

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ПОЛТАВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА ІМЕНІ ЮРІЯ КОНДРАТЮКА»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та робототехніки
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

Магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему:

**Дослідження особливостей роботи пневматичного змішувача
для приготування сухих теплоізоляційних сумішей**

Виконав: студент II курсу, другого
(магістерського) рівня, групи 601-мММ,
спеціальності

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

Мороз І. Г.

(прізвище та ініціали)

Керівник Рогозін І. А.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Захарченко Р. В.

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

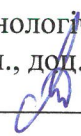
**Дослідження особливостей роботи пневматичного змішувача
для приготування сухих теплоізоляційних сумішей**

Кваліфікаційна робота магістра

Лист затвердження

ГММ.601-мММ.011-00.00.000КРМ - ЛУ

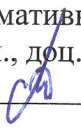
Технологічний контроль
к.т.н., доц.

 Олексій ВАСИЛЬЄВ
„19” 01 2026 р.

Розробив студент групи 601-мММ

 Ігор МОРОЗ
„19” 01 2026 р.

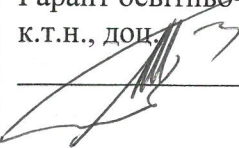
Нормативний контроль
к.т.н., доц.

 Олексій ВАСИЛЬЄВ
„19” 01 2026 р.

Керівник к.т.н., доц.

 Іван РОГОЗІН
„19” 01 2026 р.

Гарант освітньо-професійної програми
к.т.н., доц.

 Микола НЕСТЕРЕНКО
„19” 01 2026 р.

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



Олександр ОРИСЕНКО

Перв. застосує.	№ рядка	Формат	Позначення	Найменування	Кіл. аркушів	№ екз.	Примітка	
			1					
			2		Документація загальна			
			3					
			4		Вперше розроблена			
Справ. №	5							
	6	A4	ГММ.601-МММ.011-00.00.000ТЗ	Технічне завдання	1	-		
	7	A4	ГММ.601-МММ.011-00.00.000А	Анотація	2	-		
	8	A4	ГММ.601-МММ.011-00.00.000ПЗ	Пояснювальна записка	71	-		
	9							
	10			Документація наукова				
	11							
	12			Вперше розроблена				
	13							
	14	A4	ГММ.601-МММ.011-00.00.000ПМ	Дослідження особливостей				
	15			роботи пневматичного				
	16			змішувача для приготування				
	17			сухих теплоізоляційних				
Підп. і дата	18			сумішей				
	19			Презентаційні матеріали	14	-		
	20							
	21							
	22							
	23							
	24							
Підп. і дата								
Інв. № орг.	Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	ГММ.601-МММ.011-00.00.000ВР		
	Розраб.	Мороз			19.01	Літ	Аркуш	
	Перев.	Рогозін			19.01	Н	Аркушів	
	Інконтр.	Васильєв			19.01		1	
	Затв.	Орисенко			19.01	Національний університет імені Юрія Кондратюка, ННІ ІТР, 2026 р.		
Дослідження особливостей роботи пневматичного змішувача для приготування сухих теплоізоляційних сумішей							Формат А4	
Відомість кваліфікаційної роботи магістра								
Копіював								

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка
(повне найменування вищого навчального закладу)

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

Кафедра, циклова комісія галузевого машинобудування та мехатроніки

Ступінь вищої освіти магістр

Напрямок підготовки _____

(шифр і назва)

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри, галузевого
машинобудування та мехатроніки,**

к.т.н., доц.

Олександр ОРИСЕНКО
"03" 09 2025 року

**З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Морозу Ігору Геннадійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема магістерської роботи Дослідження особливостей роботи пневматичного
змішувача для приготування сухих теплоізоляційних сумішей

керівник роботи (проекту) Рогозін Іван Анатолійович, к.т.н.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «03» вересня 2025 року №1015-ф.а.

2. Строк подання студентом роботи (проекту) «12» січня 2026 року.

3. Вихідні дані до кваліфікаційної роботи магістра: Характеристики сухих
будівельних сумішей. Технічні характеристики змішувачів будівельних
матеріалів.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно
розробити): Вступ. 1. Обґрунтування теми магістерської роботи. 2. Теоретичне
дослідження особливостей роботи пневматичного змішувача. 3. Методика підбору
раціональних параметрів пневматичного змішувача для теплоізоляційних
матеріалів. Висновки. Список літератури.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
Дослідження особливостей роботи пневматичного змішувача для приготування
сухих теплоізоляційних сумішей. – Презентаційні матеріали.

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

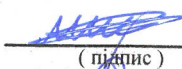
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання «03» вересня 2025 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

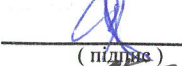
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Обґрунтування теми магістерської роботи	15.10.2025 р.	
2	Аналіз літературних джерел	29.10.2025 р.	
3	Розроблення теоретичної моделі робочого процесу пневматичного змішувача	26.11.2025 р.	
4	Розроблення методики підбору раціональних параметрів пневматичного змішувача	03.12.2025 р.	
5	Аналіз результатів дослідження та формування висновків	10.12.2025 р.	
6	Оформлення презентаційних матеріалів	17.12.2025 р.	
7	Оформлення пояснювальної записки роботи, виправлення зауважень	24.12.2025 р.	
8	Здача готової кваліфікаційної роботи	12.01.2026 р.	

