування приймального посуду після кожного експериментального циклу. Для кожного значення частоти пульсацій дослід повторювався за незмінних значень середнього тиску, довжини трубопроводу та геометричних параметрів системи. Це дозволяло встановити залежність маси транспортованого цементу від частоти пульсацій повітряного потоку.

Дослідження резонансних режимів складалося із зміни пульсації подачі повітря в перфоровану трубку яка розміщувалася в трубопроводі на ділянці довжиною 1 м.

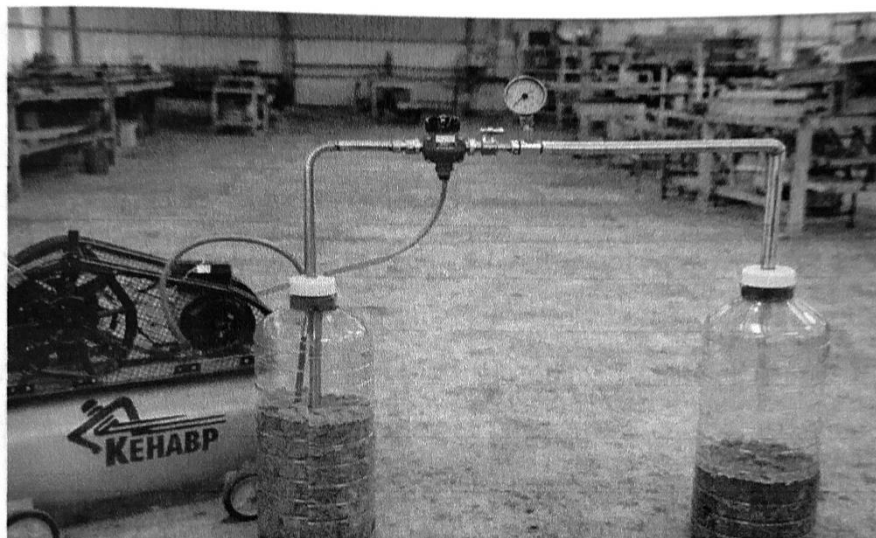


Рисунок 3.4 – Дослідна установка

Частота пульсацій змінювалася у широкому діапазоні (від одиниць герц до десятків герц), що дозволяло виявити області зростання ефективності транспортування. Особлива увага приділялася режимам, за яких спостерігалось різке збільшення кількості переміщеного матеріалу за незмінних енергетичних витрат. Такі режими ідентифікувалися як резонансні,

оскільки вони відповідали частотам, близьким до власних частот системи «повітряний потік – сипучий матеріал – трубопровід».

Дослідження проводилися на лабораторній установці пневматичного транспортування цементу з пульсаційною подачею стисненого повітря, змонтованій відповідно до схеми на рис. 3.3. Як сипучий матеріал використовували цемент масою 4 кг, який завантажували в резервуар об'ємом 6 л (пластикові баклажка). Транспортування здійснювали по магістралі внутрішнім діаметром 20 мм, у якій додатково розміщувалася перфорована трубка діаметром 4 мм. На перфорованій трубці виконано 50 отворів діаметром 1 мм, розташованих рівномірно з кроком 400 мм, що забезпечувало підживлення потоку повітрям уздовж магістралі та стабілізацію руху повітряно-матеріальної суміші.

Перед початком кожної серії випробувань установку перевіряли на герметичність, після чого під'єднували компресор та встановлювали сталий робочий режим подачі повітря за допомогою крана й редуктора (за наявності) з контролем тиску манометром. Для формування керованих пульсацій повітряного потоку в лінії подачі застосовували електромагнітний клапан, який періодично відкривав і закривав газовий канал, створюючи імпульсний режим витрати. Частоту спрацювання електромагнітного клапана задавали дискретно та послідовно змінювали у діапазоні 1–5 Гц (1, 2, 3, 4 і 5 Гц). Для кожного значення частоти проводили окремий цикл транспортування тривалістю 60 с за незмінних умов експерименту (початкова маса цементу, геометрія магістралі, конфігурація перфорованої трубки, схема вивантаження та положення регулювальних елементів).

Після запуску системи стиснене повітря надходило в резервуар через повітроподаючу трубку, а захоплення та подача цементу в магістраль відбувалися через сифонну трубку. У транспортуючій магістралі формувалася нестационарний повітряно-матеріальний потік, характеристики якого визначалися частотою пульсацій. На виході магістралі матеріал осідав у

						ГМіМ.601мММ.011-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата			46

приймальному бункері, тоді як повітря відводилося через фільтр, що запобігало запиленню робочої зони. У процесі випробування контролювали стабільність роботи установки та фіксували характер руху суміші (рівномірний рух, пробковий/гребеневий режим, ознаки осідання або схильність до формування заторів), оскільки ці прояви є критичними для оцінки ефективності пульсаційної подачі повітря.

