

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Інститут (факультет ) \_\_\_\_\_ ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого  
Кафедра \_\_\_\_\_ мехатроніки та пакувальної техніки

«До захисту в ЕК»  
Директор інституту(декан факультету)  
\_\_\_\_\_  
(підпис) Блаженко С.І.  
(прізвище та ініціали)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021р.

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_  
(підпис) Соколенко А.І.  
(прізвище та ініціали)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2021р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**НА ЗДОБУТТЯ ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА**

зі спеціальності \_\_\_\_\_ 131 Прикладна механіка  
(код та назва спеціальності)

освітньо-професійної програми \_\_\_\_\_ Прикладна механіка

на тему: \_\_\_\_\_ Практичні аспекти пневмотранспортування сипких харчових продуктів

Виконав: здобувач \_\_2\_\_ курсу, групи 3М

\_\_\_\_\_ Чепур Максим Сергійович \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові повністю) (підпис)

Керівник \_\_\_\_\_ Кривопляс-Володіна Людмила Олександрівна \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я та по батькові повністю) (підпис)

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

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (підпис)

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

Засвідчую, що в цій кваліфікаційній роботі немає запозичень із праць інших авторів без відповідних посилань.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2021 р.

# НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Інститут (факультет) ННІТІ ім. акад. І.С. Гулого

Кафедри Мехатроніки та пакувальної техніки

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 131 Прикладна механіка  
(код і назва)

Освітньо-професійна програма Прикладна механіка  
(назва)

## ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МПТ

Соколенко А.І.

“05” листопада 2021 року

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Чепур Максим Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Практичні аспекти пневмотранспортування сипких харчових продуктів»

керівник роботи Кривопляс-Володіна Людмила Олександрівна, д.т.н, проф.,

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

затвержені наказом закладу вищої освіти від “05” листопада 2021 року № 925-кв

2. Строк подання здобувачем роботи 2.02.2021

3. Вихідні дані до роботи пневмотранспортні системи, системи деструкції, обмеження тиску до 10 Бар, керування за допомогою слідкувальних систем (4..20 мА або 0..10 В), споживана потужність не більше 5 Вт, можливість регульованих значень струму з обмеженнями 0-40% від повного діапазону

4.

Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

Реферат українською. Реферат англійською. Вступ. Розділ 1. Розділ 2. Розділ 3.

Розділ 4. Висновок. Список використаної літератури

5. Перелік графічного матеріалу

Презентація на 22 слайдах

## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 05.11.2020 р. \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Реферат українською	19.11.2020	
2.	Реферат англійською	20.11.2020	
3.	Вступ	25.11.2020	
4.	Розділ 1	31.11.2020	
5.	Розділ 2	01.12.2021	
6.	Розділ 3	14.12.2021	
7.	Розділ 4	20.12.2021	
8.	Висновок	25.12.2021	
9.	Список використаної літератури	26.12.2021	
10.	Підготовка презентації	30.12.2021	

**Здобувач**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_ (підпис)

**Чепур М.С.**

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

**Кривопляс-Володіна Л.О.**

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## ЗМІСТ

Реферат .....	5
Abstract .....	6
ВСТУП .....	7
ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ .....	8
РОЗДІЛ 1 .....	9
МЕТОДИ ПНЕВМОТРАНСПОРТУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ	9
1.1. Узагальнений огляд існуючих способів пневмотранспортування сипких харчових продуктів під час їх перероблення .....	9
1.2. Аналіз обладнання для деструкції склепів в пневмотранспорті	11
1.3. Аналіз робіт прив'язаних математичному моделюванню пневмотранспортування .....	18
1.4. Огляд методів пневмотранспортування сипких харчових продуктів та конструкцій пневмомереж продуктопроводів .....	18
1.5. Висновки до розділу 1 .....	31
РОЗДІЛ 2 .....	33
ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ ПНЕВМОПРОДУКТОПРОВОДУ ДЛЯ ДРІБНО-ШТУЧНИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ .....	33
2.1. Визначення основних компоновок та систем керування пневмотранспортуючих модулів .....	33
2.2. Опис контрольно-вимірювального обладнання.....	37
2.3. Побудова математичної моделі .....	42
2.4. Висновки до розділу 2 .....	48

РОЗДІЛ 3 .....	49
РОЗРОБЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЕСТРУКЦІЇ СКЛЕПОУТВОРЕННЯ В ПНЕВМОТРАНСПОРТІ .....	49
3.1. Аналіз процесу. Постановка задачі. ....	49
3.2. Математична модель та знаходження розрахункової області..	53
3.3. Результати математичного та фізичного моделювання процесів пневмотранспортування .....	61
3.4. Висновки до розділу 3 .....	65
РОЗДІЛ 4 .....	67
ОХОРОНА ПРАЦІ .....	67
4.1. Вимоги безпеки перед початком роботи .....	67
4.2. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях.....	68
4.3. Вимоги до персоналу .....	69
ВИСНОВКИ.....	71
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72
ДОДАТКИ.....	78

## Реферат

### Практичні аспекти пневмотранспортування сипких харчових продуктів

Пневмотранспортування сипких матеріалів різної природи широко використовується у різних технологічних операціях харчової промисловості – транспортування, змішування, дозування, фасування та ін. Найважливішими перевагами такого виду транспортування є: герметичність пневмомагістралі (продуктопроводу), екологічність, підведення продукту у важкодоступні місця, багатоваріативність керуючих систем. Однак, пневмотранспортування сипких продуктів є досить енергоємним та вразливим до вимикання електроенергії.

Дослідження пневмотранспотуючих систем під час виникнення аварійних ситуацій та розроблення рекомендацій щодо зменшення наслідків затороутворення в пневмомагістралі (продуктопроводі), процеси деструкції склепоутворення та пошук методів швидкого повернення системи в робочий стан – є *актуальними задачами*.

На підставі ознайомлення із літературними джерелами та технічними рішеннями щодо пневмотранспортування, - *об'єктом дослідження* обрано пристрій пневмопродуктопровід, система керування, пневмосопловий пристрій із використанням мембранного імпульсного клапана. *Метою* дослідження в магістерській роботі є підвищення ефективності процесу пневмотранспортування та деструкції склепоутворення, сегрегації сипких дрібно-штучних харчових продуктів у бункерах живильниках на етапі дозувально-фасувальних операцій. В результаті проведених досліджень, розроблено пристрій (експериментальний стенд) на основі пневматичної системи для підвищення коефіцієнта рівномірності розподілу сипких харчових продуктів у продуктопроводі. Теоретично досліджено процес управління критичними режимами під час пневмотранспортування на основі пропорційних елементів та керуючої системи від'ємного зворотного зв'язку. Під час проведення досліджень були використані елементи теорії ймовірності, сучасні методи математичної фізики, теоретичні моделювання та дослідження динамічних процесів для руху повітряних потоків в трубопроводі. В ході проведення експериментальних досліджень застосовувались методи математичної статистики. Практичні результати дослідження підтверджують можливість використання розробленої моделі для контролю швидкості і тиску на вході у продуктопровід.

## **Abstract**

### **Practical aspects of pneumatic transportation of bulk food products**

Pneumatic transportation of bulk materials of different nature is widely used in various technological operations of the food industry - transportation, mixing, dosing, packaging, etc. The most important advantages of this type of transportation are: tightness of the pneumatic line (product pipeline), environmental friendliness, supply of the product in hard-to-reach places, multivariate control systems. However, pneumatic transportation of bulk products is quite energy-intensive and vulnerable to power outages.

Research of pneumotransporting systems during emergencies and development of recommendations for reducing the consequences of congestion in the pneumatic line (product pipeline), the processes of destruction of basement and the search for methods to quickly return the system to working condition - are urgent tasks.

On the basis of acquaintance with literature sources and technical decisions concerning pneumotransportation, - the object of research the device of a pneumatic product pipeline, control system, the pneumatic nozzle device with use of the membrane pulse valve is chosen. The aim of the research in the master's thesis is to increase the efficiency of the process of pneumotransportation and destruction of basement formation, segregation of bulk small-piece food products in feed hoppers at the stage of dosing and packing operations. As a result of the conducted researches, the device (experimental stand) on the basis of pneumatic system for increase of coefficient of uniformity of distribution of loose foodstuff in a product pipeline is developed. The process of control of critical modes during pneumotransportation on the basis of proportional elements and control system of negative feedback is theoretically investigated. Elements of probability theory, modern methods of mathematical physics, theoretical modeling and research of dynamic processes for the movement of air flows in the pipeline were used during the research. In the course of experimental research, methods of mathematical statistics were used. The practical results of the study confirm the possibility of using the developed model to control the speed and pressure at the inlet to the product line.

## ВСТУП

Представлені теоретичні дослідження процесу пневмотранспортування та деструкції склепоутворення сипких та дрібно-штучних харчових продуктів в бункерах живильниках із застосуванням запропонованого пристрою який працює на принципі пневмосоплової системи і забезпечує безпосередній контакт струмини повітря із продуктом. Наведено результати експериментальних досліджень, які підтверджують теоретичні дослідження та дають можливість здійснити порівняння з існуючими аналогами запропонованого пристрою.

Пневмотранспорт для сипких матеріалів, як правило, складається з: живильника; систем пневмопроводів і матеріалопроводів; вивантажувачів із фільтром для повітря; компресора або повітродувної машини; приймача матеріалу або технологічної машини.

Пневмотранспорт для сипких матеріалів поділяють на наступні різновиди:

- Нагнітальні ПТС (потоково-транспортні системи);
- Вакуумні ПТС (потоково-транспортні системи).

Трубопровідний пневмотранспорт заснований на принципі переміщення будь-якого матеріалу у спеціальних магістралях, які оснащено контрольно-вимірювальними керуючими системами. Продукт, який потрібно перемістити, переганяється за допомогою спеціального очищеного стисненого повітря. Устаткування пневмотранспорта на сьогодні, знайшло застосування і в харчовій галузі, в тому числі для переміщення сировини, напівфабрикатів, готової продукції та відходів. Основні види продуктів обробки для пневмотранспортної системи поділяють як: сипкі, дрібноштучні, зернисті, пилоподібні і волокнисті матеріали. Пневмотранспорт найчастіше застосовується для виробництва борошна, цукрового піску, круп, спецій.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Мета дослідження.** Підвищення ефективності процесу пневмотранспортування та деструкції склепоутворення, сегрегації сипких дрібно-штучних харчових продуктів у бункерах живильниках на етапі дозувально-фасувальних операцій. Розроблення пристрою на основі пневматичної системи для підвищення коефіцієнта рівномірності розподілу сипких харчових продуктів у продуктопроводі.

**Об'єкт дослідження.** Пристрій пневмопродуктопровід, система керування, пневмосопловий пристрій із використанням мембранного імпульсного клапана.

**Предмет дослідження.** Закономірності, які дозволяють охарактеризувати кінематичні і динамічні процеси щодо газового середовища під час роботи запропонованих пристроїв.

**Наукова новизна** виконаних досліджень полягає у розробленні нової конструкції пристрою, суттєвому поліпшенні способу пневмотранспортування та моделі деструкції склепоутворення сипких харчових продуктів для забезпечення безперервний процес фасування; побудові параметричної моделі процесу експлуатації пристрою для багатокomпонентних сипких харчових сумішей. Огляд існуючих конструкцій та опис власної пропозиції під час дозування сипких харчових продуктів, виявив можливе склепоутворення. На утворення склепів впливають як характеристики самого продукту, їх зміна у часі, так і параметри бункерів. Запобігання склепоутворенню можливе за рахунок правильного підбору конструкції бункера і застосування зрушувачів сипких продуктів, які забезпечують підтримку матеріалу в сипучому стані. Характер витікання сипкої продукції із ємності відрізняється від характеру витікання рідини через різні закономірності розподілу тиску сипкої продукції і рідини по висоті ємності. Для оцінки ступені зміни густини сипкої продукції в живильнику необхідно знати розподіл вертикального ущільнюючого тиску по висоті ємності та співвідношення між вертикальним і боковим тиском сипкої продукції.

## РОЗДІЛ 1

### МЕТОДИ ПНЕВМОТРАНСПОРТУВАННЯ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

#### 1.1. Узагальнений огляд існуючих способів пневмотранспортування сипких харчових продуктів під час їх перероблення

Кожна група продуктів має певні властивості, тому для їх транспортування в пневматичній магістралі паливопроводом, необхідні відповідні геометрія робочих трубопроводів і режим переробки, який багато в чому залежить і від системи управління по тиску. Саме цим пояснюється наявність на ринку досить великої різноманітності пневмотранспортного обладнання. При цьому відомі випадки, коли навіть найдосконаліші пневматичні продуктопроводи при заміні виробника для однієї і тієї ж групи дрібноштучних продуктів, перестають забезпечувати необхідну продуктивність транспортування. Тому моделювання процесів пневмотранспортних установок протягом багатьох десятиліть приділяється значна увага [5].

Застосування емпіричних методик [7,9, 16, 19, 20] не може забезпечити повного розрахунку установок, включаючи зміну показників двокомпонентного потоку при різних режимах роботи установки. При використанні ж самого загального теоретичного опису процесу пневмотранспортуванні [1,4,5,8] виходить складна система рівнянь в диференціальної формі, пряме рішення є важким, крім цього аналітично описати такі процеси, як взаємодія частинок при транспортуванні між собою і зі стінками каналу досить трудомістким. Тому, фізичне моделювання [20] допомагає у вирішенні складних завдань такого виду.

Так, в одній з робіт, присвячених процесу переробки зерна в пневмотранспортній системі [4], крім кількісної ілюстрації процесу транспортування, описані режими перепаду тисків між входом і виходом продуктопроводу, а також вплив абразивного зносу трубопроводу і проточних елементів моделі. Також розглянута технологія пневмотранспорту, побудована

на використанні стандартного устаткування с джерелом стисненого повітря - серійний дотискній компресор [5]. При цьому в розімкнутої і замкнутої моделі не враховується наявність критичної швидкості на вертикальних ділянках робочого каналу. У роботах [6,7] також розглянута універсальна залежність Зенза в логарифмічною шкалою для випадку транспортування суміші. Експерименти проведені для таких матеріалів як пшениця, висівки, гранульовані дріжджі - підтвердили загальну закономірність режиму пневмотранспортування. Необхідна швидкість руху повітря в 1,5..1,8 раз виявилася вище розрахункової [8]. Це має суттєве значення для розрахунку продуктивності, загальної витрати енергії стисненого повітря та стабільності подачі продукту, але такий підхід може призвести до суттєвих помилок.

В роботі [9] запропонована математична модель модель двофазного течії сипучого середовища в нагнітальному пневмопроводів. Враховано звуження, розширення, повороти пневмотрасси за рахунок різного виду коефіцієнтів гідравлічного опору. Експерименти і чисельні розрахунки за запропонованою математичної моделі показали типове з розподілу швидкостей переносу маси часток і тиску уздовж траси. Однак частка балу прийнята як матеріальна точка, без урахування змін навколишнього середовища. В роботі [10] розглядається освіту склепінь (заторів) сипучих продуктів у вигнутих ділянках пневмомагістрали з використанням ейлерову-лагранжевого підходу. Однак процес розглянуто без урахування зміни тиску при безперервному транспортуванні на ділянках скупчення матеріалу. Аналогічні недоліки властиві й роботі [11].

Робота [12] присвячена як математичного, так і експериментальному дослідженню процесу транспортування дрібно-штучних продуктів в пневматичному транспорті. При цьому показано, що між теоретичними і досвідченими даними є досить велика розбіжність, обговорюються точність і обмеження методу твердотільного моделювання DPM, використаного в цій статті. Існує певний розрив між результатами моделювання і реальним експериментом, тому що форма частинки не враховується, а сили частинок

засновані на існуючих теоріях, які виходять від матеріальної точки. В роботі [13] запропоновано новий підхід до математичного моделювання процесу з елементами пневмопривода, але не враховані особливості керуючої системи з контрольованою зворотним зв'язком. В [14] не враховано енергетичні складові під час зіткнення частинки зі стінкою і частки з частинками, які більш інтенсивні в нагнітальному трубопроводі. Розглянуто в більшій частині дослідження тільки лінійні траєкторії частинок, що не дає повного опису реального процесу пневмотранспортуванні.

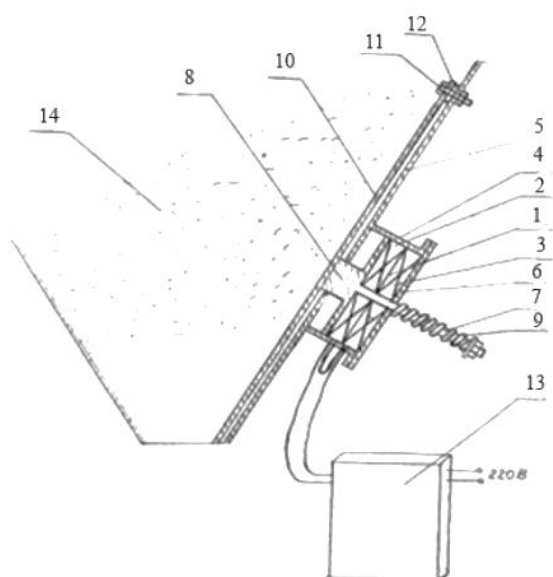
В роботі [14] запропоновано механізм моделювання фактичних зіткнень між частинками, однак рух частинок обробляються тільки лагранжеровой моделлю з трьома наборами ґрат для скорочення часу обчислень, що вносить обмеження по дослідженню реальних процесів. А в роботі [15] наведено експериментальна модель дослідження впливу ширина канала. 1.1. Пристрій для обвалення сипучого матеріалу в бункерах

## **1.2. Аналіз обладнання для деструкції склепів в пневмотранспорті**

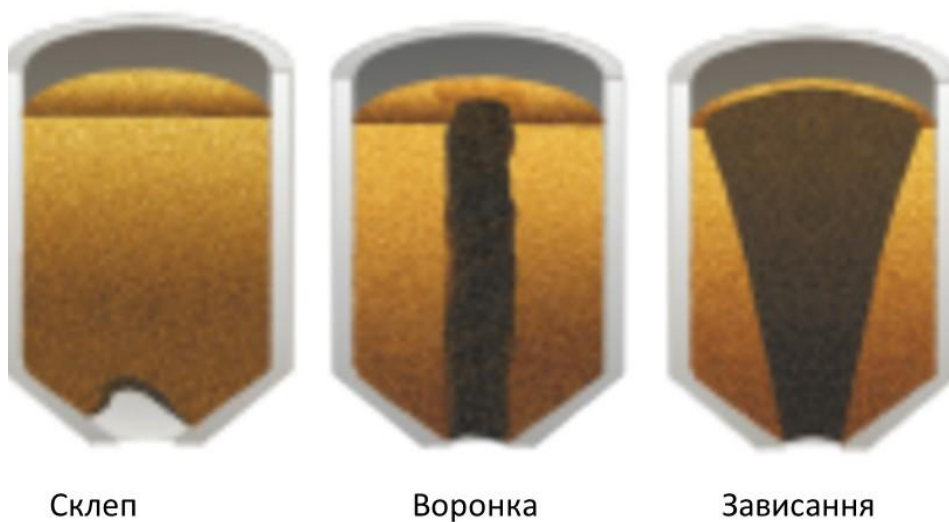
Розглянемо пристрій складається (рис.1.1.) із індуктора 1 та робочих обмоток 2, 3 у формі плоских спіралей, які розміщено дзеркально одна до одної. При роботі індуктор 1 розміщено у стакані 4, та жорстко закріпленому на стінці бункера 5. Тоді, стакан 4 має знімну кришку 6 та пази у внутрішніх поверхнях, які розташовано напротин один одному, в яких розміщені обмотки 2, 3.

На осі стакану розміщена шпилька 7, де один кінець має жорстко з'єднаний із системою бойка 8, і другий та із пружиною повороту 9.

Усередині бункера 5 під бойком установлена додаткова стінка 10 за допомогою болтів 11 через гумові амортизатори 12. Де робочі обмотки 2, 3 з'єднані із перетворювальним резервуарним блоком 13. Бункер, який заповнений продуктом, 14.



а)



Склеп

Воронка

Зависання

б)

Рис.1. Узагальнена схема пристрою деструкції сипких продуктів у бункерах:

а) схема пристрою деструкції; б) види склепоутворення в бункері живильнику

Процес відбувається за допомогою вібрації, на рис.1, наведено: 1 - індуктор, 2,3 - робочі обмотки, 5 - бункер, 6 - кришка, 4 - стакан, 7 - шпилька, 8 - бойок, 9 - пружинний поворот, 11 - болти, 10 - додаткова стінка, 12 - гумові амортизатори, 14 - продукт, 13- перетворювально-накопичувальний блок

Наведений пристрій працює наступним чином. У процесі розвантаження із бункера відбувається утворення склепіння і налипання матеріалу на стінках. Тоді припиняється подача продукту. Формується заряд на робочі обмотки 2, 3 індуктора 1, який подається від електромережі крізь перетворювально-накопичувальний блок 13. Результат - у робочих обмотках 2, 3 формуються зустрічні потоки, що прямують інверсно. Наслідки - стакан із кришкою охоплює з усіх боків обмотками 2, 3, які концентрують інверсні потоки у зазорі між обмотками 2,3 що обмежує їх рух на зовні. Тоді, додатково збільшують силу, що створює відштовхування обмотки. Бойок 8 рухається з великою швидкістю вздовж стакану 4 у бік бункера 5 та із додатковою стінкою 10. Здійснюється удар.