Здобувач вищої освіти


(підпис)

Ігор МОРОЗ
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи


(підпис)

Іван РОГОЗІН
(ім'я та прізвище)

Гарант освітньої програми


(підпис)

Микола НЕСТЕРЕНКО
(ім'я та прізвище)

Анотація

Мороз І. Г. Дослідження особливостей роботи пневматичного змішувача для приготування сухих теплоізоляційних сумішей. – Рукопис.

Магістерська робота на здобуття ступеня вищої освіти «магістр» зі спеціальності 133 – Галузеве машинобудування. – Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, 2026.

У роботі виконано аналіз характеристик сухих будівельних сумішей різного призначення, а також обладнання для їх виготовлення. Виявлено проблему із процесом приготування сухих теплоізоляційних сумішей, котрі мають суттєву різницю у густині окремих компонентів суміші. Визначено, що найбільш ефективними для роботи з сухими теплоізоляційними сумішами є пневматичні змішувачі із спеціальними модифікаціями. Як найбільш адаптований до різної густини компонентів обрано пневматичний змішувач із конічним гвинтовим каналом.

Побудовано математичну модель робочих процесів для обраного пневматичного змішувача. Знайдено тангенційні та поздовжні складові швидкості руху повітряного потоку, витрати повітря, здійснено оцінку якості роботи змішувача та його продуктивності.

Розроблено методику підбору конструктивно-технологічних параметрів для забезпечення максимальної ефективності експлуатації пневматичного змішувача для заданих умов.

Ключові слова: суха будівельна суміш, теплоізоляційні матеріали, пневматичний змішувач, швидкість потоку, витрата повітря, конічний гвинтовий канал.

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000А				
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Анотація	Літ.	Лист	Листів	
Розроб.		Мороз		19.01					
Перев.		Рогозін		19.01			1	2	
						Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІ ІТР, 2026 р.			
Н. конт.		Васильєв		19.01					
Затв.		Орисенко		19.01					

Abstract

Moroz I. H. Investigation of the pneumatic mixer operation features for the preparation of dry thermal insulation mixes. – Manuscript.

Master thesis on obtaining educational degree «Master» in specialty 133 – Industrial Engineering. – National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, 2026.

The thesis analyzed the characteristics of dry building mixtures for various purposes, as well as equipment for their production. A problem was identified with the dry thermal insulation mixes preparing process, which have a significant difference in the density of individual components of the mixture. It was determined that the most effective for working with dry thermal insulation mixes are pneumatic mixers with special modifications. A pneumatic mixer with a conical helical channel was selected as the most adapted to different densities of components.

A mathematical model of the working processes for the selected pneumatic mixer was built. Tangential and longitudinal components of the air flow velocity, air flow rate were found, the quality of the mixer operation and its productivity were assessed.

A method for selecting design and technological parameters to ensure maximum operation efficiency of the pneumatic mixer for given work conditions was developed.

Key words: dry construction mix, thermal insulation materials, pneumatic mixer, flow velocity, flow rate, conical helical channel.

					ГММ.601-МММ.011-00.00.000А	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		2

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»
Кафедра галузевого машинобудування та мехатроніки

**Дослідження особливостей роботи пневматичного змішувача
для приготування сухих теплоізоляційних сумішей**

**Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи магістра**

ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ

Полтава – 2026 року

Зміст

Вступ.....	3
1 Обґрунтування теми магістерської роботи.....	5
1.1 Огляд інформації про сухі будівельні суміші	5
1.2 Огляд конструкцій змішувачів для приготування будівельних матеріалів.....	9
1.3 Модифікації пневматичних змішувачів	18
1.4 Конструкція змішувача адаптована для роботи із теплоізоляційними сумішами	25
2 Теоретичне дослідження особливостей роботи пневматичного змішувача	28
2.1 Попередні положення та припущення	28
2.2 Математична модель руху потоку повітря зі складовими суміші у камері змішувача.....	30
2.3 Аналіз результатів математичної моделі руху потоку у камері змішувача.	45
2.4 Конструктивні параметри змішувача	55
3 Методика підбору раціональних параметрів пневматичного змішувача для теплоізоляційних матеріалів	62
3.1 Початкові геометричні параметри змішувача.....	62
3.2 Конструктивно-технологічні параметри змішувача.....	63
Висновки	66
Список літератури	68

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Зміст	Літ.	Лист	Листів
Розроб.	Мороз			19.01		Н		
Перев.	Рогозін			19.01			2	1
Н. контр.	Васильєв			19.01		Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІ ІТР, 2026 р.		
Затв.	Орисенко			19.01				

Вступ

У будівельної галузі України виникла нагальна потреба у впровадженні нових рішень, спрямованих на оптимізацію використання наявних матеріально-сировинних ресурсів, а також на створення інноваційних видів будівельних матеріалів. Ці матеріали мають перевищувати існуючі аналоги за ключовими якісними показниками, водночас залишаючись більш економічно доступними. Вдосконалення сировинної бази відкриває можливість для розробки прогресивних сухих будівельних сумішей, які характеризуються підвищеними фізико-механічними властивостями. Гарантія високої якості таких сумішей досягається шляхом ретельно підбраного дозування компонентів у складі, а також завдяки використанню матеріалів зі спеціальними властивостями, належним чином адаптованих до технологічних вимог. Інакше в умовах війни та післявоєнного відновлення будівництво не зможе бути ефективним та максимально швидко закрити ті потреби у відновленні об'єктів, які є вже на сьогодні.