Результати досліджень було занесено в таблицю 3.1. та таблицю 3.2.

Таблиця 3.1 – Результати досліджень

Частота пульсацій f, Гц	m ₁ , кг	m ₂ , кг	m ₃ , кг	m ₄ , кг	m ₅ , кг	\bar{m} (середнє), кг
1	1,22	1,28	1,33	1,38	1,29	1,30
2	2,48	2,61	2,70	2,82	2,64	2,65
3	2,05	2,18	2,24	2,33	2,20	2,20
4	1,44	1,53	1,58	1,66	1,54	1,55
5	1,02	1,09	1,12	1,18	1,09	1,10

Таблиця 3.2 – Результати досліджень транспортування пневматичною системою цементу

f, Гц	Маса переміщеного цементу за 60 с, m, кг	Частка від загальної маси, m/m ₀ , %	Середні втрати тиску, Δp, кПа
1	1,30	32,5	18
2	2,65	66,3	14
3	2,20	55,0	15
4	1,55	38,8	17
5	1,10	27,5	19

На рисунку 3.5 зображено графічні залежності продуктивності від частоти пульсації.

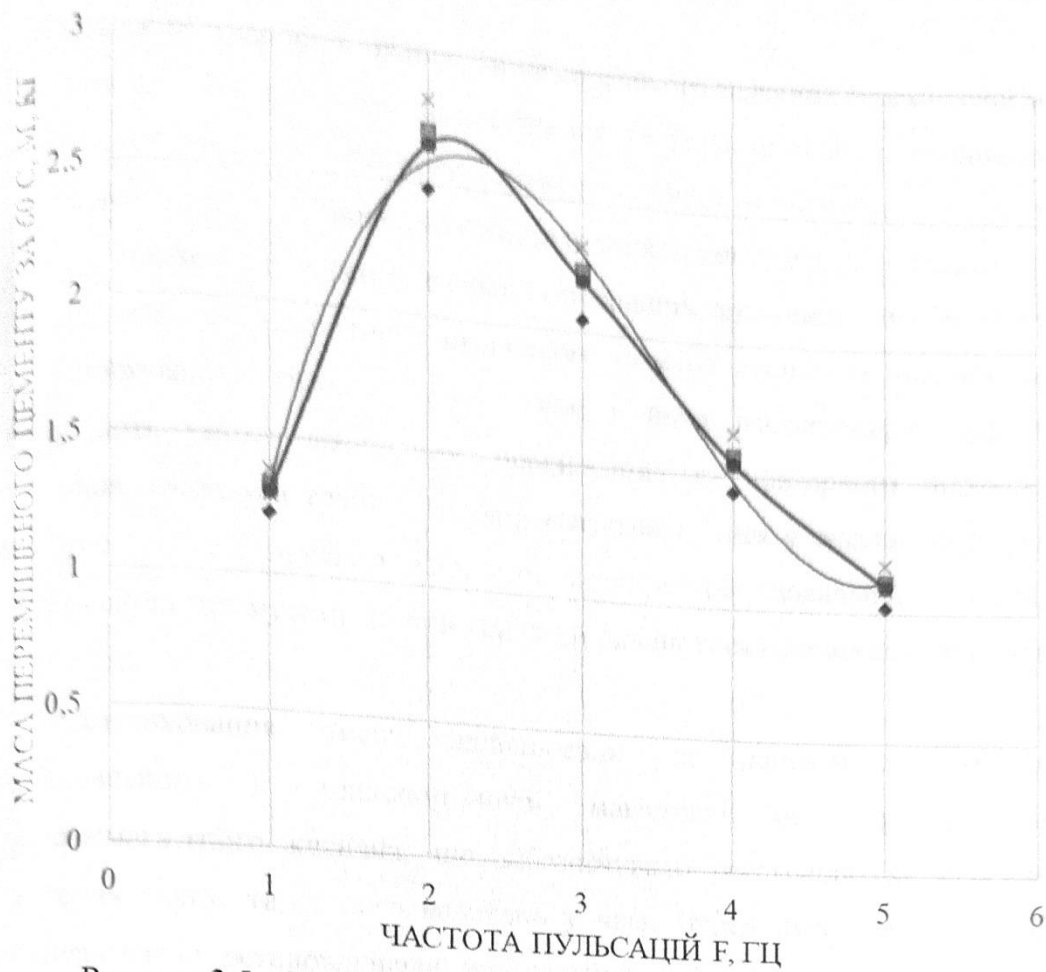


Рисунок 3.5 – Графік залежності продуктивності від частоти пульсації.