Формується дія механічного імпульсу на поверхні стінки 10, яка створює в ньому центробіжну хвилю щодо пружної деформації. Руйнується адгезія між матеріалом 14 та поверхнею на додатковій стінці 10. При цьому, склепіння матеріалу 14 та руйнується – наслідок - вільно обсипається матеріал.

Розробка стакану із кришкою та бойком з магніто-м'якого матеріалу, повинне забезпечувати уловлювання зустрічних магнітних потоків та їх концентрацію. У зазорі між обмотками та за рахунок цього, утворення додаткової руйнівної сили, збільшується ефективне використання щодо електромагнітних полів зустрічної спрямованості. Тоді, пружина забезпечує мінімальний зазор поміж обмотками індуктора, та також це сприяє підвищенню ефективності щодо електромагнітних полів.

Наявність стакану із кришкою та магнітом захищає обслуговуючий персонал від впливу електромагнітних полів[2].

Установка (рис 1.2.) має розташований в бункері 1 і пов'язаний із приводом 2 поворотний вал 3. На верхній підшипниковій опорі 4 поворотного вала змонтована система бункера 1. Нижня підшипникова опора 5 закріплена до розвантажувальної воронки на бункері I на пілонах 6. В поворотному валі змонтовано секції склеподеструкторів Вони мають вигляд пружних пластин 7, здатних пружно деформуватися у поперечній площині. Нижній

склеподеструктор 8 жорстко закріплений із гвинтами на вилку 9 поворотного вала 3. Інші склеподеструктори пов'язані із поворотним валом 3 та муфтами, у яких привідні напівмуфта 10 нерухомо закріплена на валу 3, та ведені напівмуфти 11, які розміщені на верхній частині кожної секції склепозрушувачів, виконаної у вигляді втулки, закріпленої на поворотному валу із можливістю зворотно-поступального та обертального руху.

На верхній частині для кожної втулки 12 в вилці 13 закріплена гвинтами пластина склеподеструктора та в нижній частині змонтований конічний козирок 14. Для ведених напівмуфт 10 та пружин 15.

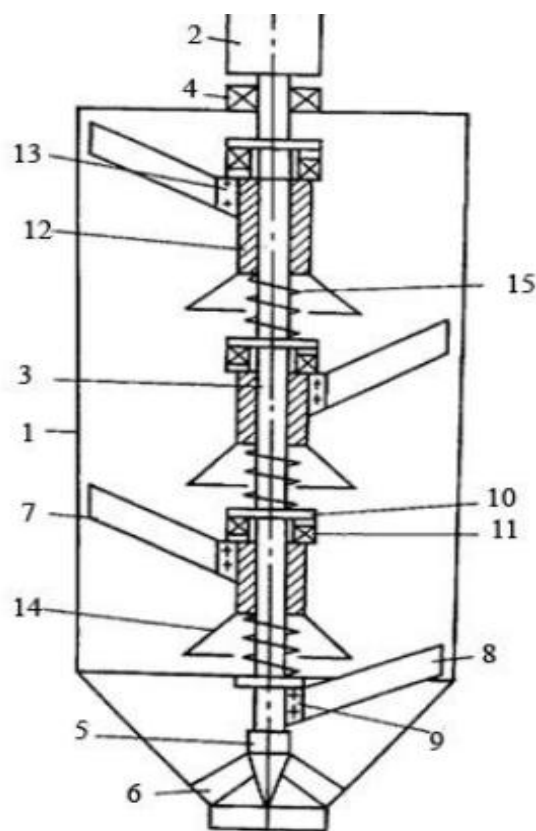


Рис.1.2. Узагальнена схема пристрою склеподеструкторів в бункерах

1 – бункер, 2 – привод, 4 – верхня підшипникова опора, 3 – поворотний вал, 6 – пілони, 5 – нижня підшипникова опора, 7 – пружні пластини, 9, 13 – вилка, 8 – склепозрушувач, 11 - ведені напівмуфти, 10 - привідні напівмуфти, 12 – втулка, 14 – конічний козирок, 15 – пружини

Наведений пристрій працює наступним чином. У завантаженому бункері 1 сипкий матеріал тисне на конічні козирки 14 (рис.1.3.), що стискають пружини 15, та опускають втулки 12. Тоді, відключають ведені напівмуфти 11 щодо привідних напівмуфт 10. При обертанні від приводу 2 передається поворотному валу 3. Жорстко закріплений на ньому склеподеструктор 8, що зрушує склепіння і перемички та у в нижній частині бункера. Внаслідок розвантаження нижньої частини бункера на поверхню конічного козирка 14 падає сипучий матеріал, та пружина 15 піднімає втулку 12, потім включає муфту до цієї секції. Наведений зрушувач має вібраційні тяги, що складаються із окремих відрізків стрижнів, що послідовно з'єднано пружинами. Розташовані всередині корпусу бункера, похилі до поздовжньої осі, пружно змінні по довжині ланки, одним кінцем кріпляться до стінки корпусу бункера, а іншим - до приводу зрушувача

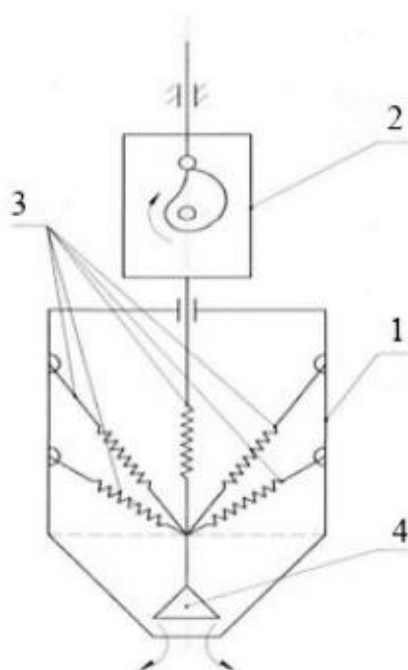
#### **Аналіз пристрою для зрушування склепінь матеріалів у бункерах**

. Тоді, вібраційні тяги одним кінцем закріплено щодо корпусу бункера, а іншим - щодо приводу, якій знаходиться зверху перед бункером.

Стабілізатор тиску, виконано у вигляді конуса, якій знаходиться у площині випускного отвору бункера, де є зазор щодо внутрішньої його стінки, із другої сторони[5]. Наведений пристрій складається (рис. 1.3.) із вібраційних тяг 3, виконаних з окремих стержнів, та послідовно з'єднаних 30 між собою пружинами, що розміщено у середині корпусу бункера 1. Також закріплених одним кінцем до його внутрішньої стінки, другим - до стабілізатора 4, та до приводу 2, для забезпечення коливального руху пружної системи.



а)



б)

Рис.1.3. Узагальнена схема пристрою для деструкції склепінь матеріалів у бункерах: а) загальний вид пристрою; б) принципова схема пристрою; 1 - бункер, 2 – привод, 3 – вібраційні тяги, 4 – стабілізатор

В наведеній системі, привід 2, за допомогою кулачкового механізму, що надає коливальний рух пружній системі, який складається із вібруючих тяг 3 та стабілізатора 4, який розташовано у бункері 1. Унаслідок взаємодії її з матеріалом, потім відбувається руйнування склепінь. Затори утворюються

всередині бункера 1, тоді зворотно-поступальний рух стабілізатора 4 потрібен для забезпечення розшарування матеріалу в нижній частині бункера. Це призводить до стабілізації густини щодо витікаючого потоку. Щодо зміни параметрів коливального руху, то це нівелює вплив на інтенсивність процесу щодо витікання матеріалу із бункера. Завдяки наведеному конструктивному виконанню зрушувача і системи багатофункціональності його дії, значно підвищується ефективність його роботи в системі бункерного обладнання в цілому.

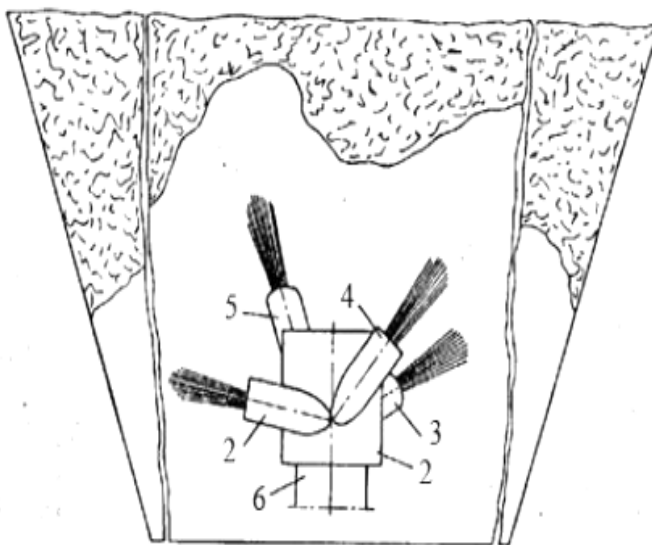


Рис.1.4. Узагальнена схема пристрою зрушування склепінь в бункерах  
1 – корпус, 2-5 – сопло, 6 – патрубок.

Вісі соплових елементів 2-4 не перетинають систему вісі корпусу 1, який виконаний порожнистим і з'єднаний із джерелом стисненого повітря системою допоміжного патрубка 6. Пристрій змонтований із можливістю обертання навколо поздовжньої вісі за рахунок дії крутного моменту, який утворюється соплами 2-4

### **1.3. Аналіз робіт прив'язаних математичному моделюванню пневмотранспортування**

Робота [12] присвячена як математичного, так і експериментальному дослідженню процесу транспортування дрібно-штучних продуктів в пневматичному транспорті.

При цьому показано, що між теоретичними і досвідченими даними є досить велика розбіжність, обговорюються точність і обмеження методу твердотільного моделювання DPM, використаного в цій статті. Існує певний розрив між результатами моделювання і реальним експериментом, тому що форма частинки не враховується, а сили частинок засновані на існуючих теоріях, які виходять від матеріальної точки. В роботі [13] запропоновано новий підхід до математичного моделювання процесу з елементами пневмопривода, але не враховані особливості керуючої системи з контрольованою зворотним зв'язком.

В [14] не враховано енергетичні складові під час зіткнення частинки зі стінкою і частки з частинками, які більш інтенсивні в нагнітальному трубопроводі. Розглянуто в більшій частині дослідження тільки лінійні траєкторії частинок, що не дає повного опису реального процесу пневмотранспортуванні.

В роботі [14] запропоновано механізм моделювання фактичних зіткнень між частинками, однак рух частинок обробляються тільки лагранжеровой моделлю з трьома наборами ґрат для скорочення часу обчислень, що вносить обмеження по дослідженню реальних процесів, також наведено експериментальна модель дослідження впливу ширини каналу транспортування.

### **1.4. Огляд методів пневмотранспортування сипких харчових продуктів та конструкцій пневмомереж продуктопроводів**

Наведений пристрій та спосіб пневмотранспорту сипких матеріалів у патенті на винахід UA (11)88476 (13) С2 МПК (2009) від 26.10.2009, Бюл.№ 20, докладно описує установку та спосіб для пневмотранспорту сипкого матеріалу

В основу пневмотранспортування покладений відомий фізичний принцип, який полягає у тому, що за певних умов газу, що протікають, здатні підхоплювати та переносити більш важкі тверді матеріали. При пневмотранспортуванні цей фізичний принцип цілеспрямовано використовується в техніці. При цьому пневмотранспортування звичайно здійснюється по трубопроводах. Як транспортуючий засіб постійно використовується потік газу, насамперед потік повітря, що забезпечується шляхом створення перепаду тиску між початком та кінцем трубопроводу (рис. 1.5).

За [21-31] методами транспортування, пневмотранспортивальні пристрої підрозділяють на два типи: всмоктувальні пневмотранспортивальні пристрої або установки та напірні пневмотранспортивальні пристрої або установки. Крім того, напірні пневмотранспортивальні пристрої підрозділяються на наступні типи: пристрої для пневмотранспортування з низькою концентрацією матеріалу, який транспортується, називані також пристроями для транспортування в потоці повітря, та пристрої для пневмотранспортування з високою концентрацією матеріалу, який транспортується. При пневмотранспортуванні з низькою концентрацією матеріал, що транспортується, переміщується у відносно невеликих кількостях методом транспортування у завислому стані або методом переривчастої подачі в пневмотранспортивальній системі в потоці з витратою великих кількостей повітря при накладанні тиску дуття з високими швидкостями потоку повітря, що становлять від приблизно 20 до 40 м/с. При цьому швидкість потоку транспортуючого газу значно вище швидкості осідання частинок сипкого матеріалу, завдяки чому сипкий матеріал завихрюється та у складі практично повністю перемішаної суміші з газом у стійкому режимі безупинно переміщується по транспортивальному трубопроводу. Падіння тиску в транспортуючому газі є наслідком внутрішнього тертя у ньому, дії сили тяжіння матеріалу, який транспортується, а також тертя між твердим

матеріалом та стінкою. Цей режим транспортування можна описати в поняттях, що визначають рух потоку газу. Так, при пневмотранспортуванні з низькою концентрацією матеріалу, який транспортується, показник густини потоку становить від приблизно 1 до 10. Під поняттям "показник густини потоку" мається на увазі відношення вимірюваної в кілограмах кількості матеріалу, який транспортується, до вимірюваної в кілограмах кількості транспортуючого повітря в суміші. Крім того, перепад тиску при пневмотранспортуванні з низькою концентрацією матеріалу, який транспортується, звичайно становить від 0,5 до 1 бар, однак у виняткових випадках може також досягати 4 бар.

Недолік цього методу транспортування полягає насамперед у малій об'ємній витраті матеріалу, який транспортується, у порівнянні з об'ємною витратою використаного потоку газу та в інтенсивному зносі транспортувальних трубопроводів при транспортуванні абразивних сипких матеріалів, таких, наприклад, як зерно.

Такий метод транспортування в потоці повітря не забезпечує досить дбайливе переміщення також сипких матеріалів, що складаються із частинок, які неприпустимо руйнувати, як, наприклад, крихкі, кристалічні або гранульовані сипкі матеріали. Інші параметри характеризують пневмотранспортування з високою концентрацією матеріалу, який транспортується, здійснювану при швидкості потоку газу, що становить від приблизно 1 до 15 м/с, насамперед від 2 до 10 м/с та відповідній або меншій швидкості осідання частинок сипкого матеріалу. Назва цього методу вказує на те, що у порівнянні із пневмотранспортуванням з низькою концентрацією матеріалу, який транспортується, має місце більший його потік, при цьому в даному випадку транспортування матеріалу по суті більше відповідає процесу "зрушування".

Під поняттям "транспортування з високою концентрацією матеріалу, який транспортується" підпадають у тому числі струминне пневмотранспортування як перехідний тип, пневмотранспортування скупчень

твердих частинок і так називане транспортування сипкого матеріалу, який утворив пробку, які забезпечують винятково високу питому витрату маси твердого матеріалу відносно кількості транспортуючого повітря.

При пневмотранспортуванні з високою концентрацією матеріалу, який транспортується, показник густини потоку становить більше 10, насамперед 30 і більше. Верхня межа показника густини потоку може становити приблизно 150 залежно від параметрів матеріалу, який транспортується. Показник густини потоку становить від 30 до 120 насамперед при пневмотранспортуванні матеріалу, який утворив пробку. Перепад тиску при пневмотранспортуванні з високою концентрацією матеріалу, який транспортується, становить більше 1бар, насамперед від 4 до 8 бар, при цьому цілком можливе також збільшення перепаду тиску до 16 бар. Внаслідок низької швидкості потоку газу в транспортувальному трубопроводі утворюються скупчення у вигляді "дюн" і "суцільних пробок". Ці пробки можуть повністю перекривати поперечний переріз трубопроводу. Тому при пневмотранспортуванні матеріалу, який утворив пробку, у результаті руху повітря знову й знову утворюються, руйнуються та прискорюються пробки із сипкого матеріалу. Основна перевага цього методу пневмотранспортування в порівнянні із транспортуванням у потоці повітря полягає в значно зниженому стиранні сипкого матеріалу, а також у зниженому зносі труб і низькій питомій витраті енергії завдяки застосуванню менш потужного компресора. Недолік цього методу полягає у тому, що сипкий матеріал переміщується по транспортувальному трубопроводу в нестійкому режимі через постійне утворення та руйнування пробок, при цьому тиск у трубопроводі найчастіше зростає через пробку доти, поки пробка різко не переміститься далі в транспортувальному трубопроводі. У результаті розширення об'єму газу, що знаходиться під тиском, перед пробкою забезпечується висока швидкість її переміщення, що може навіть перевищувати швидкість потоку газу та за певних умов приводити до того, що пробка переміщується вперед як свого роду снаряд. Для усунення зазначених вище

недоліків є рішення подавати стиснений газ у транспортувальний трубопровід по паралельних обвідних трубопроводах. Потік газу, що нагнітається збоку з обвідного трубопроводу в транспортувальний трубопровід, руйнує ущільнення сипкого матеріалу й тим самим протидіє також утворенню дюн або пробок завдяки розпушувальній дії потоку стисненого газу. Крім цього надлишковий тиск, створюваний перед пробкою, відповідно перед ущільненням матеріалу, знижується завдяки перепусканню частини газу по обвідному трубопроводу в обхід пробки, подачі далі за пробкою знову в транспортувальний канал та розподілу у ньому. Крім того, ущільнення та пробки безупинно руйнуються стисненим газом, який подається у транспортувальний канал. Завдяки цьому рішенню можна підвищити продуктивність пристрою для пневмотранспортування з високою концентрацією матеріалу, який транспортується, і додатково понизити знос. Крім цього після переривання процесу пневмотранспортування додатковий обвідний трубопровід стисненого газу допускає (легке) поновлення пневмотранспортування при наповненому транспортувальному трубопроводі. Проте й при здійсненні зазначеного вище методу матеріал, який транспортується, переміщується в нестійкому режимі по транспортувальному трубопроводі, оскільки й далі виникають ущільнення сипкого матеріалу в масовому потоці. Сухий сипкий матеріал складається з множини твердих частинок, які мають, наприклад, круглу, сферичну, пластинчасту, голчасту або багатогранну форму. (рис.1.6.)



Рис.1.6. Загальний вид сипких харчових продуктів: порошкові - борошно, цукор, сіль, кава, спеції ; дрібнозернові - рис, гречка.; пластівці - вівсянка, комбіновані пластівці

У кращому варіанті частинки сипкого матеріалу мають однакові розміри. Розмір частинок сипких матеріалів, що транспортуються пропонованим у винаході пристроєм, може становити до 20мм, а частка дрібнозернистої або пилоподібної складової може становити, наприклад, >2%. Середній розмір частинок сипкого матеріалу становить переважно  $\approx 2$ мм, насамперед від 0,04 до 1мм.

Обвідний трубопровід стисненого газу, відповідно канал для подачі стисненого газу розташований, відповідно пропущений переважно усередині, насамперед у верхній половині поперечного перерізу транспортувального каналу, відповідно транспортувального трубопроводу. У контексті просторового розміщення поняття "верхній" і "нижній" слід трактувати відповідно до напрямку сили тяжіння. Обвідний трубопровід стисненого газу розташований переважно у верхній частині верхньої половини поперечного перерізу транспортувального каналу. Однак обвідний трубопровід стисненого газу, відповідно канал для подачі стисненого газу можна також розташовувати зовні (з верхнього боку) транспортувального каналу. Проточні для газу засоби доцільно виготовляти з описаного нижче газопроникного матеріалу, який допускає випускання стисненого газу з обвідного трубопроводу стисненого газу в транспортувальний канал з утворенням газового потоку. Газопроникність можна забезпечити, наприклад, за рахунок найтонших отворів, пор, пробитих отворів, прорізів або перфораційних отворів у газопроникному виробі.

Обвідний трубопровід стисненого газу переважно має проточні для газу отвори у вигляді пробитих отворів або прорізів, через які стиснений газ може надходити з обвідного трубопроводу стисненого газу в транспортувальний канал. Пробиті отвори або прорізи можуть бути розташовані один від одного,

наприклад, на відстані, що дорівнює від 3 до 10см у напрямку транспортування. Діаметр пробитих отворів може становити, наприклад, від 0,1 до 2мм.

Діаметри наскрізних отворів є переважно меншими, ніж діаметр частинок матеріалу, який транспортується. На напрямок руху стисненого газу можна впливати шляхом надання особливої форми проточним для газу отворам на виході з обвідного трубопроводу стисненого газу таким чином, щоб він мав складову, орієнтовану в напрямку транспортування. Однак стиснений газ використовується насамперед для розпушення матеріалу, який транспортується, а не для його поступального переміщення.

Обвідний трубопровід стисненого газу може бути пропущений за всією довжиною або уздовж окремих ділянок транспортувального трубопроводу паралельно до нього (рис.1.7.).