Серед ефективних матеріалів для будівельної промисловості особливо вирізняються сухі теплоізоляційні суміші, які активно використовуються для утеплення приміщень. Попит на такі матеріали з кожним роком лише зростає. Адже, ще декілька років тому питання енергоефективності не було настільки затребуваним і поширеним у суспільстві. А зараз це вже існуюча тенденція. Проте одним із технологічних викликів, пов'язаних із виготовленням композиційних сумішей, є різна густина компонентів. Наприклад, вермикуліт і перліт мають значно меншу густину порівняно з цементом і піском, що ускладнює їх рівномірне змішування. У таких випадках механічний вплив, незважаючи на свою ефективність, може призводити до подрібнення частинок, тому не завжди є оптимальним рішенням.

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Вступ	Літ.	Лист	Листів
Розроб.	Мороз			19.01				
Перев.	Рогозін			19.01			3	2
Н. конт.	Васильєв			19.01		Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІ ІТР, 2026 р.		
Затв.	Орисенко			19.01				

Щоб забезпечити якісне перемішування таких матеріалів, слід застосовувати пневматичні змішувачі. Процес відбувається завдяки розподілу частинок у камері змішування під впливом стисненого повітря або перегрітої пари, що утворюють вихрові потоки. Цей підхід дозволяє частинкам інтенсивно рухатися у вертикальних і горизонтальних площинах, що сприяє ефективному перехрещенню потоків матеріалів з різними фізико-механічними властивостями, особливо такими як густина. Завдяки цьому стає можливим змішування навіть таких легких компонентів, як спучений вермикуліт і перліт. Вихрове змішування характеризується високою швидкістю потоку енергоносія, який взаємодіє з частинками компонентів у камері змішування, забезпечуючи процес під впливом змінних за напрямком та величиною масивів імпульсів.

Інтенсивне перемішування загальної маси та кожної окремої частинки компонентів дозволяє отримати суміш високої якості з відмінним ступенем однорідності. Висока швидкість руху частинок і їх постійне тертя одна об одну та об поверхні камери сприяють механічній активації комплексу в'язучих речовин. Це, у свою чергу, забезпечує суттєве покращення міцнісних характеристик готової суміші. Та особливо важливо для отримання сухих теплоізоляційних сумішей.

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		4

1 Обґрунтування теми магістерської роботи

1.1 Огляд інформації про сухі будівельні суміші

Дослідження, розробка і широке впровадження сухих будівельних сумішей сягають початку їх використання, яке стало можливим завдяки введенню до їх складу портландцементу [3]. З моменту появи цементу у XIX столітті як ключового матеріалу на будівельному ринку, спектр застосування та кількість різновидів сухих будівельних сумішей значно розширилися. Проте навіть нині продовжується активна розробка нових зразків таких сумішей з покращеними технічними й експлуатаційними характеристиками, що відповідають сучасним вимогам будівництва та реконструкції. Еволюція сухих будівельних сумішей пройшла кілька ключових етапів, кожен з яких відзначався зміною їх складу та властивостей. Одним із таких етапів стало впровадження полімермодифікованих сумішей, які вирізнялись впливом нових добавок на міцність та еластичність матеріалу. У рамках цього етапу до складу таких сумішей почали додавати клей на основі полівінілового спирту (ПВА). Ця добавка утворювала між частинками матеріалу гнучкі плівки-мостики, які ефективно зменшували навантаження при розтягуванні та підвищували загальну стійкість матеріалу до деформацій.

Наступний суттєвий прорив відбувся у 60-х роках XX століття, коли до сухих будівельних сумішей почали включати редисперговані полімери. Завдяки цій новації вдалося створити суміші, які при змішуванні з водою не виділяють шкідливих речовин, зберігаючи при цьому високу якість і безпеку для довкілля та здоров'я людей.

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Обґрунтування теми магістерської роботи	Літ.	Лист	Листів
Розроб.		Мороз		19.01				
Перев.		Рогозін		19.01			5	23
Н. конт.		Васильєв		19.01		Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІ ІТР, 2026 р.		
Затв.		Орисенко		19.01				

Запровадження редиспергованих полімерних компонентів істотно покращило технічні можливості сухих будівельних сумішей, розширило їх застосування та стало основою для подальших інновацій у цій сфері. На сучасному етапі сухі будівельні суміші залишаються незамінним матеріалом для будівництва та реконструкції різного рівня складності. Без використання сучасних модифікованих сухих будівельних сумішей забезпечення технологічності робіт та бажаної якості у спорудженні та відновленні будівель було б значно ускладнене, а подекуди й неможливе, що підкреслює їхню важливість для індустрії [4, 6].

Сучасні сухі будівельні суміші – це багатокomпонентні спеціалізовані системи, в яких окрім мінеральної речовини-в'язучого і заповнювача міститься комплекс хімічних добавок для надання необхідних властивостей реології суміші, регулювання швидкості схоплення і тверднення в'язучого та забезпечення необхідних фізико-механічних властивостей розчину після твердіння [3].