Кількість переміщеного цементу визначали методом зважування: після завершення 60-секундного циклу приймальний бункер з матеріалом зважували, а отримане значення маси фіксували як результат поточного вимірювання. Для забезпечення відтворюваності експерименту кожне значення частоти пульсації відпрацьовували у п'яти повтореннях, причому розкид результатів не перевищував 7–10 %, що відповідає вимогам до лабораторних досліджень процесів пневмотранспорту сипучих матеріалів. За результатами п'яти вимірювань для кожної частоти обчислювали середнє значення маси переміщеного цементу, яке надалі використовували для побудови графічних залежностей та аналізу резонансних режимів

інтенсифікації транспортування. Зміна середнього значення переміщеної маси при переході між частотами дозволяла ідентифікувати область максимальної ефективності пульсаційної подачі повітря та зробити висновки щодо впливу резонансних явищ на процес транспортування цементу в трубопроводі.

У процесі проведення експериментальних досліджень особлива увага приділялася контролю тиску стисненого повітря в системі пневматичного транспортування, оскільки саме тиск і його нестационарні коливання визначають умови захоплення, перенесення та повторного підхоплення частинок цементу в транспортуючій магістралі. Тиск у системі формувався компресором і регулювався за допомогою запірно-регулювальної арматури, що дозволяло підтримувати сталий середній рівень тиску незалежно від частоти пульсацій.

Вимірювання тиску здійснювали за допомогою манометра, встановленого в транспортуючій магістралі безпосередньо після електромагнітного клапана, що забезпечувало реєстрацію як середнього значення тиску, так і його коливань у часі. Перед початком кожної серії експериментів встановлювали номінальний робочий тиск у системі, який підтримувався на рівні $p_{ср} = 0,18 - 0,22$ МПа, що відповідає типовим умовам пневматичного транспортування цементу в промислових установках малої та середньої продуктивності. У ході досліджень значення середнього тиску залишалося незмінним, а змінювалася лише частота пульсацій повітряного потоку.

Пульсаційний режим подачі повітря призводив до періодичних коливань тиску в магістралі, амплітуда яких зростала зі збільшенням частоти спрацювання електромагнітного клапана. При цьому встановлено, що в діапазоні частот 2–3 Гц коливання тиску мають найбільш сприятливий характер для інтенсифікації процесу транспортування: відбувається ефективно руйнування локальних скупчень та початкових цементних пробок, зменшується товщина осілих шарів матеріалу на нижній стінці трубопроводу

та знижується гідравлічний опір потоку. За частот пульсацій 4–5 Гц спостерігалось зростання втрат тиску та менш стійкий характер руху повітряно-матеріальної суміші, що пояснюється підвищеними енергетичними втратами на формування високочастотних імпульсів.

В подальшому можна використовувати прозору трубку для додаткового візуального контролю руху матеріалу в транспортуючій трубі, що дозволить фіксувати зміну структури потоку — перехід від гребеневої або пробкової форми переміщення до більш рівномірного режиму без утворення заторів.

Запропонована експериментальна установка та методика дослідження дозволяють комплексно оцінити вплив пульсаційної подачі повітря на процес пневматичного транспортування цементу та встановити умови виникнення резонансного ефекту інтенсифікації транспортування сипучого матеріалу.

Висновки до розділу 3.

Проведено експериментальні дослідження пневматичного транспортування цементу за умов пульсаційної подачі повітря та встановлено характер впливу частоти пульсацій на ефективність процесу. Показано, що в системі «повітряний потік – трубопровід – сипучий матеріал» існує діапазон резонансних частот, у межах якого спостерігається інтенсифікація транспортування та зменшення втрат тиску. Експериментально підтверджено, що застосування пульсаційної подачі повітря сприяє руйнуванню локальних заторів і пробок із осілого цементу та стабілізації руху повітряно-матеріальної суміші. Отримані результати обґрунтовують доцільність використання резонансних режимів як ефективного засобу підвищення надійності та продуктивності пневматичних систем транспортування цементу.

						ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата			50

Розділ 4 Впровадження, експлуатація та оцінка ефективності модернізованої системи пневматичного транспортування цементу

4.1 Монтаж модернізованого обладнання

Монтаж модернізованої системи пневматичного транспортування цементу з пульсаційною подачею повітря виконується на базі існуючої трубопровідної магістралі та допоміжного обладнання без необхідності повної реконструкції установки. Запропонований підхід модернізації орієнтований на мінімізацію простоїв виробництва, зменшення обсягу будівельно-монтажних робіт та збереження основних конструктивних елементів діючої системи пневмотранспорту.