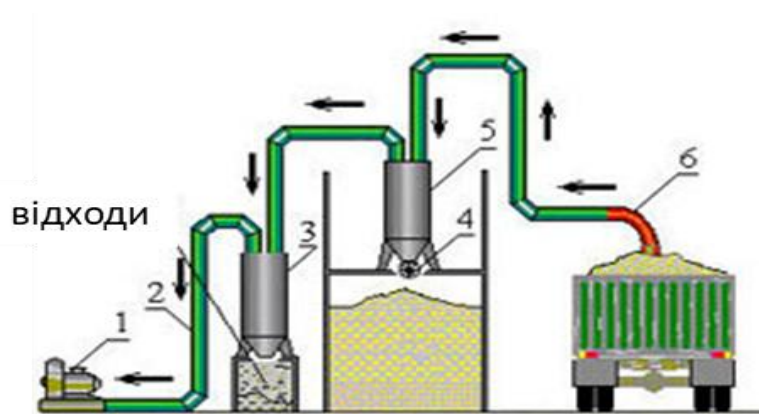


Рис.1.7. Система пневмотранспортування вакуумного типу на розвантажувальній ділянці: 1 – система подачі повітря; 2 – продуктопровід; 3 – циклонний розвантажувач; 4 – шлюзовий клапан; 5 – циклон розвантажувач; 6 – відбірник із гофрорукавом

Обвідний трубопровід стисненого газу являє собою найбільш переважно трубопровід для подачі стисненого газу, насамперед трубопровід з кільцевим поперечним перерізом. Внутрішній (найменший) діаметр транспортувального трубопроводу перевищує переважно в 2,5-60 разів, переважно в 3,5-40 разів, насамперед в 4-30 разів внутрішній (найменший) діаметр обвідного трубопроводу стисненого газу.

Під трубою або трубопроводом у наступному описі поряд із трубопроводами круглого або кільцевого поперечного перерізу слід розуміти насамперед також трубопроводи багатокутного, насамперед прямокутного або квадратного поперечного перерізу або в сполученні круглого та багатокутного поперечного перерізу. У принципі поперечний переріз трубопроводу може мати будь-яку форму.

Обвідний трубопровід стисненого газу може бути також виконаний як жолобчастий профіль (рис.1.8.), з відкритого боку якого розташовані проточні для газу засоби, що утворюють замкнутий канал і з'єднані з жолобчастим профілем. Обвідний трубопровід стисненого газу переважно вставлений у транспортувальний канал і з'єднаний із транспортувальним трубопроводом придатними для цього кріпильними засобами, такими як нарізні кріпильні засоби, заклепки, а також пайкою, зварюванням, клемовим, клейовим з'єднанням і т.п.

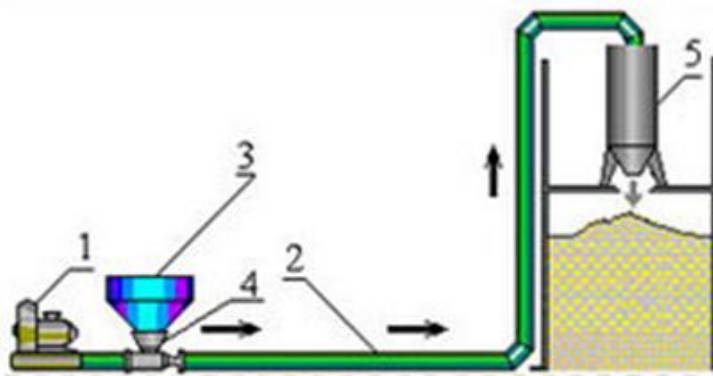


Рис.1.8. Узагальна схема пневмопродуктопроду нагнітального типу: 1 – система подачі повітря; 2 – продуктопровід; 3 –завантажувальний бункер; 4 – ежектор; 5 – циклон розвантажувач

Крім цього канал для подачі стисненого газу може також являти собою складову частину транспортувального трубопроводу, для чого, наприклад, транспортувальний трубопровід може бути виконаний як цільний виріб відповідно з (меншим) каналом для подачі стисненого газу та (більшим)

транспортувальним каналом. При цьому роздільна стінка між каналом для подачі стисненого газу та транспортувальним каналом має проточні для газу засоби, відповідно утворює їх. Існує також можливість виконувати обвідний трубопровід з декількома каналами для подачі стисненого газу, виконаними, наприклад, у вигляді великої кількості паралельних трубопроводів стисненого газу.

Як стиснений газ краще використовувати стиснене повітря.

Якщо сипкий матеріал ущільнюється, утворюючи дюни або пробки. В останньому випадку необхідно відповідно регулювати клапанами подачу стисненого газу. Необхідні для цього відповідні керуючі сигнали можуть бути сформовані на основі результатів вимірювання тиску в транспортувальному каналі, отриманих за допомогою датчиків тиску. Розпушений поданим стисненим газом матеріал, який транспортується, зріджується шляхом подачі зріджувального газу в нижній, тобто розташованій у донній основі частині транспортувального каналу. Зрідження означає розпушення сипкого матеріалу поданим зріджувальним газом і утворення суміші газу та твердого матеріалу шляхом піднімання частинок назустріч напрямку сили тяжіння спрямованим вгору від донної частини зріджувальним газом і переведення частинок у завислий стан, при цьому між частинками виникає повітряний шар, завдяки чому істотно знижується внутрішнє тертя матеріалу, який транспортується.

При створенні перепадів тиску усередині трубопроводу суміш газу та твердого матеріалу набуває властивості текучості, що аналогічна за своїми характеристиками текучості рідини. Таким чином, зріджений матеріал, який транспортується, тече аналогічно рідини під постійно діючим тиском транспортування в напрямку до споживача рис.1.9.

Зріджувальний газ можна подавати в транспортувальний канал системи транспортувальних трубопроводів протягом визначених проміжків часу або постійно, а також за всією довжиною або в окремі ділянки каналу відповідно до локальних умов транспортування. Крім цього режим подачі зріджувального газу на окремих ділянках трубопроводу може також змінюватися разом з

умовами, що змінюються в процесі транспортування. Зріджувальний газ можна подавати протягом усього процесу транспортування рівномірно або з витратою, що змінюється.

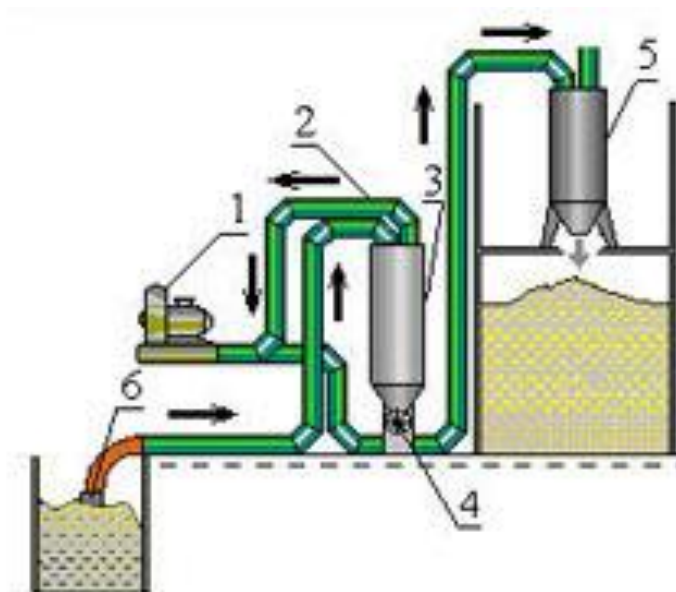


Рис.1.9. Комбінована система пневмотранспортуючої установки: 1 – система подачі повітря; 2 – продуктопровід; 3 –циклон розвантажувач; 4 – шлюзовий клапан; завантажувальний бункер; 5 – циклон розвантажувач; 6 – відвідний ресивер на гофрорукаві

Оскільки зріджувальні вузли окремих ділянок транспортувального трубопроводу переважно не з'єднані безпосередньо один з одним, стає можливим по-різному регулювати параметри зрідження, як зазначено вище, на окремих ділянках транспортувального трубопроводу з використанням додаткових для цього датчиків (тиску) і керуючих пристроїв.

На відміну від рушійної сили, яка необхідна для забезпечення транспортування в потоці повітря, рушійна сила, використовувана при здійсненні пропонованого у винаході способу пневмотранспортування з високою концентрацією матеріалу, який транспортується, являє собою значною мірою статичний тиск, який створюється у посудині тиску та в окремих випадках передається через трубопровід подачі стисненого газу в транспортувальний трубопровід.

Рушійна сила, необхідна для транспортування сипкого матеріалу, створюється в основному внаслідок виникнення перепадів тиску усередині транспортувального трубопроводу. Тому стиск газу в транспортувальному трубопроводі при пневмотранспортуванні з високою концентрацією матеріалу, який транспортується, має велике значення на відміну від вимог, виконуваних при забезпеченні транспортування в потоці повітря.

Стиснений же газ, що подається через обвідний трубопровід, і зріджувальний газ використовуються переважно винятково для розпушення та зрідження матеріалу, який транспортується, і не використовуються або практично не використовуються для забезпечення транспортування матеріалу, який транспортується, рис.1.10.

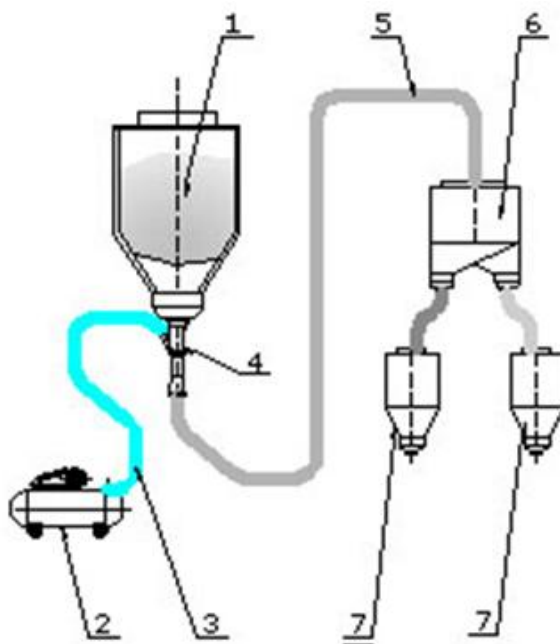


Рис.1.10. Приклад схеми пневмотранспортуючої системи на основі камерного насосу: 1 – продукт; 2 – компресор; 3 – пневмопривод; 4 – насос; 5 – продуктопровід; 6 – бункер-сепаратор; 7 – бункер приймальний

Вплив надлишкового тиску на споживача можна запобігти шляхом реалізації щодо пристрою, відповідно до способу певних мір, що передбачають зниження тиску транспортувального потоку, наприклад, аж до рівня тиску, який має місце на вході в споживач і який звичайно дорівнює атмосферному тиску.

На відміну від відомого транспортувального жолоба, називаного також аерожолобом або зріджувальним жолобом, який реалізує також принцип зрідження, пропонований у винаході пристрій необов'язково залежить від геодезичного ухилу.

Більше того, існують системи та способи, що реалізують свого роду комбінацію пневмотранспортування з високою концентрацією матеріалу, який транспортується, і аерозольного транспортування. При цьому швидкість руху газу в напрямку транспортування переважно дорівнює або є нижче швидкості осідання частинок.

Крім того, тиск газу в проточному для зріджувального газу каналі вищий тиску в транспортувальному каналі, рис.1.11.

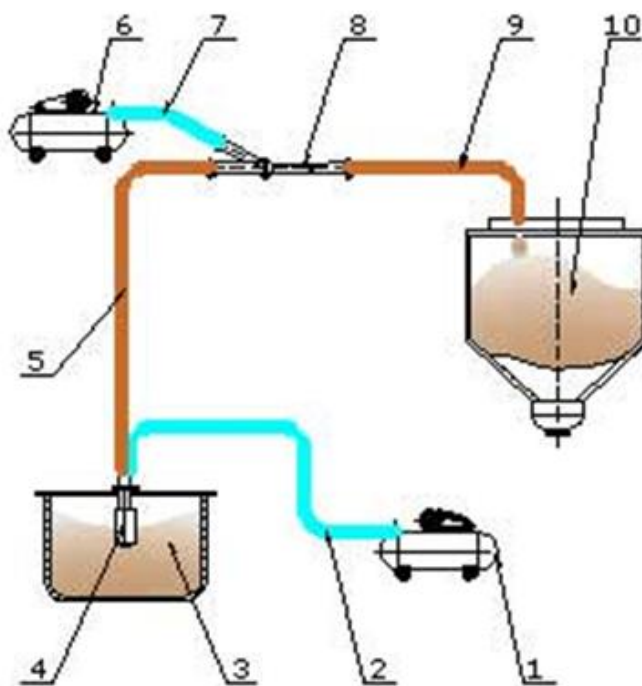


Рис.1.11. Схема пневмотранспортування сипкого харчового продукту до дозувального вузла:

1 – компресор головний; 2 пневмопривод; 3 – продукт; 4 – сопло; 5 – продуктопровід; 6 – компресор додатковий; 7 – пневмопривод додатковий; 8 – насос; 9 – продуктопровід відвідний; 10 - продукт

Сказане справедливо й щодо тиску газу в обвідному трубопроводі стисненого газу, рівень якого (тиску) у цілому вище рівня тиску в

транспортувальному каналі, рис.1.12. . Якщо в транспортувальному каналі виникає пробка, що не повинно мати місця в безперервному виробництві, а можливо в крайньому випадку лише на початку процесу транспортування при наповнюваному, відповідно наповненому транспортувальному трубопроводі, то тиск газу, що підвищується за пробкою, може перевищувати тиск газу в обвідному трубопроводі стисненого газу, завдяки чому транспортуючий газ надходить в обвідний трубопровід стисненого газу й таким шляхом обходить пробку.

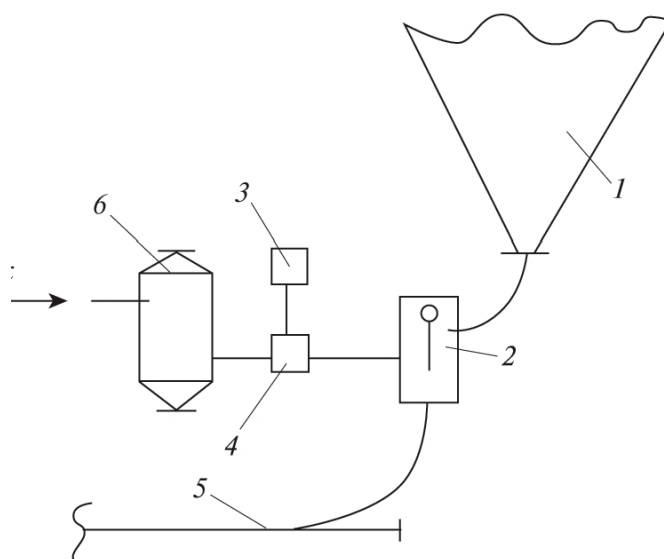


Рис.1.12. 1. Схема установки поршневого пневмотранспорта:

1 - бункер; 2 - блок завантаження; 3 - блок управління; 4 - клапан електромагнітний; 5 - продуктопровід транспортний; 6 - ресивер

. Якщо в транспортувальному каналі виникає пробка, що не повинно мати місця в безперервному виробництві, а можливо в крайньому випадку лише на початку процесу транспортування при наповнюваному, відповідно наповненому транспортувальному трубопроводі, то тиск газу, що підвищується за пробкою, може перевищувати тиск газу в обвідному трубопроводі стисненого газу, завдяки чому транспортуючий газ надходить в обвідний трубопровід стисненого газу й таким шляхом обходить пробку. Розробка принципово нових енергозберігаючих, екологічно чистих високоефективних способів пневматичного транспортування сипучих матеріалів сприяє

поліпшенню техніко-економічних показників транспорту промислових підприємств. Застосування екологічно чистого пневматичного транспорту актуально як для великих вантажопотоків, так і для невеликих технологічних систем.

Завдання раціонального використання можливостей пневмотранспорту сипучих матеріалів може бути вирішена на основі зниження енерговитрат на процес транспортування, зменшення експлуатаційних витрат, підвищення термінів служби і надійності установок і поліпшення екології навколишнього середовища.

### 1.5. Висновки до розділу 1

Тиск газу в проточному для зріджувального газу каналі може бути вищий, рівний або менший тиску в обвідному трубопроводі стисненого газу. Тиск газу в проточному для зріджувального газу каналі становить переважно на 0,1-2,0 бар вище тиску в обвідному трубопроводі стисненого газу.

Швидкість транспортування становить переважно 15м/с або менше, насамперед 10м/с або менше та краще 5м/с і менше, а також бажано 0,1м/с або вище, насамперед 1м/с або вище, бажано 2м/с або вище.

Величини перепаду тиску, що задаються, між передавальним пристроєм та споживачем становлять бажано вище 1 бар, насамперед вище 2 бар, краще вище 4 бар, а також краще нижче 20 бар, насамперед нижче 10 бар та бажано нижче 8 бар.

Показник густини потоку становить відповідно до пневмосистем бажано вище 10, насамперед вище 30, бажано вище 40, а також бажано нижче 200, насамперед нижче 160, переважно нижче 80.

Виходячи з вищевикладеного, в основу розробки експериментального стенду (розділ 3) була покладена задача розробити пристрій та спосіб пневмотранспортування з високою концентрацією сипкого матеріалу, який транспортується, які забезпечували б пневмотранспортування з високою концентрацією сипкого матеріалу, який транспортується, по можливості без

утворення, відповідно зі знизеним утворенням пробок і зменшеними за частотою утворення ущільненнями матеріалу.

Під сипким матеріалом будемо розуміти насамперед пилоподібні, порошоків, дрібнозернисті, зернисті, одержувані у вигляді окатишів або гранульовані сипкі матеріали.

Також, поставлена задача, на основі розробленої математичної моделі запропонувати оптимальну систему керування пневмотранспортуючою ділянкою для сипких харчових продуктів.

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ І АНАЛІЗ ПНЕВМОПРОДУКТОПРОВОДУ ДЛЯ ДРІБНО-ШТУЧНИХ ХАРЧОВИХ ПРОДУКТІВ

#### 2.1.Визначення основних компоновок та систем керування пневмотранспортуючих модулів

Проведені експериментальні і теоретичні дослідження базуються на застосуванні фундаментальних законів теоретичної механіки, гідродинаміки багатофазних середовищ, теорії рішень звичайних диференціальних рівнянь, рівнянь в приватних похідних, чисельних методів; механіки деформованого тіла; авторських напрацювань з експериментального дослідження процесів пневмотранспортування. Схема установки для вертикального пневмотранспорту представлена з урахуванням робіт [2-5] на рис. 2. 1.

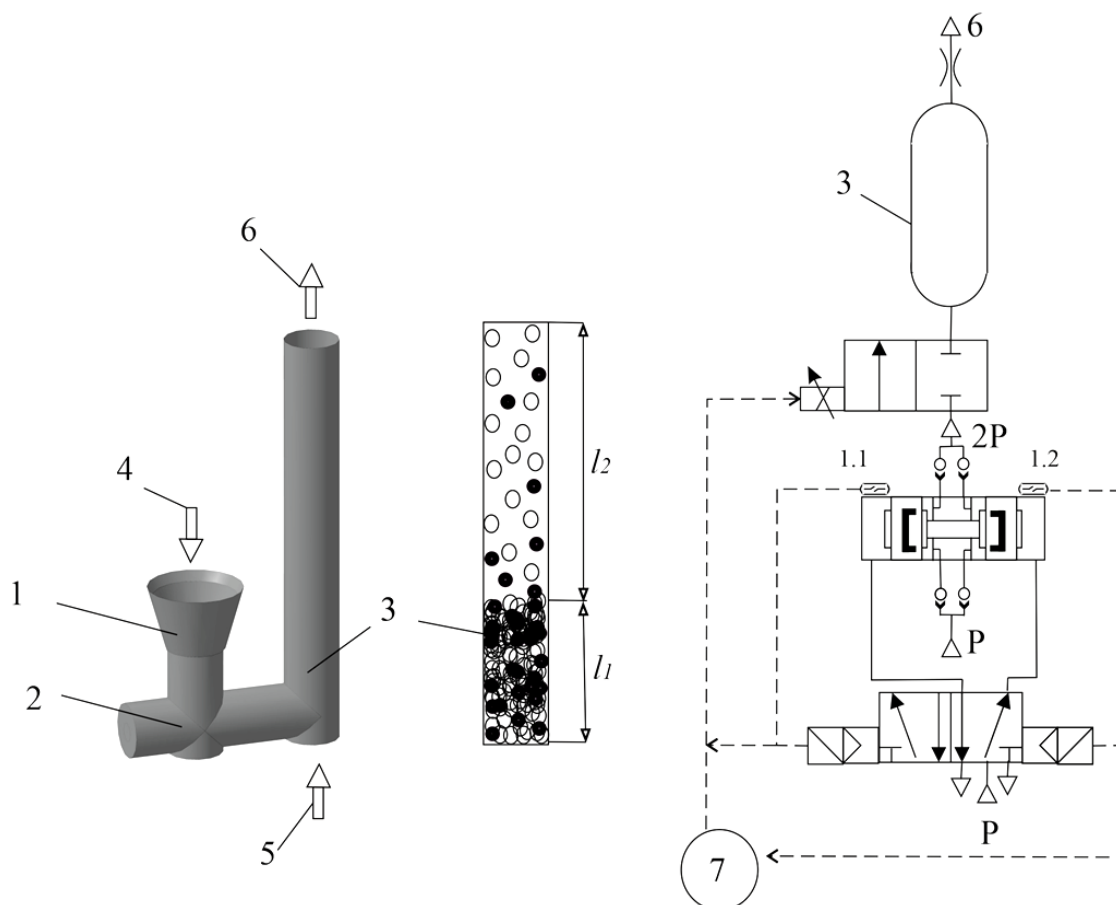


Рис. 2.1. Схема транспортування дрібно-штучних продуктів в пневмотранспортуючому технологічному модулі: 1 - завантажувальний бункер, 2 - зона подачі продукту шнеком, 3 - вертикальний транспортує канал;

4 - продукт, 5 - стиснене повітря; 6 - газова суспензія (повітря, дрібно-штучний продукт), 7 - блок електропневматичного управління;  $P$  - магістральний тиск стисненого повітря (МПа),  $2P$  - подвоєний тиск на виході бустера; 1.1., 1.2. - герконові датчики; 11, 12 - довжина ділянки розгону і ділянки стабілізації (м)

Робочий вертикальний канал продуктопроводу переходить в зону шнекового бункера живильника, який направляє дрібно-штучний продукт в зону подачі стисненого повітря. Дрібно-штучний продукт розганяється на ділянці довжиною 11, і досягає постійної характерною швидкості  $u$ , з якої переміщується по трубі вгору.