Основними перевагами сухих будівельних сумішей у порівнянні із традиційними будівельними розчинними сумішами є [3]:

- Зручність в зберіганні і транспортуванні: Сухі суміші легше зберігати та перевозити, оскільки вони не містять великої кількості води. Це зменшує ризик розливу та забруднення під час транспортування.
- Довгий термін придатності: Сухі будівельні суміші мають довший термін придатності порівняно з мокрими аналогами, що дозволяє їх використовувати під час різних будівельних проєктів без втрати якості.
- Швидкість підготовки: Підготовка сухих сумішей до використання зазвичай вимагає менше часу, ніж змішування вологих матеріалів, що прискорює робочий процес.
- Контроль над співвідношеннями компонентів: Можливість точного контролю над кількістю та співвідношеннями компонентів у сухій суміші дозволяє досягнути певних технічних характеристик та якості робіт.
- Різноманітність видів і застосування: Існує багато видів сухих будівельних сумішей, призначених для різних завдань, що дозволяє вибрати

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		6

оптимальний матеріал для конкретного проекту.

Звичайно, що є й недоліки, до яких можна віднести і підвищені вимоги до точності дозування суміші безпосередньо під час її приготування, і підвищене пилоутворення при роботі з ними, і обмеження при роботі за низьких температур, і вибагливість до умов зберігання [3]. Та, не зважаючи на все це, сухі будівельні суміші впевнено опановують будівельний ринок, та можна стверджувати, що майбутнє за ними.

З появою сухих будівельних сумішей на ринку композиційних матеріалів спершу вони вирізнялися значною вартістю, що ускладнювало їх широке впровадження. Проте з часом ситуація почала змінюватися завдяки активному зростанню конкуренції серед виробників, які поступово знижували ціни, прагнучи зайняти вигідні позиції на ринку. Це призвело до того, що на сьогоднішній день ми спостерігаємо не лише більш доступну цінову політику, але й значну різноманітність продукції, що забезпечує споживачам широкий вибір і можливість задовольнити свої конкретні потреби.

На ринку можна виділити три основні групи сухих будівельних сумішей за особливостями їх виробництва:

- закордонні суміші (зазвичай мають в рази вищу ціну);
- вітчизняне виробництво на основі закордонної сировини (є доступнішими на ринку за ціною);
- повністю вітчизняне виробництво із використанням сировини, виготовленої в Україні (порівняно з попередніми групами мають найнижчу ціну, але не всі виробники забезпечують належну якість такої продукції).

Сухі будівельні суміші підлягають класифікації за кількома напрямками (рисунк 1.1) [25]. Їх виготовляють на спеціалізованих технологічних лініях шляхом змішування в'язучих матеріалів (цементу чи гіпсу) з наповнювачами (пісок). Пропорція компонентів у складах наступна: основний компонент становить до 80%, допоміжний – до 36%, модифікуючі добавки – до 2%, а

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		7

мікродобавки становлять близько 0,5% [3]. Вибір в'язучого матеріалу визначає тривалість твердіння та експлуатаційні властивості кінцевого продукту, включаючи режим роботи по вологості, стійкість до коливань температур, швидкість висихання тощо. Сухі будівельні суміші широко використовуються для різноманітних оздоблювальних робіт.