Перед початком монтажу проводиться комплекс підготовчих заходів, що включає технічне обстеження трубопровідної магістралі, перевірку її геометричних параметрів, стану зварних та фланцевих з'єднань, а також оцінку зносу внутрішніх поверхонь труб. Особлива увага приділяється ділянкам з найбільшою ймовірністю утворення цементних заторів — горизонтальним та похилим відріzkам, зонам зміни напрямку потоку, а також місцям приєднання бункерів і живильників. За результатами обстеження виконується очищення внутрішньої поверхні трубопроводів від залишків цементу, налипань і відкладень, що є обов'язковою умовою коректної роботи модернізованої системи.

Ключовим елементом модернізації є встановлення перфорованої трубки всередині основної транспортуючої магістралі. Монтаж перфорованої трубки здійснюється коаксіально відносно внутрішньої поверхні трубопроводу з використанням дистанційних фіксуючих елементів, які забезпечують рівномірний кільцевий зазор по всій довжині магістралі.

ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ									
Зм.	Лис	№ докум.	Підп.	Дат	Впровадження, експлуатація та оцінка ефективності модернізованої системи пневматичного	Літ.	Лист	Листів	
Розроб.	Мормуль		<i>[підпис]</i>	12.01		Н		51	
Перев.	Васильєв		<i>[підпис]</i>	12.01					
Керівник									
Н. контр.	Васильєв		<i>[підпис]</i>	12.01					
Затв.	Орисенко		<i>[підпис]</i>	12.01					
						Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»			

Така схема монтажу дозволяє реалізувати рівномірний розподіл повітря через перфорацію, зменшити локальні зони застою та створити сприятливі умови для повторного підхоплення осілих частинок цементу. Отвори перфорованої трубки орієнтуються вздовж напрямку транспортування матеріалу, що знижує гідравлічні втрати та запобігає локальному зворотному руху повітря.

Наступним етапом монтажу є інтеграція електромагнітного клапана в систему подачі стисненого повітря. Клапан встановлюється на прямолінійній ділянці повітропроводу перед входом у транспортуючу магістраль або безпосередньо перед вузлом підживлення перфорованої трубки. Монтаж виконується з дотриманням вимог виробника щодо просторової орієнтації, довжин прямих ділянок до та після клапана, а також герметичності різьбових або фланцевих з'єднань. Для зменшення вібраційних навантажень і шуму електромагнітний клапан встановлюється з використанням демпфувальних прокладок або гнучких з'єднувальних елементів.

Електричне підключення електромагнітного клапана здійснюється до генератора імпульсів або програмованого контролера, що забезпечує формування пульсацій заданої частоти та тривалості. Кабельні траси прокладаються у захисних коробах або гофрованих трубах з дотриманням вимог електробезпеки та промислових стандартів. Перед введенням в експлуатацію проводиться перевірка правильності підключення, функціонування клапана у статичному режимі та його працездатності при зміні частоти керуючих імпульсів.

Важливою складовою модернізації є встановлення гнучких ділянок трубопроводу в місцях, де найбільш імовірно утворення цементних пробок. Гнучкі вставки виконуються з гумотканинних або полімерних матеріалів, стійких до абразивного зносу та впливу цементного пилу. Монтаж гнучких елементів здійснюється між жорсткими сталевими ділянками магістралі за допомогою фланцевих або хомутових з'єднань, що дозволяє легко

						ГМiM.601mMM.011-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата			52

демонтувати вставки у разі необхідності технічного обслуговування. Наявність гнучких ділянок створює можливість реалізації додаткових механічних коливань або ударних впливів на магістраль для руйнування локальних цементних заторів без повної зупинки системи.

Після завершення монтажу основних елементів модернізації виконується встановлення контрольно-вимірювальних приладів. Манометри монтуються у характерних точках системи — перед електромагнітним клапаном, після нього та на виході транспортуючої магістралі. Це дозволяє контролювати середній тиск, амплітуду пульсацій і втрати тиску по довжині трубопроводу. Усі прилади перевіряються на працездатність та, за необхідності, проходять калібрування.