У вертикальній трубі переміщення продукту представлено двома областями: 11 - ділянка розгону (концентрація частинок продукту зменшується знизу вгору); 12 - ділянка стабілізації руху продукта, де швидкість і концентрація в потоці постійні. Згідно [7], частка твердих частинок в потоці є об'ємною концентрацією в межах 0,01 до 0,04 (до 4%). В якості системи управління потоком стисненого повітря в вертикальному каналі була обрана комбінація системи управління зі зворотним зв'язком (формат струмової петлі 4..20 мА), з можливістю регулювання керуючого сигналу по струму на керуючому соленоїді 0..5с.

Схема передачі сигналу приведена на рис.2.2.

В системі управління рис.2, використані елементи КАМОЦЦІ: драйвери серії 130 для управління пропорційними розподільниками клапанного типу AP (2/2), електронний датчик / реле тиску, серія SWCN, бустер 40M2L100A120MC02. ШІМ-сигнал, який формує драйвер, в замкнутому контурі регулювання струму 4..20мА, створює частоту сигналу до 500 Гц на котушку соленоїда електромагнітного клапана подачі стисненого повітря в систему вертикального каналу продуктопроводу.

Напруга харчування в керуючій ланцюга становить 24 VDC ( $\pm 10\%$ ) відповідно до обраного пропорційним розподільником AP.

Витрати стисненого повітря будуть залежати від величини вхідного магістрального тиску P (0,1 ... 0,3 МПа), і за даними [17,18], складають 80 ... 160 (Нл / хв). Використано методи автоматизації процесів при пневмотранспортуванні які базуються на модель, що буде показувати інтегральні уявлення про переміщення частинки в нерозривній частині у потоці в щільній фазі.

Для об'єднання між собою основних характеристик дисперсного середовища (витрата, густина, маса, тиск,) необхідно враховувати кінематичні і динамічні характеристики, створювані в потоці матеріалу.

Кінематичні і динамічні характеристики при пневмотранспортуванні окремих видів продуктів досліджені в ході проведення експериментів по окремим режимам при пневмотранспортуванні.

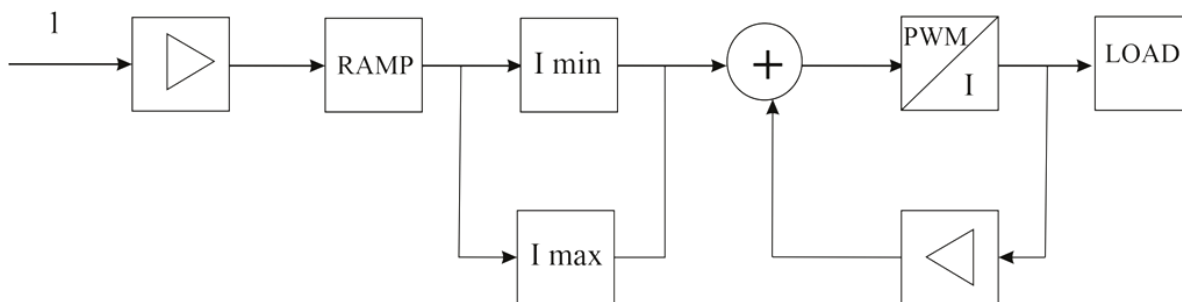


Рис.2.2. Схема передачі сигналу для імпульсної подачі стисненого повітря в вертикальному трубопроводі: 1 - стандартний сигнал; RAMP - калібрування часу розгону; I min, I max - струмове навантаження (мА); PWM - управління потужністю методом пульсуючого включення і виключення приладу; I - калібрування струму (мА), встановлене максимальне значення струму, що подається на клапан з опорним сигналом 100% .; LOAD - навантаження в ланцюзі управління

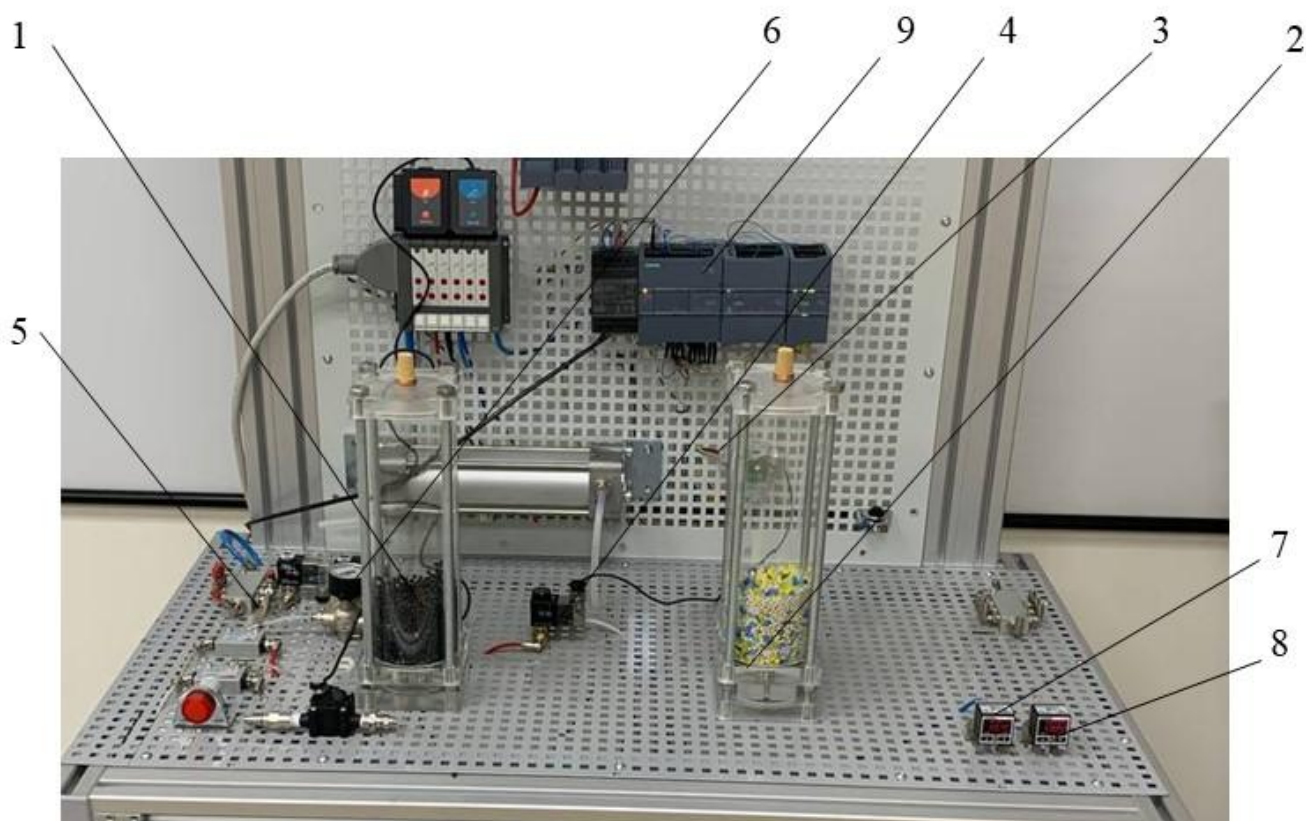


Рис.2.3. Вид експериментального стенду по дослідженню пневмотранспортування сипких та дрібно-штучних продуктів: 1,2 – вертикальні канали; 3,5 – драйвери управління пропорційною подачею імпульсу стичненого повітря; 4,6 – пропорційні електромагнітні розподільники прямої дії 2/2; 7,8 – електронні реле вакуума/тиску із аналоговим виходом; 9 – програмуючий пристрій задання закону зміну сигналу 4...20мА

Механізм процесу при пневмотранспортуванні, характерний для більшості технологічних процесів, ілюструється фотознімком експериментального стенду, з використанням різних видів дрібно-штучних продуктів (для кращого представлення процесу транспортування представлена покадрово формування ділянки та білізації; рис. 2.3).

При цьому для проведення досліджень був обраний сушений чорний перець горошок, а також один з найбільш поширених сухих гранульованих сніданків з зерновими [1, 8, 12].

Із фотознімку видно, що у вертикальній зоні транспортування каналу, має місце поділу продукту на ділянки розгону і стабілізації. У вертикальній

трубі газовий потік рухається із середньою фіктивною швидкістю. Швидкість руху твердих частинок щодо потоку легко оцінити, так як при вертикальному пневмотранспорті вона близька до швидкості витання [19].

Розглянемо процес при пневмотранспортуванні дрібно-штучного продукту в системі експериментального стенду. Процес обертання частинок в газовому потоці пов'язаний з відсутністю сферичності форми, наявності ударного взаємодії між частинками і стінкою продуктопроводу, а також наявністю ефекту закручування частинок окремими дрібними турбулентними вихорами.

## 2.2. Опис контрольно-вимірювального обладнання

Під час проведення експериментальних досліджень була сформована задача здійснення вимірювання фізичних параметрів процесу. Зокрема, для вимірювання зміни тиску застосовувались реле тиску SWCN, поз. 7,8 н арис.2.3., також більш розширений загальний вид наведено на рис.2.4.



Рис.2.4. Загальний вид приладів контролю тиску в системі експериментального стенду

### ОСНОВНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

- Цифровий індикатор:
- Високоточна електронна схема з двома незалежними дискретними виходами

- Налаштування тиску спрацьовування і гістерезиса з клавіатури
- Два програмованих вихода PNP для установки верхнього і нижнього
- граничних значень
- Функція датчика тиску вакууму для виконання з аналоговим виходом
- Дисплей тризначний цифровий дисплей з мембранною клавіатурою для
- настройки
- Індикація вбудовані світлодіодні індикатори для спостереження за станом
- реле
- Електричне підключення підключення через 4-контактний роз'єм M8 або
- кабель довжиною 2 метри
- Повторюваність (Вихід датчика)  $\leq \pm 0,2\%$  від повного діапазону  $\pm$  одна
- одиниця молодшого розряду
- аналоговий вихід 1 - 5 V  $\pm 5\%$  від повного діапазону (В лінійному діапазоні:  $\leq$
- $\pm 1\%$  від повного діапазону) 1 - 5 V  $\pm 2,5\%$  від повного
- Гістерезис режим гістерезиса регульований режим двухпорогового
- компаратора постійний (три одиниці молодшого розряду)
- Швидкодія  $\leq 2,5$  мс (функція захисту від вібрацій: 24 мс, 192 мс і 768 мс)
- Діапазон вимірюваного тиску задане значення 0 ÷ 10 бар

Можливість встановлення змінних режимів підведення стисненого повітря, а також корегування в режимі реального часу в експериментальному стенді реалізовано за рахунок пристроїв, наведених на рис.2.5.

Пристрій формування ШІМ-сигналу, для можливості прямого управління пропорційними розподільниками за допомогою типових аналогових сигналів. Електронний пристрій управління пропорційними клапанами Серії 130 дозволяє керувати будь-яким електромагнітним клапаном при максимальному струмі до 1А.

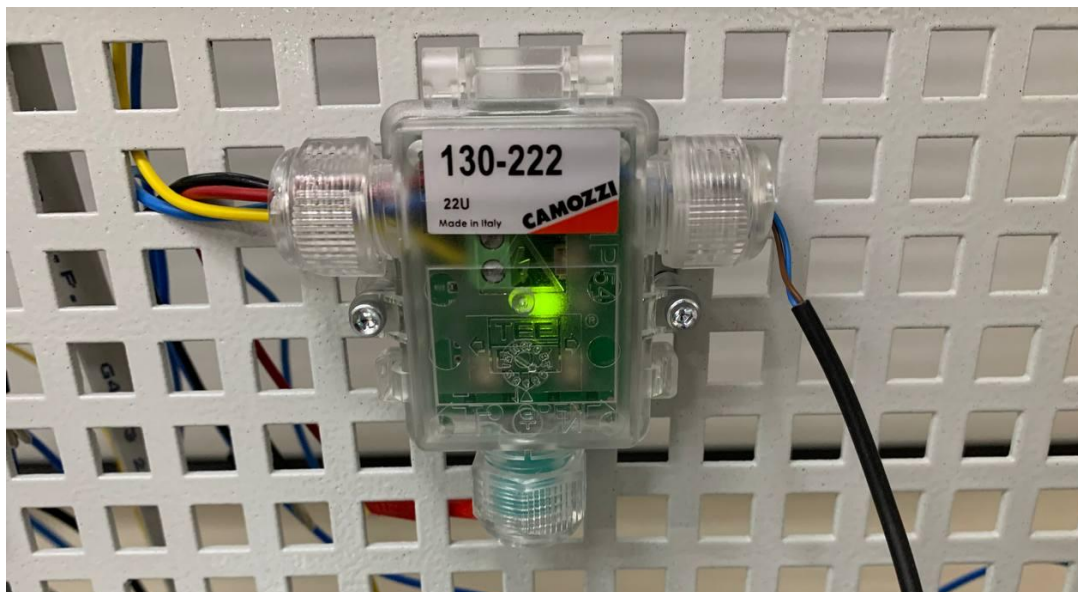


Рис.2.5. Пристрій для формування законів підведення стисненого повітря у мережу робочих трубопроводів

Стандартний вхідний сигнал управління (0-10 V DC або 4-20 mA) трансформується в ШІМ сигнал, який дозволяє подати на електромагнітний клапан сигнал по струму, пропорційний вхідному сигналу. Управління струмом на виході дозволяє обмежити нагрівання соленоїда або обмежити витрату повітря. Стандартний вхідний сигнал (0-10 V DC або 4-20 mA) перетворюється в пропорційний сигнал ШІМ. »Налаштування верхньої і нижньої межі вихідного сигналу по струму».

Сигнал управління 0-10 V DC і 4-20 mA. Установка нуля і коефіцієнта посилення, налаштування плавності наростання вихідної сигналу.

*Технічні характеристики пристрою:*

Температура навколишнього середовища  $0 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$  Установка в будь-якому положенні. Напряга живлення  $6 \text{ V} \div 24 \text{ V DC}$  ( $\pm 10\%$ ) Споживана потужність  $0,4 \text{ W}$  (без клапана) Аналоговий вход  $0 \div 10 \text{ V DC}$   $4 \div 20 \text{ mA}$ . Вхідний опір  $> 30 \text{ k}\Omega$  з вхідною зниженою напругою  $< 200 \text{ k}\Omega$  тз вхідним зниженим струмом. Вихід ШІМ  $120 \text{ Гц} \div 11,7 \text{ кГц}$  (фіксований, відповідно до обраного клапану) Функція налаштування плавності наростання вихідного сигналу на проміжку часу від 0 до 5 сек Регульовані мінімальні значення струму  $0\% \div 40\%$  від повного діапазону.

Для забезпечення можливості відтворення сигналів керування, описаних вище, застосовано спеціальний електропневматичний клапан AP, наведений на рис.2.6.

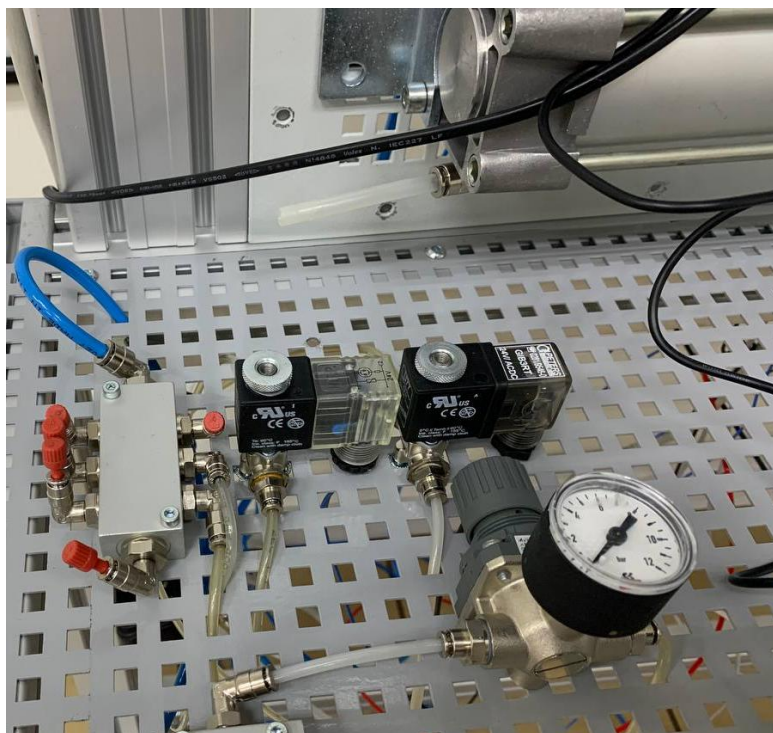


Рис.2.6. Електропневматичний клапан для формування повітряної струмини за заданим законом

Клапани AP можуть працювати при постійній подачі напруги на соленоїд. В клапанах AP для реалізації пропорційного управління оптимізовані характеристики тертя, і знижений ефект "залипання" рухомого елемента. Як сигнал управління використовується сигнал широтно-імпульсної модуляції по напрузі або току.

Як і звичайні клапанні розподільники AP можуть працювати на вакуумі і високих тисках,, або близьких до атмосферного.

- Функція розподільника 2/2 Н.З. пропорційний клапан прямої дії
- Конструкція приєднання M5, G1 / 8
- Максимальний робочий тиск
- Гістерезис розмір 16 мм <7% розмір 22 мм <5%
- Повторюваність розмір 16 мм <5% розмір 22 мм <3%

- Робоче середовище - очищене повітря класу 3.4.3 по ISO 8573.1, інертний газ.

Розроблений експериментальний стенд, на ділянці формування імпульсу стисненого повітря, забезпечено декількома схемами керування, які наведено на рис.2.7, 2.8.

Узагальнена принципова схема 1, для керування підведенням стисненого повітря на окрему ділянку із сипким харчовим продуктом, наведена на рис.2.7.

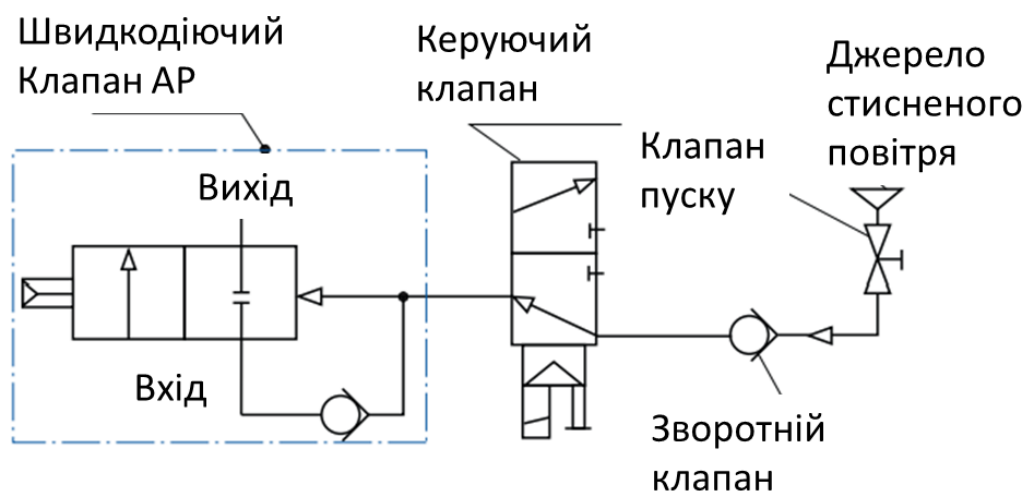


Рис.2.7. Принципова пневматична схема ділянки керування клапаном АР

Узагальнена принципова схема 2, для керування підведенням стисненого повітря на окрему ділянку із сипким харчовим продуктом, наведена на рис.2.8.

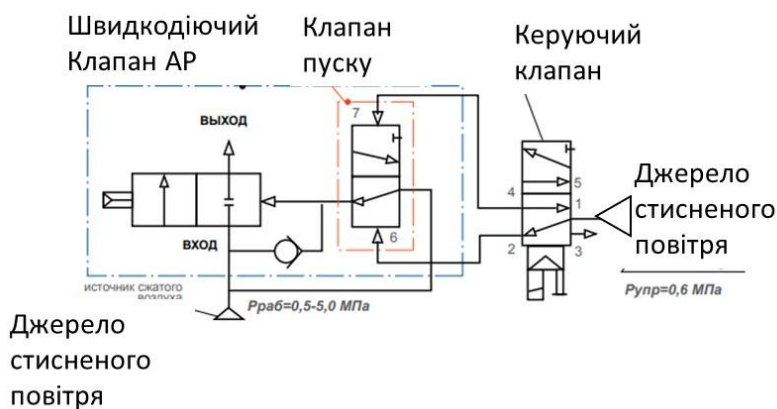


Рис.2.7. Принципова пневматична схема ділянки керування клапаном

АР

### 2.3. Побудова математичної моделі

Розглянемо процес при пневмотранспортуванні, керований імпульсами стисненого повітря, які обумовлюють робочі режими.