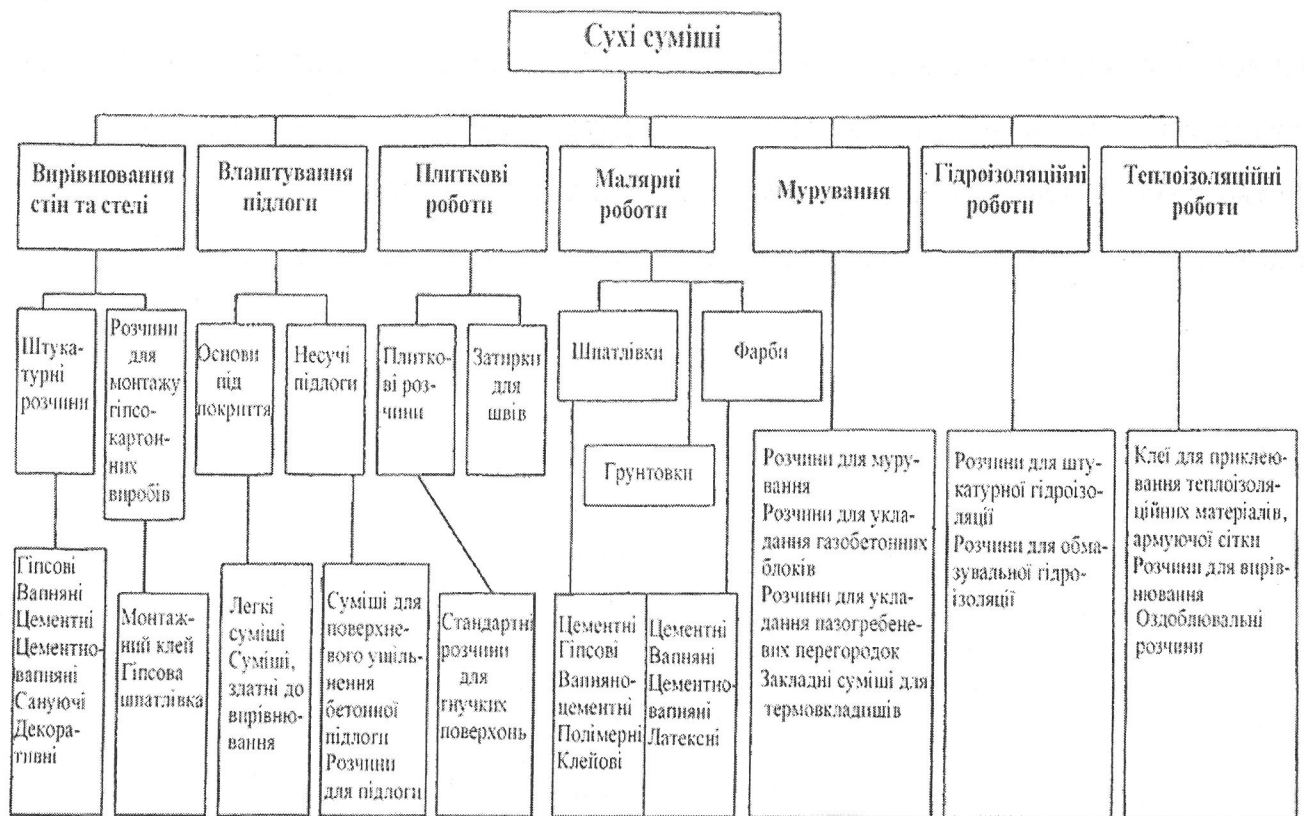


Рисунок 1.1 – Класифікація сухих будівельних сумішей

Останніми роками спостерігається зростання попиту на теплоізоляційні матеріали, до яких належать суміші з низькою теплопровідністю, які використовуються для утеплення будівельних конструкцій. Такі матеріали можуть застосовуватися на фасадах історичних будівель, архітектурний вигляд яких заборонено змінювати. Для досягнення теплоізоляційних властивостей до складу таких сумішей додають гранули пінополістиролу або спучене скло. Проте

найчастіше використовується спучений перліт завдяки його екологічності, доступній ціні, широкому діапазону робочих температур і низькому рівню теплопровідності. Суміші з перлітовим наповнювачем вирізняються не лише низькою теплопровідністю, але й високою паропроникністю. Для покращення характеристик до їх складу додаються пластифікатори, гідрофобізуючі засоби та компоненти, що утворюють повітряні пори. Це підвищує теплоізоляційні властивості матеріалу, зменшує його щільність та покращує рівень звукоізоляції. Особливістю таких сумішей є простота у використанні: для роботи з ними не потрібно спеціальної освіти чи складного інструментарію, а нанесення може здійснюватися як вручну, так і за допомогою спеціального обладнання. Ключовими показниками якості сухих теплоізоляційних сумішей і готового продукту є коефіцієнт однорідності, межа міцності при стисканні та густина. Вирішальним етапом для створення якісної суміші є процес змішування. Чим оптимальніше підібрано змішувальний агрегат, тим кращі характеристики можна забезпечити для отриманої теплоізоляційної суміші [4, 6, 25].

1.2 Огляд конструкцій змішувачів для приготування будівельних матеріалів

Ринок обладнання для змішування матеріалів вирізняється великою різноманітністю, і для приготування сухих будівельних сумішей слід ретельно розглянути різновиди пневматичних змішувачів (рисунок 1.2). Загалом широко представлені змішувачі, здатні задовольнити потреби від невеликих виробничих обсягів до масштабного масового випуску продукції. Для вибору відповідного змішувача необхідно почати з аналізу вимог виробничого процесу, таких як кількість одночасно змішуваних компонентів, потрібний рівень однорідності суміші, а також фізико-хімічні властивості матеріалу, включаючи

					ГММ.601-МММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		9

гранулометричний склад, форму частинок, ступінь абразивності тощо. Фінальне рішення щодо вибору конкретного змішувального пристрою має враховувати ці технічні аспекти разом із показниками експлуатаційних витрат та капіталовкладень, щоб забезпечити оптимальне інженерне рішення [1, 10].