Пусконаладжувальні роботи виконуються у декілька етапів. На першому етапі система запускається у режимі транспортування без матеріалу з мінімальною частотою пульсацій для перевірки герметичності та стабільності роботи обладнання. На другому етапі здійснюється пробний пуск з подачею цементу при зниженій продуктивності та поступовим підвищенням частоти пульсацій до робочого діапазону. Особлива увага приділяється контролю тиску, характеру руху матеріалу та відсутності нештатних вібрацій.

Заключним етапом монтажу є оптимізація режимів роботи модернізованої системи. На основі експериментальних даних, отриманих у розділі 3, встановлюються рекомендовані значення частоти пульсацій, за яких досягається максимальна ефективність транспортування цементу та мінімальні втрати тиску. Параметри фіксуються у технологічній документації, а персонал проходить інструктаж щодо особливостей експлуатації модернізованої системи.

4.2. Експлуатація та обслуговування модернізованої системи

Експлуатація модернізованої системи пневматичного транспортування цементу з пульсаційною подачею повітря здійснюється відповідно до

						ГМіМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата			53

загальних вимог до пневмотранспортних установок з урахуванням специфіки нестационарних режимів роботи. Основною умовою надійної та ефективної експлуатації є підтримання стабільного середнього тиску в системі при одночасному керуванні частотою пульсацій повітряного потоку, що дозволяє реалізувати резонансні режими інтенсифікації транспортування.

Перед початком роботи виконується обов'язковий огляд обладнання, під час якого перевіряється технічний стан компресора, повітропроводів, електромагнітного клапана, перфорованої трубки та гнучких вставок магістралі. Особливу увагу приділяють герметичності з'єднань і відсутності залишків цементу у критичних зонах, що можуть призвести до початкового осідання матеріалу. Після цього система запускається у холостому режимі без подачі цементу, що дозволяє перевірити коректність роботи пульсатора, стабільність тиску та відсутність нештатних вібрацій.

У робочому режимі експлуатації середній тиск повітря в системі підтримується на рівні, рекомендованому за результатами експериментальних досліджень, тоді як частота пульсацій встановлюється в оптимальному діапазоні, як правило, близькому до резонансного (2–3 Гц). Такий режим забезпечує ефективне підхоплення цементу, зменшення ймовірності утворення осілих шарів на нижній поверхні трубопроводу та стабілізацію руху повітряно-матеріальної суміші. Зміна частоти пульсацій допускається лише у межах, визначених технологічною картою, та здійснюється плавно з постійним контролем тиску і характеру руху матеріалу.

Під час експлуатації системи оператор повинен контролювати показники манометрів, звертаючи увагу на появу надмірних коливань тиску або його поступове зростання, що може свідчити про початок утворення цементних заторів. У таких випадках допускається короткочасна зміна режиму роботи — збільшення амплітуди або частоти пульсацій, що сприяє руйнуванню локальних скупчень матеріалу. Додатково може застосовуватися механічний вплив на гнучкі ділянки магістралі у вигляді контрольованих коливань або

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГМіМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Лист

54

ударів, які дозволяють ліквідувати пробки без повної зупинки процесу транспортування.

Технічне обслуговування модернізованої системи здійснюється за планово-попереджувальним принципом і включає регулярні огляди, очищення та профілактичні роботи. Електромагнітний клапан підлягає періодичній перевірці на справність та швидкодію, оскільки зниження частоти або неповне відкривання прохідного каналу може призвести до спотворення пульсаційного режиму. Перфорована трубка очищується від можливих засмічень отворів, що особливо важливо при транспортуванні цементу з підвищеною вологістю або наявністю дрібнодисперсних домішок.

Гнучкі вставки магістралі перевіряються на наявність тріщин, ознак абразивного зносу та втрати пружних властивостей. У разі виявлення дефектів такі елементи підлягають своєчасній заміні, оскільки їхній стан безпосередньо впливає на ефективність механічного руйнування цементних пробок. Фільтрувальні елементи системи очищення повітря регулярно очищуються або замінюються з метою запобігання підвищенню гідравлічного опору та викидам цементного пилу в навколишнє середовище.

Особливістю експлуатації модернізованої системи є можливість адаптації режимів роботи до змін властивостей транспортуемого матеріалу. За підвищення вологості цементу або зміни його гранулометричного складу рекомендується коригування частоти пульсацій і середнього тиску повітря, що дозволяє зберегти стабільність транспортування без істотного збільшення енерговитрат. Такий підхід забезпечує гнучкість експлуатації та підвищує загальну надійність пневмотранспортної системи.