Потік повітря формується на вході в канал з продуктом, за допомогою пневмоклапана, який управляється генерацією струму по функції Хевісайда (одинична ступінча стафункція). Вимірне значення струму в мА (з 0,001мА) щодо стандартної шкали  $I_{max}$ ,  $I_{min} = 4..20$ мА, зафіксовано в діапазонах 4,1мА ... 19,9мА; 12мА ... 19,9мА. Видаткова характеристика пневмоклапана в установці = 180 Нл / хв. Тривалість періоду функції прийнята до 0,3 с.

У постановці завдання математичного моделювання, розглянемо рух сферичної частинки радіуса  $r'$ , щільністю  $\rho'$  в турбулентному газовому потоці. За умови: потік стаціонарний, газ нестисливий, кінематична в'язкість  $\nu = \mu / \rho$ .  $\mu$  – динамічна в'язкість газу (стисненого повітря),  $\rho$  – щільність повітря. Так як протягом стислого повітря турбулентний, то опір руху частинки відносно газу підпорядковується нелінійному закону. Тому на частіцу діє сила тяжіння тяжести  $G = \rho' \cdot g'$ , ( $H$ );  $g'$  – вектор прискорення сили тяжіння. Вхідні параметри математичної

моделі описано з урахуванням наступних значень: радіус частинки  $r' = 3 \cdot 10^{-3}$  (м); густина окремої частинки сипкого продукту  $\rho' = 1,25 \cdot 10^{-3}$  (кг·м<sup>-3</sup>); густина повітря  $\rho = 1,24 \cdot 10^{-3}$  (кг·м<sup>-3</sup>); прискорення вільного падіння  $g = 9,81$  (м·с<sup>-2</sup>); максимальна швидкість потоку стисненого повітря  $v_m = 20$  (м·с<sup>-1</sup>); динамічна в'язкість  $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5}$  кг/(м·с); радіус труби  $b = 0,05$  м. У потоці стисненого повітря частка отримує обертальний рух, що обумовлює рівняння руху (рис.2.4):

$$\frac{\pi}{6} (2 \cdot r')^3 \rho' \frac{du_i}{dt} = D'(v_i - u_i) + G_i + F_s, \quad (1)$$

$i = x, y, z$ ;  $v_i$ —проекція вектора швидкості  $\bar{v}$  стисненого повітря;  $u_i$ —проекція вектора швидкості  $\bar{u}$  частинки відносно нерухомої системи відліку  $x, y, z$ ;  $F_i$ —проекції вектора сили Рубінова–Келлера на сферичну поверхню частинки з боку стисненого повітря під час обертання;  $G_i$ —проекція вектора сили тяжіння на частинку; де

$$D' = 6\pi\mu r' \left( 1 + 0,065 \left( \frac{2}{\mu} r' \rho' (\sqrt{u - \bar{v}}) \right) \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (2)$$

Уявімо рівняння обертального руху частинок разом з рівнянням руху (1)

$$\begin{cases} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \cdot \rho' \cdot \frac{du_x}{dt} = D'(v_x - u_x) + G_x + F_x, \\ \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \cdot \rho' \cdot \frac{du_y}{dt} = D'(v_y - u_y) + G_y + F_y, \\ J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -\pi\mu(2 \cdot r')^3 \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} - \omega \right). \end{cases} \quad (3)$$

де  $\omega = \omega_z$  – проекція на вісь  $z$  вектора від кутової швидкості при обертанні частинки;  $J$ —момент інерції частинки відносно центральної осі, яка паралельна осі  $Oz$ :  $J = \{\pi \cdot (2 \cdot r')^5 \rho'\} / 60$ .

Запишемо величини  $u_x$ ,  $u_y$  у виді:

$$u_x = \frac{dx}{dt}; \quad u_y = \frac{dy}{dt}; \quad (4)$$

Проекції сил на осі координат описані як рівняння (5–6):

$$G_y = -\frac{1}{6} \pi \cdot (2 \cdot r')^3 \rho' g, \quad G_x = 0, \quad (5)$$

$$F_x = \frac{\pi}{8}(2 \cdot r')^3 \rho' \omega (v_y - u_y), \quad F_y = -\frac{\pi}{8}(2 \cdot r')^3 \rho' \omega (v_x - u_x), \quad (6)$$

В результаті підстановки (4)–(6) в систему (3), отримуємо систему трьох диференціальних рівнянь щодо трьох невідомих  $x(t), y(t), z(t)$ :

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \rho' \frac{d^2 x}{dt^2} = 6 \cdot \pi \mu r' \cdot \left( 1 + 0,065 \cdot \left( \frac{2}{\mu} r' \rho' \cdot \sqrt{\left( \frac{dx}{dt} - v_x \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} - v_y \right)^2} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{3}{2}} \times \dots \\ \dots \times \left( v_x - \frac{dx}{dt} \right) + \frac{\pi}{8} \cdot \rho' (2 \cdot r')^3 \cdot \omega \cdot \left( v_y - \frac{dy}{dt} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \rho' \frac{d^2 y}{dt^2} = 6 \cdot \pi \mu r' \cdot \left( 1 + 0,065 \cdot \left( \frac{2}{\mu} r' \rho' \cdot \sqrt{\left( \frac{dx}{dt} - v_x \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} - v_y \right)^2} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{3}{2}} \times \dots \\ \dots \times \left( v_y - \frac{dy}{dt} \right) - \frac{1}{6} \cdot \pi \rho' \cdot g (2 \cdot r')^3 - \frac{\pi}{8} \cdot \rho' \omega (2 \cdot r')^3 \cdot \left( v_x - \frac{dx}{dt} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -\pi \mu (2 \cdot r')^3 \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} - \omega \right).$$

Нехай  $b$  – радіус продуктопроводу (м),  $v_m$  – максимальна швидкість потоку стисненого повітря, тоді для турбулентного течії в шарі  $y \in [0, 2b]$ , т.е. для  $0 \leq y \leq b$ :

$$v_x = v_m \left( \frac{y}{b} \right)^{\frac{1}{7}}; \quad v_y = 0; \quad \frac{\partial v_x}{\partial v_y} = \frac{1}{7} v_m \left( \frac{1}{by^6} \right)^{\frac{1}{7}}, \quad (9)$$

для  $b \leq y \leq 2b$ :

$$v_x = v_m \left( \frac{2b-y}{b} \right)^{\frac{1}{7}}; \quad v_y = 0; \quad \frac{\partial v_x}{\partial v_y} = \frac{1}{7} v_m \frac{1}{b} \left( \frac{b}{2b-y} \right)^{\frac{6}{7}},$$

Перепишемо систему рівнянь (3), із урахуванням описаних вище перетворень:

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \rho' \frac{d^2 x}{dt^2} &= 6 \cdot \pi \mu r' \cdot \left( 1 + 0,065 \cdot \left( \frac{2}{\mu} r' \rho' \cdot \sqrt{\left( \frac{dx}{dt} - v_x \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{3}{2}} \times \dots \\ \dots \times \left( v_y - \frac{dx}{dt} \right) &- \pi \rho' (r')^3 \omega (2 \cdot r')^3 \cdot \left( \frac{dy}{dt} \right), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi \cdot r'^3 \rho' \frac{d^2 y}{dt^2} &= -6 \cdot \pi \mu r' \cdot \left( 1 + 0,065 \cdot \left( \frac{2}{\mu} r' \rho' \cdot \sqrt{\left( \frac{dx}{dt} - v_x \right)^2 + \left( \frac{dy}{dt} \right)^2} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{dy}{dt} - \dots \\ \dots - \frac{4}{3} \pi \cdot \rho' (r')^3 &- \pi \cdot \rho' (r')^3 \cdot \omega \cdot \left( v_x - \frac{dx}{dt} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} = -\pi \mu (2 \cdot r')^3 \cdot \left( \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial v_x}{\partial y} - \omega \right). \quad (13)$$

Початкові умови для знаходження п'ятипрозвольнихconst інтегрування:

в початковий момент руху  $t=0$ ;  $x(0)=x_0$ ;  $y(0)=y_0$ ;

для визначення проєкцій вектора швидкості в початковий момент часу:

$$\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = u_{x_0}, \quad \left. \frac{dy}{dt} \right|_{t=0} = u_{y_0},$$

в початковий момент часу кутова швидкість обертання частинки:

$$\omega(0) = \omega_0;$$

- розрахункова схема кінематичних характеристик частинки для встановленого режиму транспортування (рис.2.4).

У момент зіткнення частинок зі стінкою продуктопроводу, необхідно розрахувати швидкості після відскоку від поверхні, з урахуванням можливих траєкторій. Для розрахунку кінематичних параметрів поведінки частинок після ударного контакту об стінку продуктопроводу, приймемо радіус сферичної частинки  $r = d / 2$ , всі параметри після удару мають позначення \*.

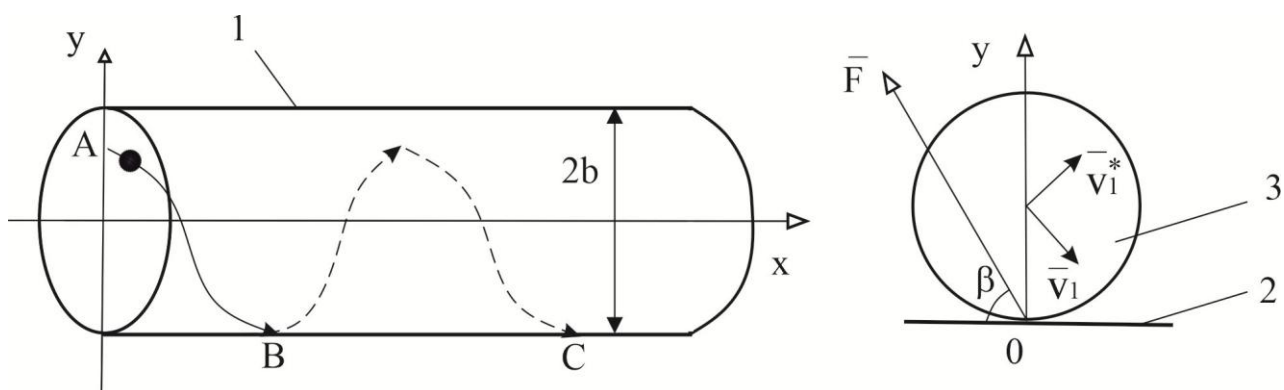


Рис. 2.4. Траєкторія руху частинки з загальними кінематичними характеристиками: 1 - продуктопровід, 2 - внутрішня стінка продуктопроводу, 3 - частка дрібно-штучного продукту  
Характеристика частки під час удару:

$$\begin{aligned}
M(\dot{x}_1^* - \dot{x}_1) &= -|F|\cos\beta, \\
M(\dot{y}_1^* - \dot{y}_1) &= |F|\sin\beta, \\
M(x_1(\dot{y}_1^* - \dot{y}_1) - y_1(\dot{x}_1^* - \dot{x}_1)) + J_1(\omega_z^* - \omega_z) &= 0,
\end{aligned} \tag{14}$$

$M$  є функцією від положення об'єкта. Для відновлення нормального і дотичного швидкості частинок, введемо Коефіцієнти  $0 \leq k_n < 1$ ,  $0 \leq k_\tau < 1$ , тоді координати переміщення центра мас частинки:

$$\begin{aligned}
\dot{y}_1^* &= -k_n \cdot \dot{y}_1, \\
\dot{x}_A^* &= k_\tau \cdot \dot{x}_A.
\end{aligned} \tag{15}$$

У разі визначення лінійної швидкості точок, що лежать на сфері, скористаємося теоремою Шаля [9]. У разі переміщення до удару:

$$\bar{v}_A = v_1 + \left( \bar{\omega} \cdot \overline{CA} \right). \tag{16}$$

В случае перемещения після удару:

$$\bar{v}_A^* = v_1^* + \left( \bar{\omega}^* \cdot \overline{CA} \right). \tag{17}$$

В результаті проектування векторного простору на ось  $x$ , отримано:

$$\begin{aligned}
\dot{x}_A &= \dot{x}_1 + \frac{d}{2} \omega_z, \\
\dot{x}_A^* &= \dot{x}_1^* + \frac{d}{2} \omega_z^*.
\end{aligned} \tag{18}$$

Після підстановки (18) в (15) і відповідних перетворень, отримано значення

$\omega_z^*$  кутової та  $\dot{x}_1^*$  лінійної швидкості переміщення частинки після удару:

$$\omega_z^* = \frac{J_{z1} + \frac{md^2}{4}k_\tau}{J_{z1} + \frac{md^2}{4}} \cdot \omega_z - \frac{1}{2} \left( \frac{md(1-k_\tau)}{J_{z1} + \frac{md^2}{4}} \right),$$

$$\dot{x}_1^* = k_\tau \dot{x}_1 + k_\tau \frac{d}{2} \omega = - \left\{ \frac{J_{z1} + \frac{md^2}{4}k_\tau}{J_{z1} + \frac{md^2}{4}} \cdot \frac{d \cdot \omega_z^2}{2} + \frac{1}{4} \left( \frac{md^2(1-k_\tau)}{J_{z1} + \frac{md^2}{4}} \right) \right\}. \quad (19)$$

Отримана математична модель описаного режиму при пневмотранспортуванні, вирішується за допомогою приведення рівнянь руху до канонічного вигляду. Чисельні методи розрахунку з використанням теорії Рунге-Кутта, з підпрограмою, заснованої на схемі четвертого порядку точності, дають можливість отримати початковий результат для проведення експериментів по дослідженню критичних режимів пневмотранспортування сипких продуктів.

#### 2.4. Висновки до розділу 2

Досліджено і промодельовано процес при пневмотранспортуванні сипкого продукту в системі експериментального стенду.

Описано математично процес обертання частинок в газовому потоці пов'язаний з відсутністю сферичності форми, наявності ударного взаємодії між частинками і стінкою продуктопроводу, а також наявності ефекту закручування частинок окремими дрібними турбулентними вихорами.

### РОЗДІЛ 3

## РОЗРОБЛЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ДЕСТРУКЦІЇ СКЛЕПОУТВОРЕННЯ В ПНЕВМОТРАНСПОРТІ

### 3.1. Аналіз процесу. Постановка задачі.

Сучасний підхід до створення пневмотранспортних установок, що працюють при нетрадиційних режимах руху аеросуміші, базується на дослідженнях фазових станів і переходів аеросуміші, умов їх формування і збереження на різних ділянках транспортного трубопроводу [32, 34]. Поліпшення технічних показників пневмотранспорта сипучих матеріалів досягається інтенсифікацією масопереносу шляхом енергетичного підживлення за допомогою додатково вдихається повітряних струменів, створенням завихренности потоку, вібраційних впливом на сипучий матеріал або об'єднаним дією декількох факторів [35-41]. Поліпшенню масопереносу сприяють і коливальні процеси, що виникають в трубопроводі, обумовлені структурованим рухом аеросуміші і хвилями «стиснення - розрідження» газоматеріального потоку.

На підставі теоретичних досліджень процесу деструкції склепоутворення сипких харчових продуктів в бункерах живильниках, поставлена задача розроблення математичної моделі роботи пневмосоплової системи деструкції (пневмопушки). Останнім часом широкого поширення для розрахунку робочих процесів в енергосилових установках отримали САЕ-пакети (Computer-Aided Engineering). Слід зазначити, що в разі використання газоподібних компонентів такі пакети дозволяють забезпечити прийнятну для інженерних розрахунків точність.

Апробація розробленого 3Д модуля здійснена для програмного пакету ANSYS Fluent. Із використанням розробленого модуля проведено параметричне чисельне дослідження робочого процесу в асесиметричній прямоточній конструкції. Виконане моделювання направлено на виявлення

закономірностей, що описують вплив співвідношення компонентів, умов двофазного сумішоутворення (повітря - частинка) і їх вплив на ефективність робочого процесу. В результаті порівняння результатів проведеного параметричного дослідження з даними експериментів з'являється можливість вирішити конкретну практичну проблему: підібрати значення емпіричних констант в законі переміщення частинок продукту у потоці повітря.

На початку дослідження, у якості вихідних параметрів, виховано, що пристрій працює на принципі пневмосоплової системи і забезпечує безпосередній контакт для струмини повітря із сипким продуктом. Етапи роботи над створенням моделі наведено на рис.3.1.

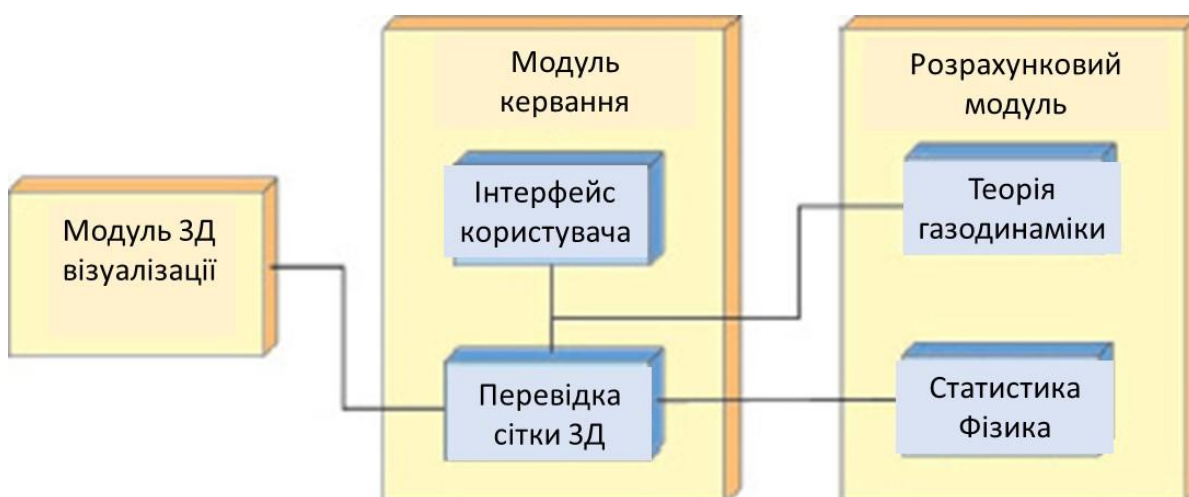


Рис.3.1. Поетапне створення імітаційної моделі пневмопристрою деструкції слекпоутворення сипкого продукту у бункері

Аналіз існуючих програмних комплексів для моделювання динаміки повітряних потоків показав, що вони спираються на стандартні методи обчислювальної гідродинаміки: метод кінцевих елементів для нестисливої рідини і методи інтегрування рівнянь Нав'є - Стокса для в'язкої нестисливої рідини. На рис. 3.2 зображена діаграма розгортання програмних модулів, розробленою спеціалізованою підпрограмою на базі програмного комплексу «ANSYS», який є найбільш оптимальним для моделювання динаміки повітряних пристроїв.

Експериментальні дослідження, проведені до цього часу, дають можливість отримати емпіричні закономірності впливу різних чинників на характеристики робочого процесу. Однак наявні дані не дозволяють детально проаналізувати особливості поведінки стисненого повітря у важкодоступних місцях конструкції пневмосоплових систем деструкції склепоутворення, а також у момент взаємодії потоку повітря із продуктом всередині замкненого трубопровідного транспорту.

CFD-метод (англ. Computational fluid dynamics, CFD) - підрозділ механіки суцільних середовищ, що включає сукупність фізичних, математичних і чисельних методів, призначених для обчислення характеристик потокових процесів.

Чисельні дослідження із застосуванням CFD-методу, як правило, мають на увазі наступну послідовність дій:

- Постановка завдання дослідження на основі експертного аналізу.
- Вибір методу розрахунку.
- Розробка фізичної моделі.
- Вибір розрахункового коду.
- Вибір і побудова розрахункової області.
- Розробка комп'ютерної моделі.
- Валідація результатів чисельного моделювання.
- Верифікація результатів чисельного моделювання.

Як правило, в результаті CFD-моделювання об'єкт дослідження візуалізується колірним полем градієнта. Це може бути 2D візуалізація або 3D модель з характерними геометричними параметрами. На рис.3.2 зображено комп'ютерна CFD-модель поля градієнта швидкості повітряних потоків.