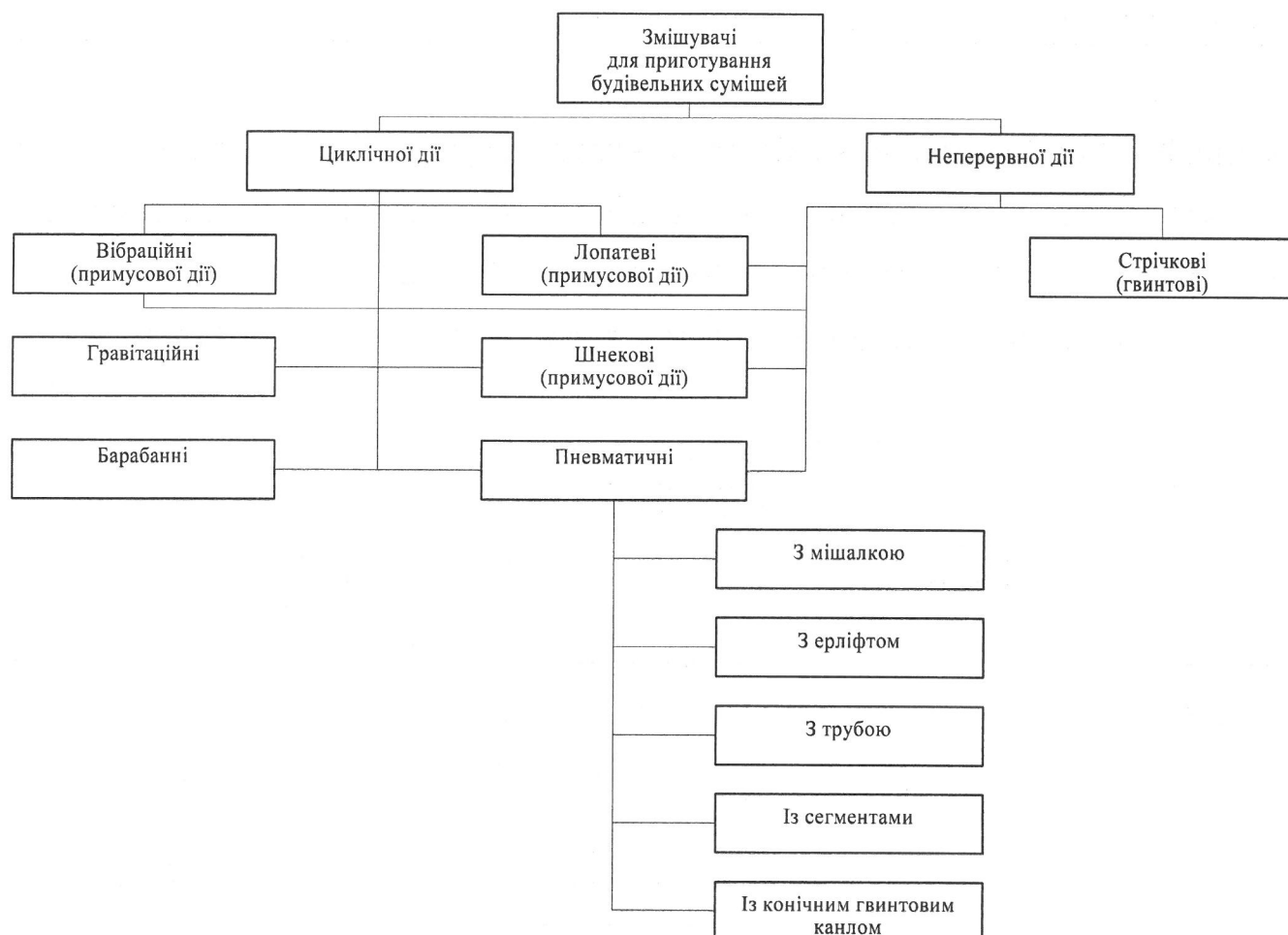


Рисунок 1.2 – Класифікація змішувачів для приготування будівельних матеріалів

Дія змішувальних пристроїв, що базуються на різних механізмах впливу на компоненти суміші, це може бути механічна дія, струминний або пневматичний вплив, імпульсна технологія, вібраційні процеси, застосування ультразвуку чи магнітного поля або й інші методи.

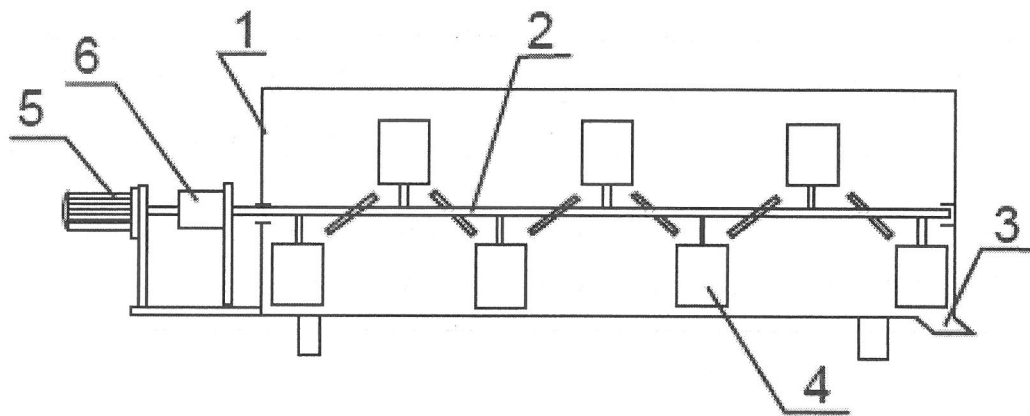
Механічний процес змішування реалізується через переміщення матеріалів за допомогою спеціальних пристроїв, таких як мішалки, шнеки, лопаті, диски чи стрічки. У цьому випадку забезпечується складний і інтенсивний рух компонентів у камері змішування. Розглянемо кілька прикладів такого обладнання для детального аналізу.

Існують змішувачі з нерухомою змішувальною камерою, до яких належать лопатеві, шнекові, стрічкові та інші (рисунки 1.3–1.5). У цих пристроях матеріал переміщується за допомогою механічного елемента [5, 7]. Такий принцип роботи дозволяє отримувати високоякісну готову суміш, якщо компоненти мають схожі фізико-механічні властивості. Винятком є суміші, до складу яких входять компоненти з вмістом заліза, оскільки у певних зонах камери змішування відбувається сегрегація частинок. Характерною особливістю таких змішувачів є домінування процесу дифузійного змішування, що ускладнює рівномірний розподіл частинок по всьому об'єму камери [8, 10]. Збільшення розмірів змішувальних камер такого типу у два рази призводить до пропорційного зростання споживаної потужності приводу [9]. Водночас наявність механізму для обертання робочого органу для змішування всередині камери ускладнює конструктивне виконання техніки.

Головною перевагою цих змішувачів є забезпечення високої однорідності продукту (до 90%) [13]. Однак вони мають і свої недоліки: знос робочих елементів, можливість сегрегації через високі швидкості, що приводить до відкидання важчих частин продукту до периферії, тоді як легші концентруються в центрі. Крім того, необхідно захищати рухомі частини змішувача від пилу та регулярно очищувати робочу камеру.