4.3. Охорона праці і промислова безпека

Експлуатація систем пневматичного транспортування цементу належить до категорії виробничих процесів із підвищеною небезпекою, що зумовлено

						ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата			55

кількості стисненого повітря, димних потоків випучого матеріалу, підвищеної запиленості, шумовим навантаженням, а також використанням електричного та компресорного обладнання. У зв'язку з цим питання охорони праці та промислової безпеки при впровадженні модернізованої системи з пневматичною подачею повітря є одним із ключових аспектів її практичного застосування.

Загальні вимоги з охорони праці при експлуатації пневмотранспортних установок регламентуються чинними нормативними документами, зокрема правилами безпечної експлуатації обладнання, що працює під тиском, санітарними нормами допустимих концентрацій пилу в повітрі робочої зони, а також нормами щодо рівнів шуму та вібрації на робочих місцях. До обслуговування установки допускається лише персонал, який пройшов відповідне навчання, вступний і первинний інструктажі з охорони праці, а також перевірку знань з питань безпечної експлуатації пневматичного та електричного обладнання.

4.3.1 Запиленість повітря та заходи захисту

Цементний пил належить до дрібнодисперсних аерозолів мінерального походження, тривала дія яких негативно впливає на органи дихання, слизові оболонки та шкіру працівників. Під час роботи пневмотранспортних систем джерелами утворення пилу є місця розвантаження матеріалу, нещільності трубопроводів, вузли з'єднань, а також фільтрувальні елементи при відведенні повітря з системи.

У модернізованій системі пневматичного транспортування цементу передбачено комплекс технічних заходів, спрямованих на зниження рівня запиленості. До них належать герметизація з'єднань трубопроводів, застосування картриджних або рукавних фільтрів для очищення відпрацьованого повітря, а також використання перфорованої магістралі, що

сприяє більш рівномірному розподілу повітряного потоку та зменшенню виносу пилу.

Робочі місця повинні бути обладнані загальнообмінною та, за необхідності, місцевою витяжною вентиляцією. Концентрація цементного пилу в повітрі робочої зони не повинна перевищувати гранично допустимих значень, встановлених санітарними нормами. Для персоналу обов'язковим є використання засобів індивідуального захисту органів дихання (фільтрувальні респіратори), захисних окулярів та спеціального одягу, що запобігає контакту пилу зі шкірою.

4.3.2 Небезпека, пов'язана з роботою під тиском

Пневматичні системи транспортування цементу працюють з використанням стисненого повітря, що створює потенційну небезпеку у разі розгерметизації трубопроводів або відмови елементів системи. У модернізованій установці середній робочий тиск підтримується на рівні, що не перевищує допустимі значення для трубопровідної арматури та допоміжного обладнання, однак наявність пульсаційної подачі повітря зумовлює виникнення динамічних коливань тиску.

З метою забезпечення безпечної експлуатації всі елементи системи, що працюють під тиском, повинні бути розраховані на максимальні можливі навантаження з урахуванням пульсаційного режиму. Перед введенням установки в експлуатацію проводяться випробування на герметичність та міцність, а під час роботи здійснюється постійний контроль тиску за допомогою манометрів. Забороняється експлуатація системи при несправних або відсутніх контрольно-вимірювальних приладах.

Будь-які ремонтні або монтажні роботи дозволяється виконувати лише після повного скидання тиску в системі та відключення компресорного обладнання від джерел живлення. Особливу увагу необхідно приділяти стану

					ГМіМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		57

гнучких вставок магістралі, оскільки їх пошкодження може призвести до раптового викиду повітря і цементу.

4.3.3 Шум і вібрація

Джерелами шуму в пневмотранспортних установках є компресори, повітродувки, електромагнітні клапани, а також турбулентні потоки повітря в трубопроводах. Додаткове шумове навантаження в модернізованій системі може створюватися внаслідок пульсаційної подачі повітря, особливо за підвищених частот роботи електромагнітного клапана.

Для зниження рівня шуму компресорне обладнання рекомендується розміщувати в окремих приміщеннях або шумозахисних кожухах. Повітропроводи та магістралі закріплюються на опорах із віброізоляційними елементами, що зменшує передачу коливань на будівельні конструкції. Рівень шуму на робочих місцях не повинен перевищувати встановлених нормативних значень, а у разі їх перевищення персонал забезпечується засобами індивідуального захисту органів слуху (навушники, вкладиші).

Електробезпека та організаційні заходи

Електромагнітні клапани, генератори імпульсів, компресори та контрольно-вимірювальні прилади є електричними споживачами, що вимагає дотримання правил електробезпеки. Усі електричні елементи повинні мати надійне заземлення, а електрощити — бути захищеними від пилу та вологи. Технічне обслуговування електрообладнання дозволяється проводити лише кваліфікованому персоналу з відповідною групою допуску.