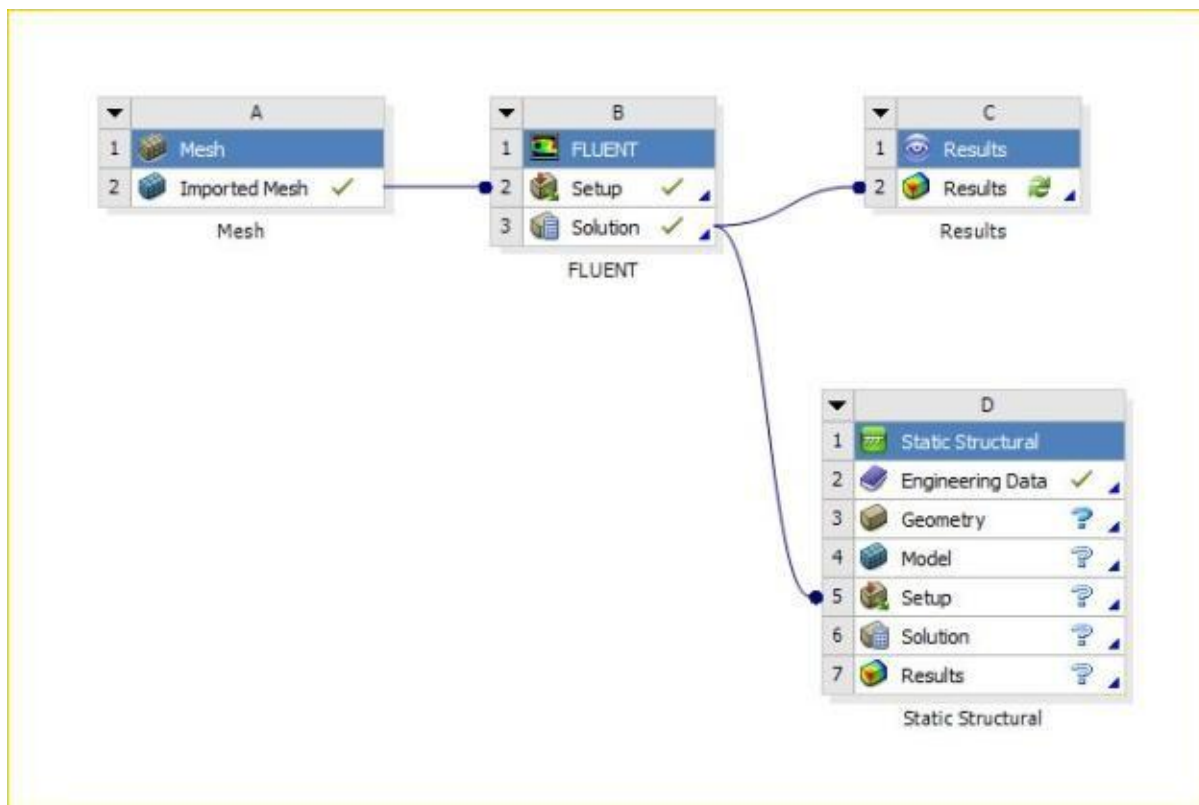


Рис. 3.2. Діаграма розгортання програмних модулів

В пакеті програми, можливо обрати вид частинок для моделювання сипкої продукції.

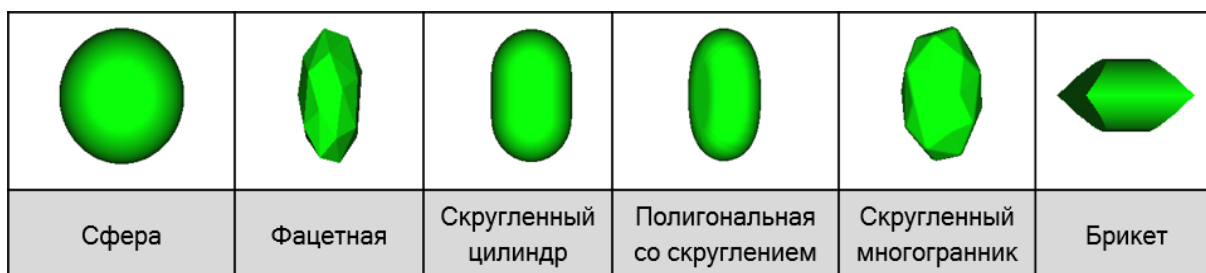


Рис. 3.3. Prnt+Scr частинок за геометрією

Схема для накладання сітки розрахунку обирається на підставі вбудованих функцій, рис.3.4.:

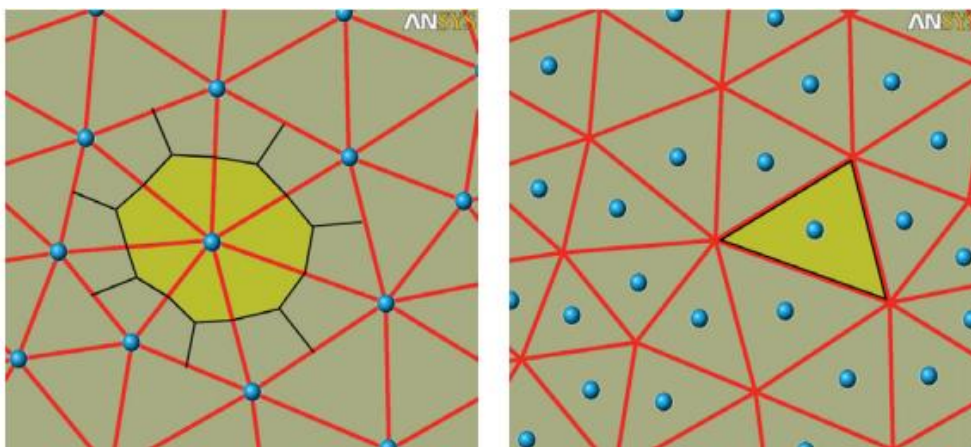


Рис.3.4.Схема контрольного об'єму, центрована по вузлу - CFX (зліва) і центрована по осередку – Fluent (Праворуч).

Використання високоякісних гексагональних сіток при моделюванні течії в проточних частинах турбомашин дозволяє істотно підвищити точність і ефективність розрахунків. Гексагональна сітка значно економічніше тетраедральної з точки зору обчислювальних ресурсів. А структура сіткових ліній як правило така, що вони виявляються спрямовані уздовж ліній струму, що знижує помилку при дискретизації рівнянь.

### 3.2. Математична модель та знаходження розрахункової області.

Для вирішення завдань, використано у високоентальпійному повітряному потоці математичну модель, яка заснована на комбінованому методі Лагранжа - Ейлера. Обрано для розгляду варіант, коли газова фаза являє собою суміш повітря і продуктів. Хімічна взаємодія прийнята незворотнім процесом і протікає за схемою «повітря → продукти». З огляду на те, що обраний для розрахункового параметричного дослідження трубопровід має осиметричну конфігурацію, при моделюванні характеристик газової фази використана система рівнянь нерозривності, збереження імпульсу і енергії, записана в циліндричних координатах:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial(A-R)}{\partial x} + \frac{\partial(B-X)}{\partial r} + \frac{F}{r} = S;$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho w \\ \rho v \\ e \\ \rho Y_{\text{пс}} \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} \rho w \\ p + \rho w^2 \\ \rho w v \\ (e+p)w \\ \rho Y_{\text{пс}} w \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho w v \\ p + \rho v^2 \\ (e+p)v \\ \rho Y_{\text{пс}} v \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xr} \\ w\tau_{xx} + v\tau_{xr} + q_x \\ \rho D \frac{\partial Y_{\text{пс}}}{\partial x} \end{bmatrix};$$

$$X = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xr} \\ \tau_{rr} \\ w\tau_{xr} + v\tau_{xx} + q_r \\ \rho D \frac{\partial Y_{\text{пс}}}{\partial r} \end{bmatrix}; \quad F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho w v - \tau_{xr} \\ \rho v^2 - \tau_{rr} + \tau_{\theta\theta} \\ (e+p)v - w\tau_{xr} - v\tau_{xx} - q_r \\ \rho Y_{\text{пс}} v - \rho D \frac{\partial Y_{\text{пс}}}{\partial r} \end{bmatrix}; \quad S = \begin{bmatrix} S_p \\ S_w \\ S_v \\ S_e \\ S_{\text{пс}} \end{bmatrix}.$$

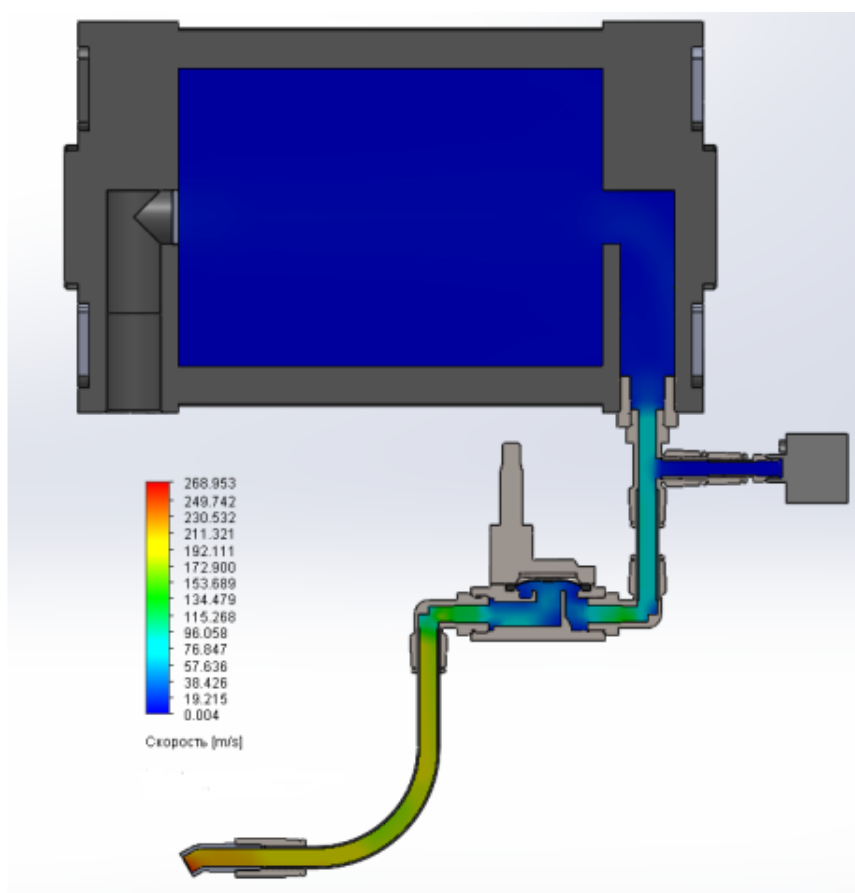
Тут  $t$  - час;  $x, r$  - осьова і радіальна координати;  $\rho$  - густина газу;  $w, v$  - осьова і радіальна складові швидкості газу;  $e = p/(k+1) + \rho(w^2 + v^2)/2$  - повна енергія одиниці газового об'єму (де  $k$  - показник адиабати);  $Y_{\text{пс}}$  - масова частка продуктів;  $p$  - тиск газу;  $\tau_{xx}, \tau_{rr}, \tau_{\theta\theta}, \tau_{xr} = \tau_{rx}$  в'язкі напруги для газового потоку;  $q_r, q_x$  - повітряні потоки в осьовому і радіальному напрямках;  $D$  - коефіцієнт дифузії;  $S_w, S_v, S_r, S_{\text{пс}}$  - складові, що описують вплив руху, польоту частинок дисперсної фази на газовий потік. Приймається, що масова концентрація повітря дорівнює в пс  $Y_B = 1 - Y_{\text{пс}}$ . Систему замикають рівняння стану суміші ідеальних газів і однопараметрична модель турбулентності.

Комбінований метод Лагранжа - Ейлера реалізується в такий спосіб. Необхідно розбити розрахункову область на осередки. Припустимо, що в межах одного осередку з кінцевим об'ємом  $V$  знаходяться газ і  $N$ -частинок конденсованої фази. При цьому обсяг конденсованої фази в осередку істотно менше  $V$ . Джерельний член в рівнянні нерозривності дозволяє враховувати, що при взаємодії продукту з , маса газової фази зростає на величину, чисельно

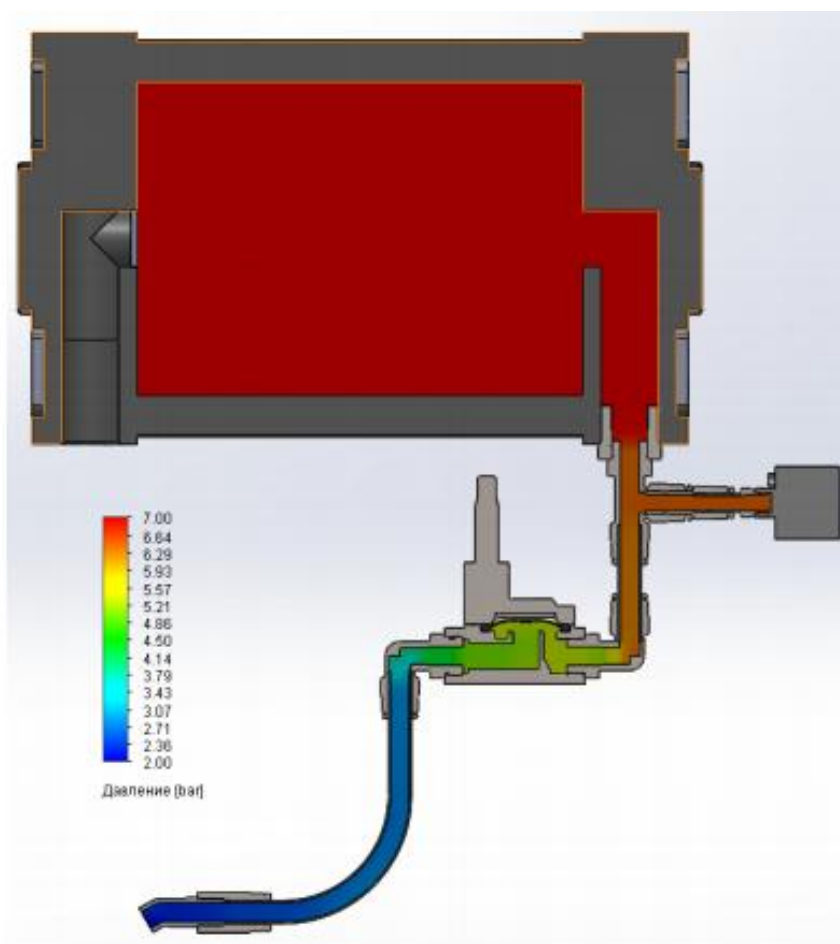
рівну масі частинок. значення  $Sw$  і  $Sv$ , що використовуються для збереження осьових складових сумарного імпульсу газової та дисперсної фаз.

Наведено результати експериментальних досліджень, які підтверджують теоретичні дослідження. Отримані результати дають можливість здійснити порівняння за існуючими аналогами спроектованого пристрою.

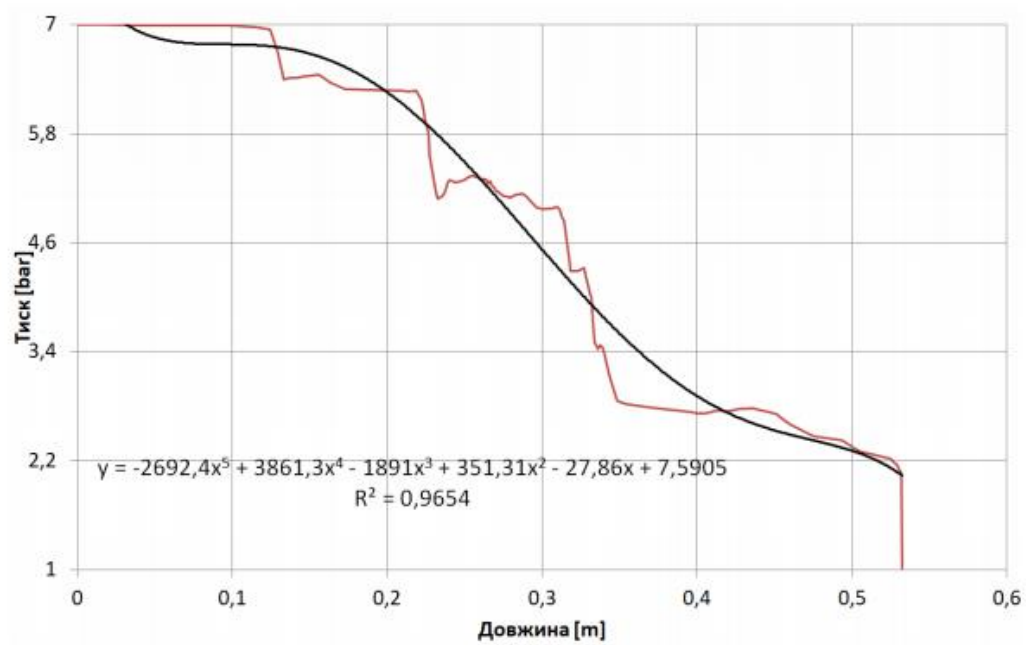
Об'єктом дослідження обрано пристрій пневмосопловий із використанням мембранного клапану. Наукова новизна виконаних досліджень полягає у розробленні нової конструкції пристрою, для поліпшення способу деструкції склепоутворення сипких харчових продуктів. Також, щоб забезпечити безперервний процес фасування. При побудові параметричної моделі процесу експлуатації пристрою для багатоконпонентних сипких харчових сумішей, рис.3.5, задіяно пакет ANSYS.



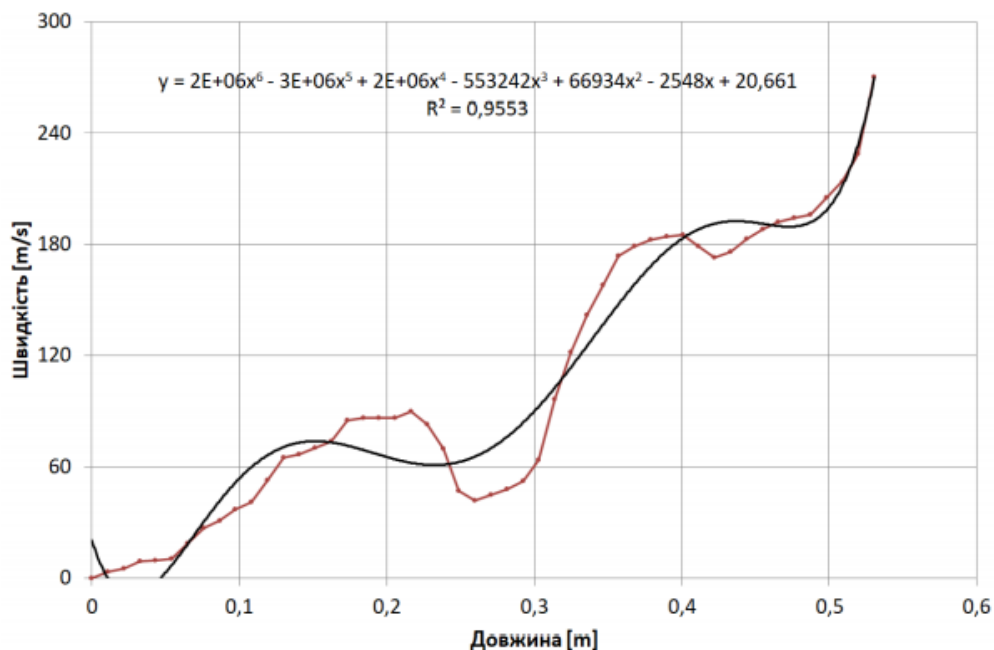
a)



б)



в)



г)

Рис.3.5 Узагальнені результати досліджень пневмотранспортної системи пневмопушки: а) 3D загальний переріз із відображенням швидкості потоку; б) 3D загальний переріз із відображенням тиску; в) узагальнена характеристика залежності  $V=f(L)$ ; г) узагальнена характеристика залежності  $P=f(L)$ .

За основу 3Д моделі обрано конструкцію конічного бункера живильника, наведену на рис. 3.6. Сучасний підхід до створення пневмотранспортних установок, що працюють при нетрадиційних режимах руху аеросуміші, базується на дослідженнях фазових станів і переходів аеросуміші, умов їх формування і збереження на різних ділянках транспортного трубопроводу [18, 19]. Поліпшення технічних показників пневмотранспорта сипучих матеріалів досягається інтенсифікацією масопереносу шляхом енергетичного підживлення за допомогою додатково вдихається повітряних струменів, створенням завихренности потоку, вібраційних впливом на сипучий матеріал або об'єднаним впливом декількох факторів [20, 21]. Поліпшенню масопереносу сприяють і коливальні процеси, що виникають в трубопроводі, обумовлені структурованим

рухом аеросуміші і хвилями «стиснення - розрідження» газоматеріального потоку.