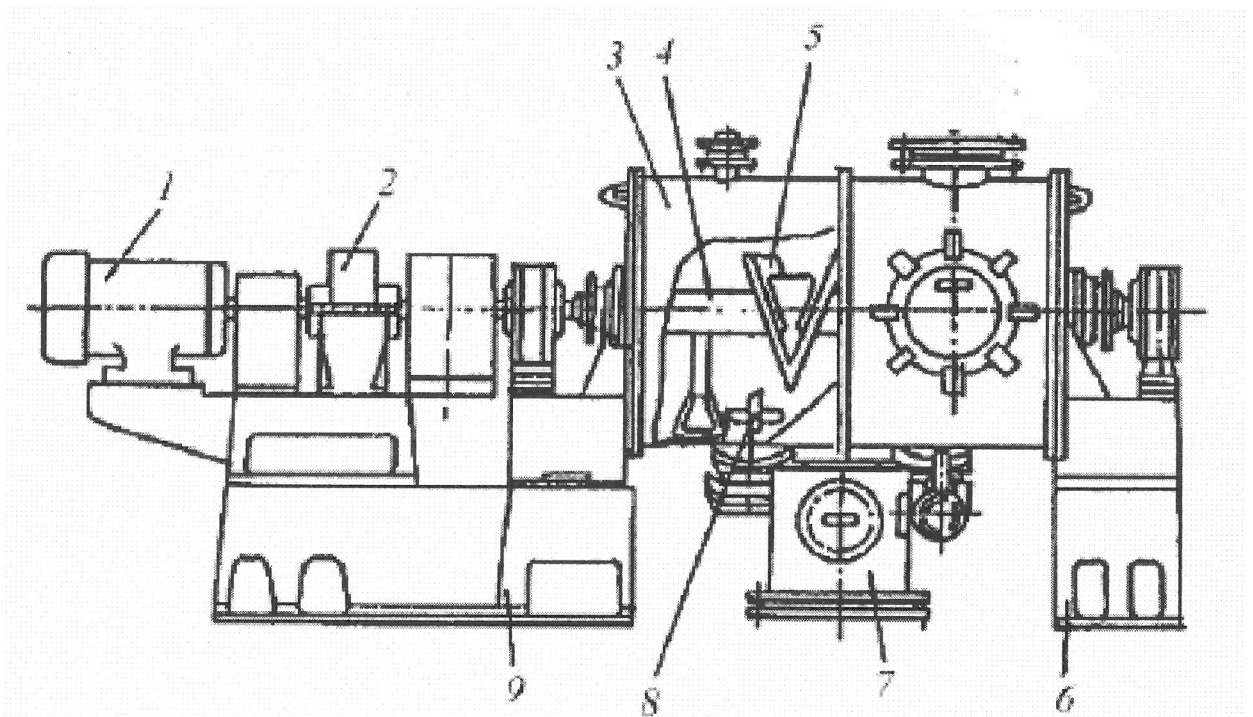
Барабанні змішувачі з обертовим корпусом (циліндричні, двоконусні, Y-подібні та інші) (рисунки 1.6–1.8) широко використовуються для змішування дисперсних матеріалів [12]. Серед їхніх основних переваг варто відзначити простоту конструкції, низький рівень стирання оброблюваних матеріалів, а також можливість створення установок із великим об'ємом одноразового завантаження.

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		11



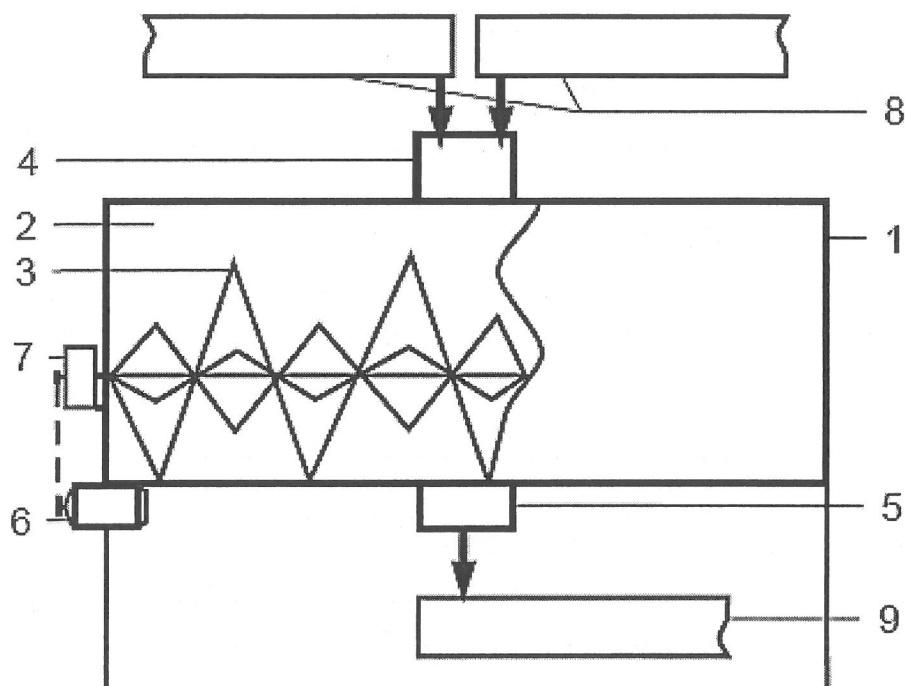
1 – корпус; 2 – головний вал; 3 – вивантажувальний отвір; 4 – лопаті; 5 – двигун;
6 – редуктор приводу валу