Важливою складовою охорони праці є організація робочих місць, розроблення інструкцій з безпечної експлуатації модернізованої системи, а також регулярне проведення навчання та повторних інструктажів для персоналу. Дотримання організаційних і технічних заходів дозволяє мінімізувати ризик аварійних ситуацій і забезпечити стабільну та безпечну

роботу пневмотранспортної установки.

Висновки до розділу 4.

Розглянуто питання практичного впровадження модернізованої системи пневматичного транспортування цементу з пульсаційною подачею повітря, зокрема особливості монтажу, експлуатації та технічного обслуговування обладнання. Показано, що запропоновані конструктивні рішення не потребують суттєвої реконструкції існуючих магістралей і можуть бути реалізовані з мінімальними капітальними витратами. Проаналізовано основні вимоги з охорони праці та промислової безпеки з урахуванням впливу пилу, тиску та шуму, що забезпечує безпечну експлуатацію установки. Виконане техніко-економічне обґрунтування підтверджує доцільність модернізації та ефективність її впровадження у промислових умовах.

					ГМіМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		59

Висновки

У роботі виконано комплексне дослідження процесу пневматичного транспортування цементу в трубопроводах пневматичних систем з урахуванням нестаціонарного характеру руху повітряно-матеріального потоку та впливу пульсацій подачі повітря на ефективність транспортування.

На основі аналізу сучасних конструкцій і режимів роботи пневмотранспортних установок встановлено, що пульсації повітряного потоку є однією з основних причин нестабільності транспортування, утворення цементних заторів і зростання втрат тиску в магістралях, але за певних умов можуть бути використані як фактор інтенсифікації процесу.

У теоретичній частині роботи проаналізовано основні рівняння газової динаміки та втрати тиску при русі стисливого повітря в трубопроводах і показано можливість виникнення хвильових і резонансних явищ у пневматичних системах за нестаціонарних режимів подачі повітря.

Експериментально досліджено процес транспортування цементу за умов пульсаційної подачі повітря та встановлено наявність резонансного діапазону частот, у межах якого спостерігається максимальна маса переміщеного матеріалу та зниження середніх втрат тиску в системі.

Показано, що застосування пульсаційної подачі повітря у поєднанні з перфорованою магістраллю та гнучкими ділянками трубопроводу сприяє ефективному руйнуванню локальних цементних пробок, стабілізації руху повітряно-матеріальної суміші та підвищенню надійності роботи пневмотранспортної системи.

Розроблено та обґрунтовано конструктивні й технологічні рішення з модернізації існуючих систем пневматичного транспортування цементу, які

ГМіМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат	Літ.	Лист	Листів
Розроб.		Мормуль	<i>[підпис]</i>	12.01	Н		
Перев.		Васильєв	<i>[підпис]</i>	12.01			
Керівн.							
Н. контр.		Васильєв	<i>[підпис]</i>	12.01			
Затв.		Орисенко	<i>[підпис]</i>	12.01			

Висновки

Національний університет
«Полтавська політехніка
імені Юрія Кондратюка»

можуть бути впроваджені без суттєвої реконструкції обладнання та з мінімальними капітальними витратами.

Проаналізовано умови безпечної експлуатації модернізованої системи з урахуванням впливу цементного пилу, стисненого повітря та шуму, що дозволяє забезпечити дотримання вимог охорони праці та промислової безпеки.

Виконане техніко-економічне обґрунтування підтвердило доцільність впровадження запропонованої модернізації, оскільки її застосування забезпечує підвищення продуктивності пневматичного транспортування цементу, зменшення простоїв обладнання та зниження питомих енерговитрат у промислових умовах.

					ГМіМ.601мММ.011-00.00.000 ПЗ	Лист
						61
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Список літератури

1. Дацишин О. В. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв / За редакцією О. В. Дацишина. Навчальний посібник. / О. В. Дацишин, А. І. Ткачук, О. В. Гвоздев та ін. – Вінниця: Нова Книга, 2008. – 488с.
2. Бондарев В. С. Підйомно-транспортні машини. Розрахунки підйомальних і транспортувальних машин : підручник для ВУЗів. / В. С. Бондарев, О. І. Дубинець, М. П. Колісник та інші – Київ : Вища школа, 2009. – 322 с.
3. Скалецька Л.Ф. Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва: Практикум: Напч.посібник / Л.Ф.Скалецька, Т.М.Духовська, А.М. Сеньков. -К.: Вища школа, 1994.-301с.
4. Рунова Р.Ф., Троян В.В. Інноваційні методи транспортування цементу.Науково-технічний журнал "Будівництво, матеріалознавство,машинобудування". 2020. №118. С. 55-59
5. Дворкін Л.Й. Транспортування цементу : навч. посіб. Рівне : НУВГП,2018. 120 с.
6. Будівельна техніка : підручник / В. П. Палій, І. М. Малик та ін. ; за ред. В. П. Палія. Київ : Либідь, 2009. 432 с.
7. Транспортні системи електромеханічних комплексів: Конспект лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С.В. Зайченко, В.А. Побігайло, В.Г. Дубовик (1 файл: Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 136 с.
8. Установки пневматичні для розвантаження –
<https://to.ferna.v.ua/articles/ustanovki-pnevmatichni-dlja-rozvantazhennja.html>