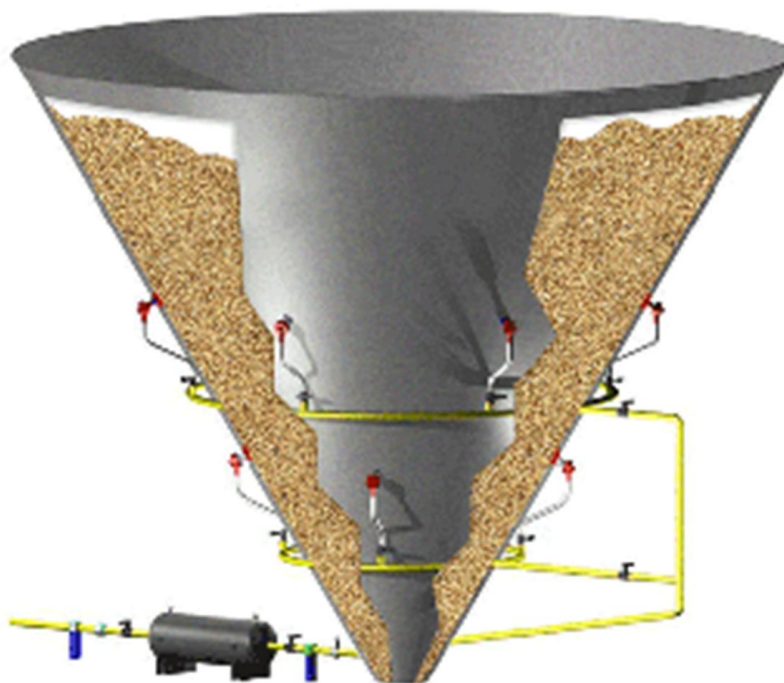
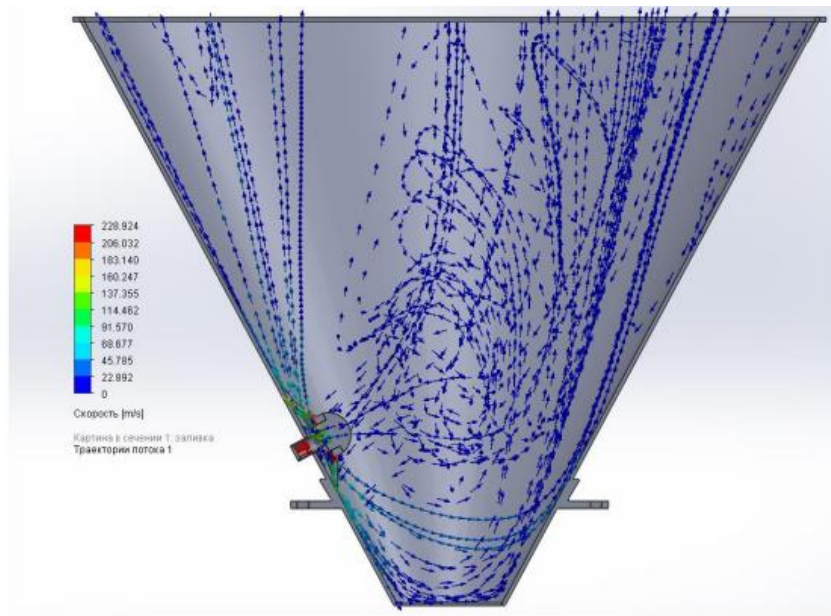


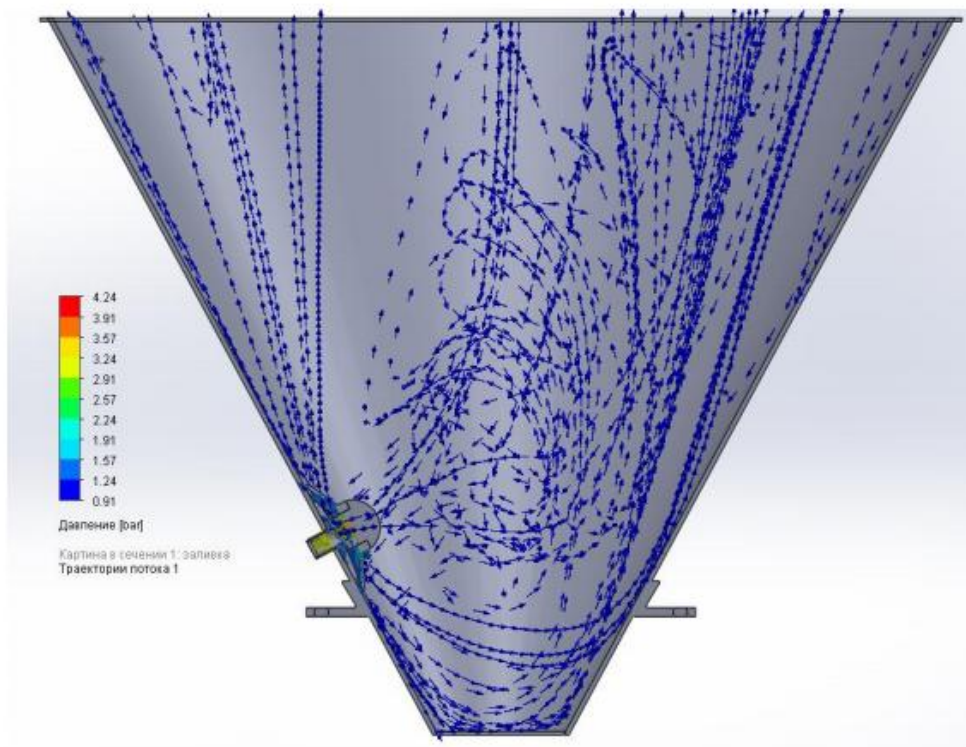
Рис.3.6. Узагальнена 3Д модель процесу деструкції під час подачі сипких харчових продуктів

Отримані результати дослідження електропневматичного клапану у складі компоновки пневмосоплової системи із пристроєм деструкції склепоутворення, дозволили отримати такі результати: - швидкість потоку повітря на виході із сопла складає 260м/с, за умови довжини каналу 0,6м. Покрокова зміна тиску відбувається у межах від 2 до 7 бар з урахуванням довжини каналу 0,6м; - на виході клапану відстежується чітка турбулізація потоку та спостерігається перехід в надкритичний режим руху газового середовища, що забезпечує достатньо повний імпульс для деструкції; - отримані результати при обробці лінії тренду в ПП Excel поліноміальної апроксимації в межах  $R^2 = 0.95 \dots 0.96$  що свідчить про адекватність створеної моделі. Використавши отримані

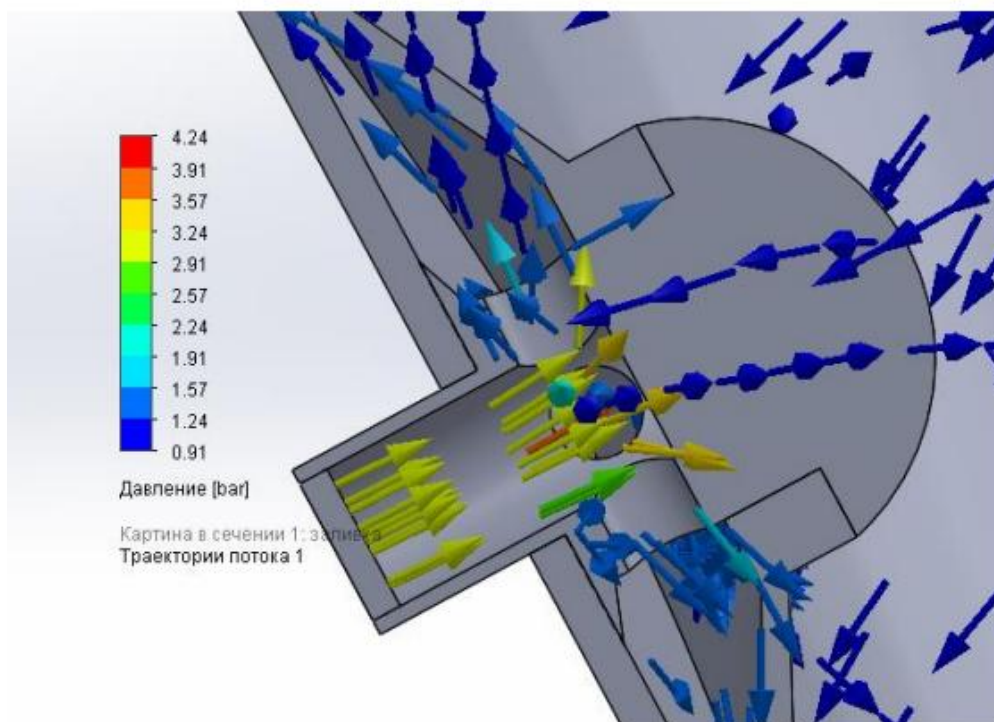
результати досліджень пневмосоплової системи будуюмо модель та проводимо дослідження процесу витоку та розповсюдження потоків в бункері.



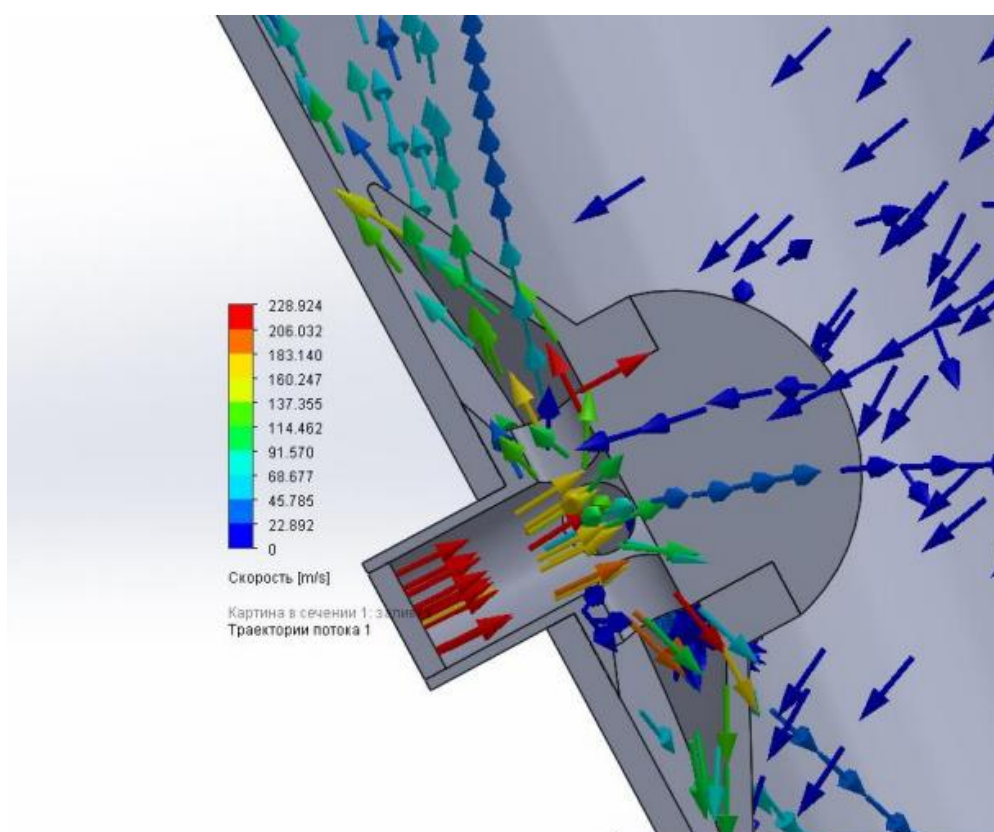
a)



б)



в)



г)

Рис. 3.6 Отримані результати досліджень розповсюдження потоків в бункері а) 3D переріз бункеру з відображенням швидкості потоку; б) 3D переріз бункеру з

відображенням тиску; в) 3D переріз соплової системи з відображенням розподілу тиску; г) 3D переріз соплової системи з відображенням швидкості потоку.

Проаналізувавши отримані результати можна зробити висновок, що вибрана конструкція забезпечує розподілення потоку повітря в зоні ймовірного утворення склепів, що запобігає їх утворенню або безпосередньо руйнує вже сформовані.

Отримані теоретичні результати підтверджують ефективність застосування пневмосоплових систем для забезпечення безперервності операцій фасування та дозування сипких харчових продуктів.

### **3.3. Результати математичного та фізичного моделювання процесів пневмотранспортування**

На рис.3.3. показано результати розрахунку по розробленій математичній моделі.

Перший етап показує вихід установки на стаціонарний режим пневмотранспортування. У міру накопичення в подає ресівері повітря (рис.1), швидкість і тиск зростають (рис.5, а).

Стаціонарний режим обумовлюється швидкістю і тиском повітря які в процес і роботи установки залишаються постійними, з урахуванням режиму транспортування.

Швидкість повітря і тиск на вході - є основними умовами для початку транспортування продукту.

Другий етап пов'язаний зі сталим режимом транспортування продукту. Розгін матеріалу обумовлений інтервалом часу 0,1 ... 0,3 с і залежить від встановлених режимів управління подачі стисненого повітря. На (рис.3.3, б) чітко видно

розподілу лінійної швидкості переміщення дрібно-штучного продукту при русі в каналі продуктопроводу під тиском.

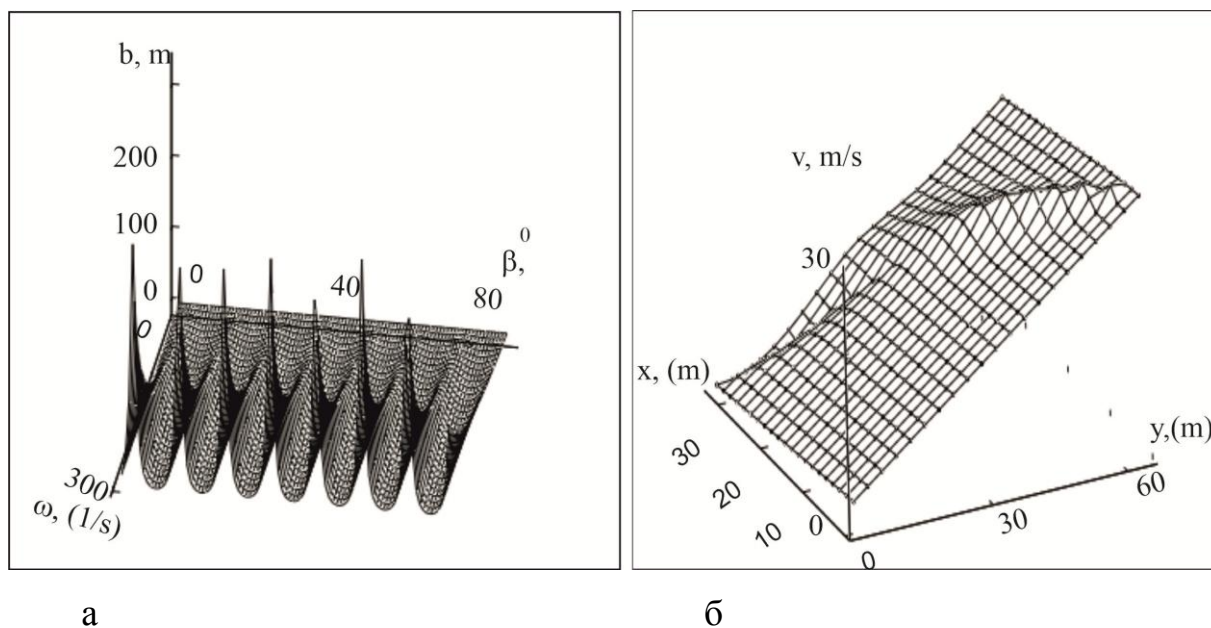


Рис. 3.7. Кінематичні параметри транспортування дрібно-штучного продукту у різних ділянок пневмотранспорту: а – изменение углової скорости  $\omega$  движения частички после контакта со стенкой продуктопровода; б – изменение линейной скорости перемещения мелко-штучного продукта  $v$  при движении в канале продуктопровода под давлением

Це підтверджує результати моделювання [7], щодо впливу місцевих опорів на підвищення питомих втрат тиску. Метою фізичного моделювання є визначення тиску в каналі пневмотранспортуванні за умови імпульсної подачі стисненого повітря, а також оцінка енергетичних витрат. Фізичне моделювання процесу при пневмотранспортуванні проводилося для дрібно-штучних продуктів з описаними вище умовами режиму роботи і властивостей продукту.

На рис. 3.8. наведені результати моделювання режимів при пневмотранспортуванні дрібно-штучного продукту (сушений перець горошок) в робочому каналі продуктопроводу з різними умовами формування імпульсу

стисненого повітря. Отримано значення реально змінюється тиску в каналі. Це дає можливість ставити правильні діапазони зміни тиску в задачах математичного моделювання. Вплив збурень тиску стисненого повітря під час роботи пневмопродуктопровода, може формувати псевдостационарний режим. Коли криві 1-3, рис.3.4 описують тривалі тимчасові затримки під час подачі стисненого повітря в канал, понад 1с. Тоді в горизонтальній частині може утворюватися під стильний шар, транспортування ускладнюється. Криві 4-7, рис.3.4. з інтервалами затримки до 0,2 с дозволяють описати стаціонарний режим пневмотранспортуванні за умови неперіривного нагнітання продукту. Максимальна частота імпульсів в пневмотранспорті становила до 1,5 ... 20Гц, при тиску до 2,5 бар.

Отримані результати моделювання дозволяють шляхом механіко-математичних досліджень описати залежності основних кінематичних параметрів транспортування продукту і передбачити падіння напірного тиску.

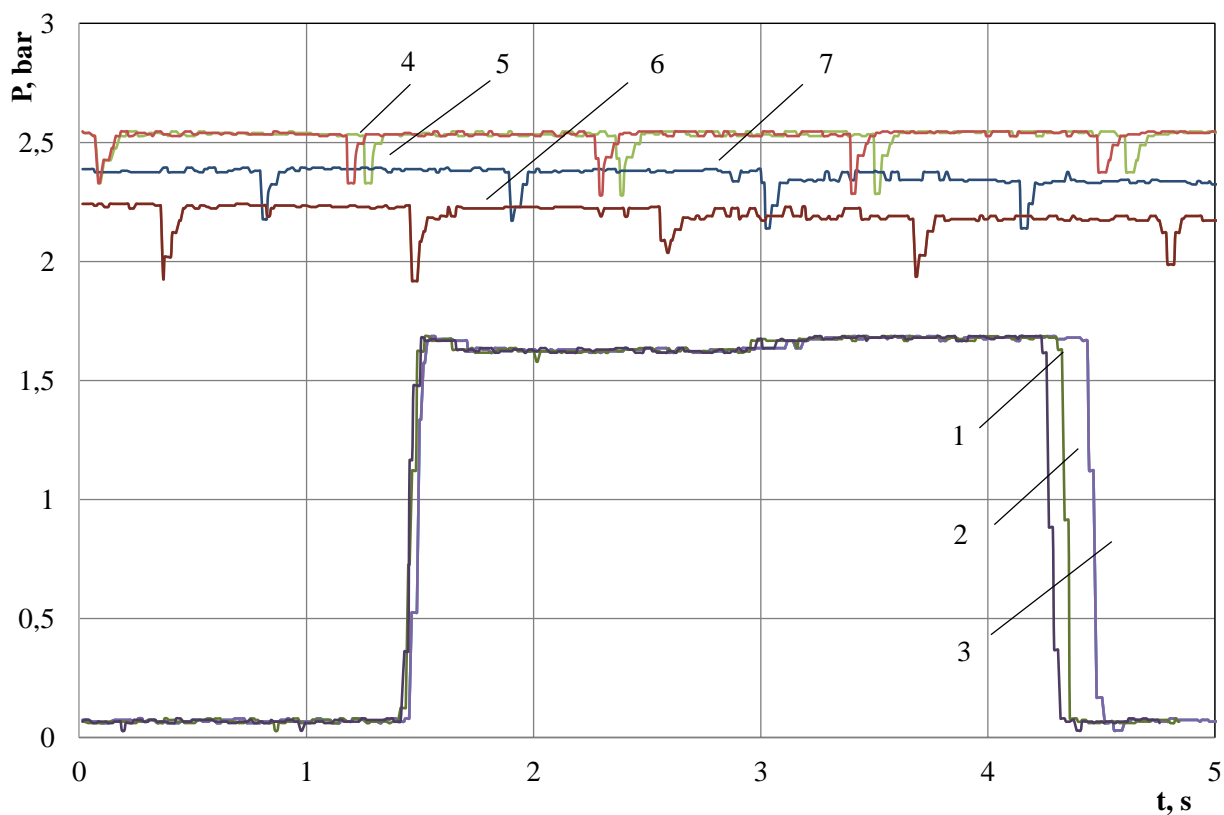


Рис. 3.8. Експериментальні дані зміни тиску в каналі стенду з режимами: 1 -  $I_{max}..I_{min} = 4,1..19,9$  мА, частота подачі повітря 0,3 Гц; 2 -  $I_{max}..I_{min} =$

4,1..19,9 мА, частота подачі повітря 0,35 Гц; 3 -  $I_{\max}..I_{\min} = 4,1..19,9$  мА, частота подачі повітря 0,37 Гц; 4 –  $I_{\max}..I_{\min} = 12,0..19,9$  мА, частота подачі воздуха 0,6 Гц; 5 –  $I_{\max}..I_{\min} = 12,0..19,9$  мА, частота подачі воздуха 0,75 Гц; 6 –  $I_{\max}..I_{\min} = 12,0..19,9$  мА, частота подачі воздуха 0,5 Гц; 7 –  $I_{\max}..I_{\min} = 12,0..19,9$  мА, частота подачі воздуха 1 Гц частота подачі повітря 0,75 Гц; 6 -  $I_{\max}..I_{\min} = 12,0..19,9$  мА, частота подачі повітря 0,5 Гц; 7 -  $I_{\max}..I_{\min} = 12,0..19,9$  мА, частота подачі повітря 1 Гц

Наведені на рис. 3.8 результати змін тиску на вході в пневмопродуктопровід, обумовлені внутрішніми коливаннями тиску 20 Гц за 1 цикл подачі тиску. Такий режим подачі повітря організований драйвером серії 130, (рис.2). У той же час зазначені режими транспортування залежать не тільки від тиску [18], а й від виду переміщуваного продукту.