ГМiM.601mMM.011-00.00.000 ПЗ				
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дат
Розроб.		Мормуль	<i>[Signature]</i>	12.01
Перев.		Васильєв	<i>[Signature]</i>	12.01
Керівн.				
Н. контр.		Васильєв	<i>[Signature]</i>	12.01
Затв.		Орисенко	<i>[Signature]</i>	12.01
Список літератури				
Літ.				
Лист				
Листів				
Н				
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»				

9. Pneumatic Conveying: Types, Designs and Considerations – <https://www.iqsdirectory.com/articles/pneumatic-conveyor.html>
10. An Introduction to Pneumatic Conveying – <https://bulkininside.com/bulk-solids-handling/pneumatic-conveying/an-introduction-to-pneumatic-conveying/>
11. Pneumatic Conveying Guide – <https://unitedstatessystems.com/pneumatic-conveying-guide/>
12. Transportation boundaries for horizontal slug-flow pneumatic conveying / D. Hastie et al. *Handbook of Powder Technology*. 2001. P. 379–386. URL: [https://doi.org/10.1016/s0167-3785\(01\)80039-7](https://doi.org/10.1016/s0167-3785(01)80039-7)
13. Deng T., Bradley M. S. A. Determination of a particle size distribution criterion for predicting dense phase pneumatic conveying behaviour of granular and powder materials. *Powder Technology*. 2016. Vol. 304. P. 32–40. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.05.001>
14. Fox ejectors for solids – <https://www.spraybest.nl/en/products/fox-venturi-products/fox-liquid-solid-slurry-ejectors/fox-ejectors-for-solids/>
15. Samoilenko, A., Kulik A., & Kramarenko, O. (2024). TRANSPORTATION OF CEMENT: METHODS AND THEIR ADVANTAGES. *SWorld-Ger Conference Proceedings*, 1(gec33-00), 3–10. <https://doi.org/10.30890/2709-1783.2024-33-00-07>
16. Гущин, В.М. Нова концепція та її реалізація в розробках високоефективних засобів пневматичного транспортування сипучих матеріалів/ В.М. Гущин// *Машинознавство*, 2000, №2(23). – С.39-43.
17. Коваленко В. О. Особливості застосування пневмокамерних насосів для переміщення високоабразивних будівельних сумішей. *Промислове будівництво та інженерні споруди*. 2021. № 2. С. 14–19.
18. Плашихин С.В. Експериментальні дослідження циклофільтра в

процесі вловлювання цементного пилу / С.В. Плашихин, Д.А. Серебрянський, Ю.А. Безносик // Вісник Національного технічного університету "ХПІ" : зб. наук. праць. – Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків : Вид-во НТУ "ХПІ". – 2010. – № 57. – С. 3-5

19. Закон України «Про охорону праці» // (ВВР), 1992, № 49, ст.668). – 2022. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12#Text>.

20. Порубченко В.М. «Основні способи очищення відходних газів від пилу на цементних заводах». Вісник Вінницького політехнічного інституту, 2017. С. 105-109.

21. Качура А. О. Конспект лекцій з дисципліни «Механізація та автоматизація будівництва і ремонтно-будівельних робіт» (для студентів 4 курсу денної і 5 курсу заочної форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня бакалавр, напряму 0921 (6.060101) «Будівництво» спеціальності «Міське будівництво і господарство»). / А. О. Качура, О. М. Болотських; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; – Х.: ХНАМГ, 2010. - 136 с

22. Суєтіна Т. А. Системи пневматичного транспортування цементу та інших дрібнодисперсних матеріалів з мінімальним енергоспоживанням. *Журнал фундаментальних та прикладних наук*. 2018. Вип. 9, № 7S. С. 425–436

					ГМІМ.601МММ.011-00.00.000 ПЗ	Лист
						64
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		