Перш за все, була врахована форма робочого каналу пневмотранспортуванні і діаметральний перетин робочого каналу. У міру збільшення часу подачі стисненого повітря в продуктопровід, кількість екструзійних частинок досягає максимуму в діапазоні 0,1 ... 0,2 с (рис.3.8).

Даний показник змінюється в залежності від налаштування керуючого контуру (рис.3.8). Керуючі значення струму, щодо стандартної шкали,  $I_{\max}..I_{\min} = 4,1..19,9$  мА, частота формування імпульсів стисненого повітря в продуктопроводі - 0,1 ... 1,3с. Попередньо значення керуючого сигналу, сформували максимальний тиск в трубі 1,7 ... 2,5 бар. Що підтверджує результати роботи [11] і обумовлює оптимальний режим при пневмотранспортуванні досліджуваного продукту.

У теоретичній моделі були враховані реальні кінематичні характеристики окремих частинок дрібно-штучних продуктів і їх можливий контакт з внутрішньою поверхнею продуктопроводу; зміна геометричних параметрів каналу пневмотранспортуванні продукту. З урахуванням умов зміни характеристик руху частинок після ударного взаємодії з внутрішньою поверхнею циліндричної частини продуктопроводу, - уточнені рівняння їх

переміщення як у поверхонь циліндра, так і в обсязі робочого каналу в цілому. Для стійкої роботи пневмотранспорту рекомендується швидкість газу, що перевищує в 1,5-2 рази швидкість витання частки матеріалу, що транспортується (рис.3.8).

Встановлено, що шар дрібно-штучного продукту, пронизує висхідним потоком стисненого повітря, може перебувати в двох якісно різних стаціонарних станах. При швидкості потоку нижче 5 м / с, тобто деякої критичної величини, тверді частинки нерухомі (рис. 3.8). Пневматична опір зростає зі збільшенням швидкості до 15-20 м / с - шар зважується, твердіча стінки втрачають колишній взаємний контакт, отримують можливість переміщатися і перемішуватися. Шар розширюється, на його вільній поверхні видно хвилі і сплески (рис.3.8).

Аналіз результатів моделювання показав, що можна зробити висновок, - загальна втрата тиску в трубопроводі при пневмотранспортуванні, складається: з втрат тиску, що виникають при русі чистого повітря; додаткових втрат тиску, що виникають при русі матеріалу; втрат тиску на підтримку транспортується в підвішеному стані на вертикальній ділянці; втрат тиску на розгін транспортування часток при залученні їх в транспортний трубопровід

У той же час запропонований підхід дозволяє отримати аналогічні залежності для інших режимів транспортування.

Подальші дослідження планується виконати для аналізу процесів при пневмотранспортуванні інших видів дрібно-штучних продуктів, з урахуванням величини тиску потоку системи пневмотранспорту: низького тиску до 0,1 МПа; середнього тиску від 0,11 до 0,3 МПа.

### **3.4. Висновки до розділу 3**

Поліпшення технічних показників пневмотранспорту досягається інтенсифікацією масопереносу шляхом використання структурованих режимів руху аеросуміші, тобто хвильового і порційного.

Результати моделювання, щодо впливу місцевих опорів на підвищення питомих втрат тиску, підтвержені натурним експериментом. За допомогою фізичного моделювання, визначено значення тиску в каналі при пневмотранспортуванні, за умови імпульсної подачі стисненого повітря, а також оцінка енергетичних витрат. Фізичне моделювання процесу при пневмотранспортуванні проводилося для дрібно-штучних продуктів з описаними вище умовами режиму роботи і властивостей продукту

Розроблено фізичні і математичні моделі масопереносу сипучих матеріалів при структурованих режимах руху аеросуміші. Обґрунтовано, що найбільш перспективним є використання хвильового або порційного режимів руху аеросуміші, для яких різницю швидкостей несомой і несучої компоненти мінімальна.

Пояснення явищ, що протікають при русі аеросуміші в пневмотранспортних трубопроводів, дозволило намітити і здійснити ряд нових технічних рішень щодо вдосконалення пневматичного транспорту сипучих матеріалів на основі використання структурованих режимів руху аеросуміші.

## **РОЗДІЛ 4**

### **ОХОРОНА ПРАЦІ**

#### **4.1. Вимоги безпеки перед початком роботи**

Перед включенням будь-якого апарату у роботу необхідно перевірити

наявність і стан запобіжних захисних засобів та сигналізуючих пристроїв, заземлення (занулення) корпусу, а також цілісність ізоляції кабелю і елементів штепсельного роз'єднання.

Перевірити наявність гумового килимка перед електрошафою керування на підлозі.

Перед початком роботи оглядають обладнання та перевіряють його готовність до роботи. При необхідності, перевіряють окремо пневматичний та електричний контур живлення.

Під час виконання окремих операцій, які не можуть бути автоматизовані, необхідно передбачати пристосування і засоби малої механізації, що знижують, або виключають вплив небезпечних факторів на працюючих, усувають безпосередній контакт працівника із шкідливими речовинами.

Експлуатацію електрообладнання, пристроїв електроосвітлення необхідно здійснювати відповідно до вимог Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів, затверджених наказом Комітету по нагляду за охороною праці Міністерства праці та соціальної політики України від січня 1998 року № 4, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України лютого 1998 року за № 93/2533 (НПАОП 40.1-1.21-98), і Правил безпечної експлуатації електроустановок, затверджених наказом Державного комітету України по нагляду за охороною праці від 06 жовтня 1997 року № 257, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 13 січня 1998 року за № 11/2451 (НПАОП 40.1-1.01-97).

Роботи з пожежонебезпечними речовинами, матеріалами (розчинниками, антиадгезійними мастилами) потрібно проводити при постійно працюючій загальнообмінній і місцевій вентиляціях.

При проведенні зварювальних та інших вогневих робіт у виробничих приміщеннях виготовлення деталей з ПКМ необхідно дотримуватись вимог Інструкції з організації безпечного ведення вогневих робіт на вибухопожежонебезпечних та вибухонебезпечних об'єктах, затвердженої наказом Міністерства праці та соціальної політики України від 06 червня 2001 року № 255, зареєстрованої в Міністерстві юстиції України 23 червня 2001 року за № 541/5732 (НПАОП 0.00-5.12-01).

Огляд, чищення поверхонь і вузлів устаткування, мереж енергоносіїв необхідно проводити при повністю відключеному обладнанні та знеструмлених мережах. При цьому необхідно вживати заходів, що перешкоджають їх випадковому включенню.

Чищення, огляд внутрішніх поверхонь обладнання (термопечей, камер нанесення антиадгезійного мастила) потрібно проводити після ретельного продування повітрям. Продувку слід проводити при працюючій вентиляції.

Зачищення поверхонь устаткування, видалення затверділих залишків стрічок, зв'язуючих необхідно здійснювати інструментом, що виключає іскроутворення (з латуні, міді тощо).

#### **4.2. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях**

Вимкніть пневмаитчний контур живлення та електричний, і припиніть роботу на обладнанні до виклику механіка і отримання дозволу на подальшу експлуатацію в наступних випадках:

- при несправності обладнання і приладів автоматики,
- при відчутті напруги на корпусі установки,
- у разі травмування, нездужання.

У разі несправності вивісити попереджувальний напис.

Якщо є потерпілі надавати їм першу (долікарську) медичну допомогу; при необхідності викликати швидку допомогу. Повідомте про нещасний випадок керівника та інженера з охорони праці.

При виникненні пожежі приступити до її гасіння наявними засобами пожежогасіння та викликати пожежну частину.

Виконувати всі вказівки заступника директора з господарської роботи по усуненню небезпечної ситуації.

### **4.3. Вимоги до персоналу**

Працівники, які обслуговують машини станки і механізми з електроприводом (неелектротехнічний персонал), застосовують в роботі ручний електроінструмент, виконують ручні ремонтно-налагодочні роботи обладнання, що має електроустановки, або виконують інші роботи, де є небезпека ураження електричним струмом, повинні мати першу групу по електробезпеці.

Перелік професій цього персоналу визначається керівником підприємства спільно з інженером по охороні праці.

Група по електробезпеці I (неелектричному персоналу ) присвоюється після щорічної перевірки знань безпечних методів роботи по обладнанню, що обслуговується, особою, відповідальною за електрогосподарство підприємства, або по його письмовій вказівці особою з групою по електробезпеці не нижче – (третьої). Присвоєння I групи оформляється в спеціальному журналі з підписами перевіряючого і працівника, знання якого перевіряють.

В процесі роботи персонал з I групою, крім щорічної перевірки знань, періодично, але не рідше одного разу на 3 місяці проходять інструктаж по охороні праці.

Однією з причин враження електричним струмом можуть бути оголені провoda, відкриті рубильники, не закрите розподільче устаткування, підігрівачі з відкритими нагрівальними елементами, пошкоджена електроапаратура, несправні електрозаземлюючі пристрої.

Забороняється відкривати, вмикати, торкатися руками або предметами установок, якщо обслуговування їх не входить в коло обов'язків.

Необхідно виконувати тільки ту роботу, по якій отримано інструктаж по охороні праці і на яку видане завдання, не передоручати свою роботу іншим особам.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено математичну модель процесу при пневмотранспортуванні дрібно-штучних продуктів. Модель включає диференціальні рівняння руху для окремих частинок в потоці, а також оцінена їх поведінка після зіткнення. Граничні умови враховують вплив режимів при пневмотранспортуванні і геометрію продуктопроводу.

2. Теоретично досліджено процес управління критичними режимами при пневмотранспортуванні на основі пропорційних елементів і зворотного зв'язку (струмова петля 4-20 мА); дослідження процесу руйнування кластера продуктів за допомогою повітряної хвилі і контрольованої декомпресії. Результати дослідження показали, що використання розробленої моделі дозволяє врахувати швидкості і контролювати тиск на вході в продуктопровід.

3. Розроблено узагальнену фізичну модель процесу та перевірені, порівнянням результатів, щодо зміни режимів по тиску та їх вплив на розподілу продукту під час транспортування. Дослідження були проведені для окремих видів продуктів - сушений чорний перець горошок, а також один з найбільш поширених сухих гранульованих сніданків з зерновими.

Керуючі значення струму, щодо стандартної шкали,  $I_{max}..I_{min} = 4,1..19,9$  мА, частота формування імпульсів стисненого повітря в продуктопроводі - 0,1 ... 1,3с. Попередньо значення керуючого сигналу, сформувавши максимальний тиск в трубі 1,7 ... 2,5 бар.

4. Розроблена модель дозволяє розрахувати координату частинки продукту при зіткненні із внутрішньою поверхнею продуктопроводу, а також зміна її кінематичних характеристик.

5. Змодельовано та змонтовано експериментальний стенд для дослідження робочих режів пневмотранспортуючих систем сипких харчових продуктів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Справочник специалиста пищевых производств Соколенко А.И., Украинец А.И., Яровой В.Л - К.: АртЭк, 2003 – 340с.
2. Соколенко А.І., Піддубний В.А, Особливості трансформацій енергоматеріальних потоків у замкнених циркуляційних контурах - .2017. - Наукові праці НУХТ.- Issue.-.23,- № 3. – С.101-106
3. Raheman, Hifjur & Jindal, V. (2001). Pressure drop gradient and solid friction factor in horizontal pneumatic conveying of agricultural grains. *Applied Engineering in Agriculture* 2, 4–8. doi: <https://www.researchgate.net/publication/270862038>
4. Raheman, Hifjur & Jindal, V. (2001). Solid velocity estimation in vertical pneumatic conveying of agricultural grains. *Applied Engineering in Agriculture*, 7, 233–245. doi: 10.13031/2013.6903
5. Cui, Heping (2006). Pneumatic conveying of biomass particles: A review. *China Particuology*, 4, 183–188. doi: 10.1007/s10556-015-9990-6.
6. Тимошенко, В.И. (2013). Пневмотранспорт сыпучих материалов с повышенным давлением несущего газа. *Наука та інновації*, Т.9, №1, 5–17.
7. Криль, С.И., Чальцев, М.Н. (2010). К вопросу о методиках расчета основных параметров пневмотранспорта сыпучих материалов по горизонтальным трубам. *Прикладная гидромеханика*. Т. 12, № 4, 36–44.
8. Dixon, G. (1981). Chapter “Pneumatic conveying”. In: Butters, G. (ed.) *Plastics Pneumatic Conveying and Bulk Storage*. Applied Sciences Publisher, Reading, 343. doi: <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3609-4>
9. Gyenis, Arva, J., (1994). Steady state particle flow in mixer tubes equipped with motionless mixer elements. In: Tattersson, G.B., Calabrese, R.V., Penney, W.R. (eds.) *Industrial Mixing Technology, AIChE Symposium, Series 90*, 144–156.
10. Orozovica, A., Lavrineca, A. (2020). Transport boundaries and prediction of the slug velocity and layer fraction in horizontal slug flow pneumatic conveying. *Chemical Engineering Science*, Volume 227, 247—257. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2020.115916>

11. Zhang, P., Roberts, R.M. & Bénard, A. (2012). Computational guidelines and an empirical model for particle deposition in curved pipes using an Eulerian–Lagrangian approach. *Journal of Aerosol Science* 53 (Supplement C), 1–20.  
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021850212000997>
12. Rohrig, R., Jakirlic, S. & Tropea, C. (2015). Comparative computational study of turbulent flow in a 90° pipe elbow. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 55, 120–131.  
doi:10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.07.011
13. Li K., Kuang S. B., Pan R. H. (2014). Numerical study of horizontal pneumatic conveying: effect of material properties, *Powder Technology*, vol. 251, 15–24. doi: 10.1016/j.powtec.2013.10.013
14. Yang, D. L., Li J. P., Du C. L. (2015). Injection performance of a gas–solid injector based on the particle trajectory model. *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 23, 34.  
URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/c9b8/2cfff90a014d0327e7c6f56364b7c7f3234a.pdf>
15. Gavva, O., Kryvoplias-Volodina, L. (2017). Structural parametric synthesis of hydro–mechanical drive of hoisting and lowering mechanism of package-forming machines. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies*, 5/7 (89), 39–44. doi: 10.15587/1729–4061.2017.111552
16. Василевский, М.В., Романдин, В.И., (2013). Транспортировка и осаждение частиц в технологиях переработки дисперсных материалов: монография. Томск: Изд–во Томского политехнического университета, 288.
17. Шишкин, С.Ф., Гаврилюк, Д.Н. (2009). Расчёт высоконапорного пневмотранспорта. *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. № 3, 114–117.
18. Berger, S.A., Talbot, L. (2003). Flow in curved pipes. *Annu. Rev. Fluid Mech*, 15, 461–512. doi: <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.15.010183.002333>

19. HasanGhafori (2018). Numerical and experimental study of an innovative pipeline design in a granular pneumatic–conveying system *Particology*, Volume 38, June 2018, 196–203. doi: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2017.07.007>
20. MarleneSilvadeMoraes, (2017). Experimental quantification of the head loss coefficient  $K$  for fittings and semi–industrial pipe cross section solid concentration profile in pneumatic conveying of polypropylene pellets in dilute phase. *Powder Technology*, 250–263.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.01.039>
21. Rajan, K.S. (2008). Experimental study of thermal effectiveness in pneumatic conveying heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*. Volume 28, Issues 14–15, October 2008, 1932–1941.  
doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.12.004>
22. Zhang, H., Liu, M. (2012). Dense gas–particle flow in vertical channel by multi–lattice trajectory model. «*Science in China*» Series E: Technological Sciences, vol. 55, no. 2, 542–554. doi: <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4578-7>
23. Pressure and temperature influence on the friction coefficient of granular polymeric materials on the metal surfaces / V. Vytvytskyi, I. Mikulionok, O. Sokolskyi, O. Gavva // *Ukrainian Food Journal*. – Україна, V.6, Is. 3. – 2017. – p.452-462. <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/26698>
24. Kryvoplyas-Volodina L., Gavva O., Volodin S., Hnativ T. Dynamics of mechatronic function modules drives of flow technological lines in food production. *Ukrainian Food Journal*. Kyiv, Ukraine. 2018. Vol. 7 (Issue 4). P.650-661. <http://ufj.ho.ua/Archiv/UKRAINIAN%20FOOD%20JOURNAL%202018%20V.7%20Is.4.pdf>
25. Егоров В. Б. Генезис систем автоматического управления технологическими процессами: монография / Егоров Виктор Богданович ; Одес. Нац. Акад. пищевых технологий. – Херсон : ОЛДИ-ПЛЮС, 2018. – 244 с. : табл., рис. – Библиогр.: с. 226-243. – ISBN 978-966-289-167-6

26. Mikulionok I.O., Gavva O.M., Kryvoplias-Volodina L.O. Modeling of melting process in a single screw extruder for polymer processing. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Series «Applied physics». 2018. № 2/5 (92) 2018. С. 4-11. <http://dspace.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/27884>
27. Еникеев Г. Г. Математические модели эффективности роторных воздухоочистителей ВРД // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков: ХАИ, 2006. С. 33–37.
28. Справочник специалиста пищевых производств. Книга 2. Теплофизические процессы. Энергосбережение / Соколенко А.И. и др. Київ: АртЕк, 2003. 423 с.
29. Пристрій для рекуперативного повернення теплової енергії в системах теплообміну між двома газовими потоками: пат. на корисну модель 14523 Україна: МПК F25B 1/10 (2006.01) / Соколенко А.І., Шевченко О.Ю., Резнік В.Г., Піддубний В.А.; власник НУХТ. № u200511369; заявл. 30.11.2005; опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5.
30. Система рекуперації енергетичних потоків у виробництві солоду: пат. на корисну модель 15647 Україна: МПК C12C 7/00, F25B 1/00 / Соколенко А.І., Шевченко О.Ю., Бут С.А., Піддубний В.А., Резнік В.Г.; власник НУХТ. № u200512657; заявл. 27.12.2005; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7.
31. Shevchenko O.J. (2006). Scientific basis and hardware design of processes for longterm storage of food, NUFT, Kyiv.
32. Крутіков Г. А. Синтез енергозберігаючих гідропневмоагрегатів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.05.17 «Гідравлічні машини та гідропневмоагрегати»/ Крутіков Геннадій Анатолійович — Харків, 2011. — 35 с.
33. Евдокимов А.И. Схемы энергосбережения для пневматических приводов/ А.И. Евдокимов, В.А. Осипов // Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей. — 2003. — С. 364 — 365.

34. Александров А.Н., Козориз Г.Ф. Пневмотранспорт и пылеулавливающие сооружения на деревообрабатывающих предприятиях: Справочник –М.: Лесная пром-сть, 1988.-248 с. -
35. Determining the best modeling assumptions for cyclones and swirl tubes byCFD and LDA / W. Peng, P. Boot, A. Udding, A.C. Hoffmann and other.International Congress for particle Technology PARTEC 2001. Nuremberg, GermanyMarch 2001. pp. 27-29.
36. Кузнецов В.С. Пневматический транспорт на деревообрабатывающих предприятиях. Аспирационные установки: Учебное пособие. - Братск: ГОУ В ПО «БрГТУ», 2004.- 152 с.
37. Таубер Е.А., Калитиевский Р.Е., Громцев Е.К. Внутриводской транспорт. – М.: Лесная пром-сть, 1978. – 239 с.
38. Воронин Ю.Б. Пневмотранспорт измельченной древесины.
39. М.; Пат. № 29965 Україна, B01D45/00 Мокрий пиловловлювач із спеціальною формою жалюзі / Батлук В. А., Проскуріна І.В., Мельников О.В., від 08.05. 2007. B01D45/00, опубл. 11.02.2008 бюл. № 3.
40. Воронин Ю.Б. Специальные виды транспорта на деревообрабатывающих предприятиях. Пневматический транспорт: Учебное пособие. - Братск: БрИИ, 1991. – 81с
41. Gousthine V. Synergetychna koncepcja opracowywania nowych instalacji transport pneumatycznego dla przemyslu odlewniczego / V. Gousthine // nowoczesne odlewnicze. – Ochrona srodowiska, III miedzyna, rodnova konferengja. Krakow, 7-9 wrzsnia, 2000. – P. 69-76.
42. Dmitrienko D. Modeling the motion of particles in the pneumatic transport mills / D. Dmitrienko, S. Lenich // Teca Kom. of Mot. and Energ. in Arg. – 2012, Vol. 12, № 3, P.19-23
43. Нечаев Г.І. Моделювання руху частинок вугілля в пневмотранспортних подріблювальних установках / Г.І. Нечаев, Д.В. Дмитренко, С.В. Леніч// Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В.Даля. – Луганськ, 2012. - №9(180) частина 1. – С. 71-76.

44. Гуцин В.М. Нова концепція та її реалізація в розробках високоефективних засобів пневматичного транспортування сипучих матеріалів / В.М. Гуцин // Машинознавство, 2000, №2 (23). – С. 39-43.

45. Волошин А.И. Механика пневмотранспортирования сыпучих материалов / А.И. Волошин, Б.В. Пономарев. – К.: Наук. думка, 2001. – 519с.

46. Смолдырев А.Е. Гидро и пневмотранспорт в металлургии / А.Е Смолдырев. – М.: Металлургия, 1985. – 280с.

47. Потураев В.Н. Вибрационно-пневматическое оборудование сыпучих материалов / В.Н. Потураев, В.И. Волошин, Б.В. Пономарев. – К.: Наук. Думка, 1989. – 248с.

## ДОДАТКИ