Рисунок 1.3 – Схема лопатевого змішувача



1 – двигун; 2 – редуктор приводу валу; 3 – корпус; 4 – головний вал; 5 – шнек;
6 – опора; 7 – вивантажувальний блок; 8 – щітка; 9 – основа

Рисунок 1.4 – Схема шнекового змішувача

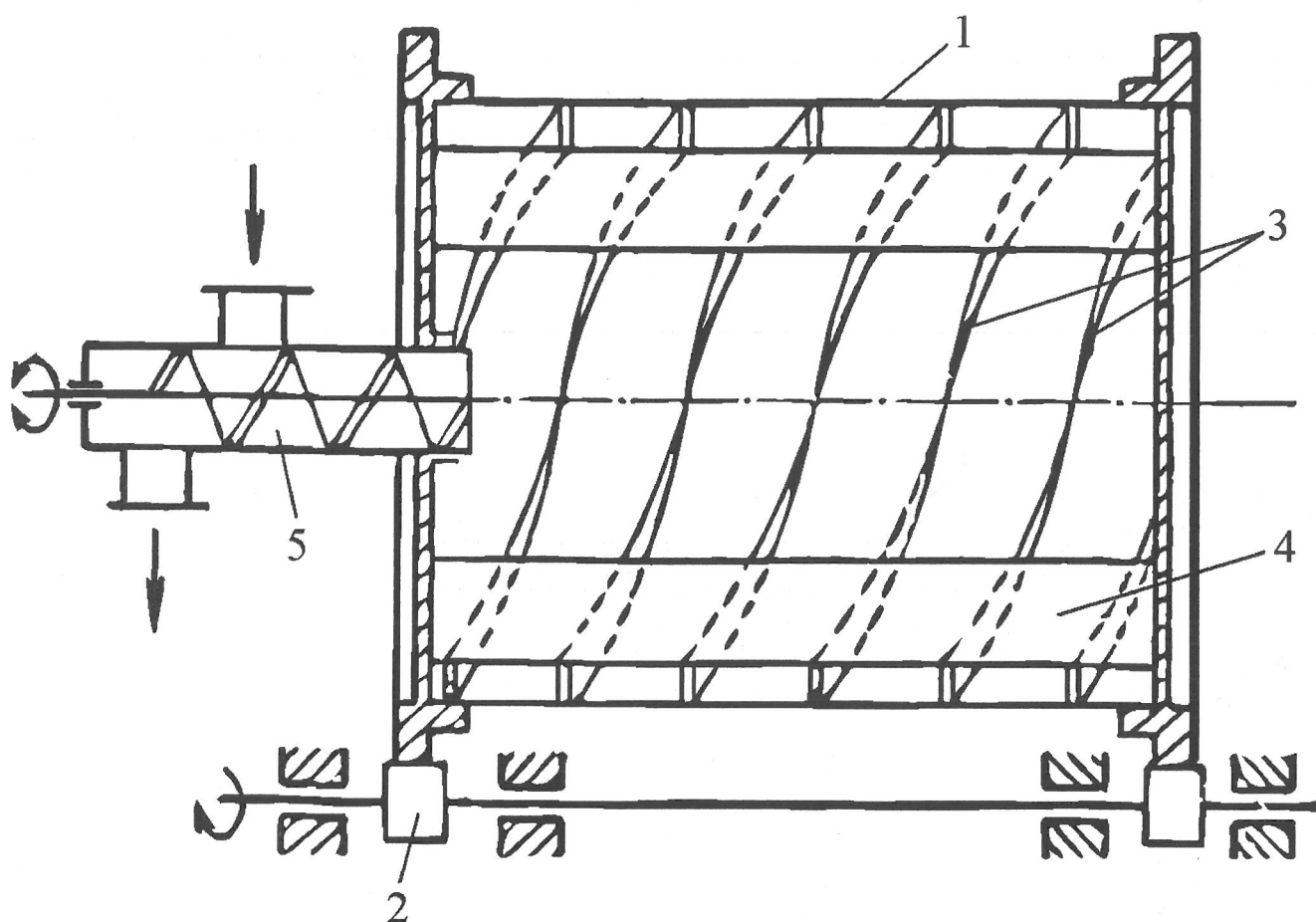


1 – корпус; 2 – бункер змішувача; 3 – шнекова стрічка; 4 – завантажувальний блок;
5 – вивантажувальний блок; 6 – двигун; 7 – редуктор приводу валу;
8 – живильник; 9 – механізм забору готової суміші

Рисунок 1.5 – Схема стрічкового змішувача

Проте їх застосування має і певні обмеження: процес перемішування займає значний час, а питома витрата енергії помітно збільшується зі збільшенням місткості змішувача, що суттєво звужує сферу їх ефективного використання. Кінцева однорідність та якість суміші теж має обмеження.

Процес змішування за допомогою вібраційного способу є універсальним і підходить для обробки будь-якого типу сухих сипучих матеріалів. Його ефективність базується на використанні вібраційних імпульсів, які створюють хаотичні, але впорядковані у своїй сукупності, зіткнення частинок і сприяють їхньому переміщенню в межах змішувальної зони. Такий механізм дозволяє досягти рівномірної взаємодії компонентів. Важливим аспектом цього процесу є те, що інтенсивність вібраційного впливу визначається низкою факторів, зокрема

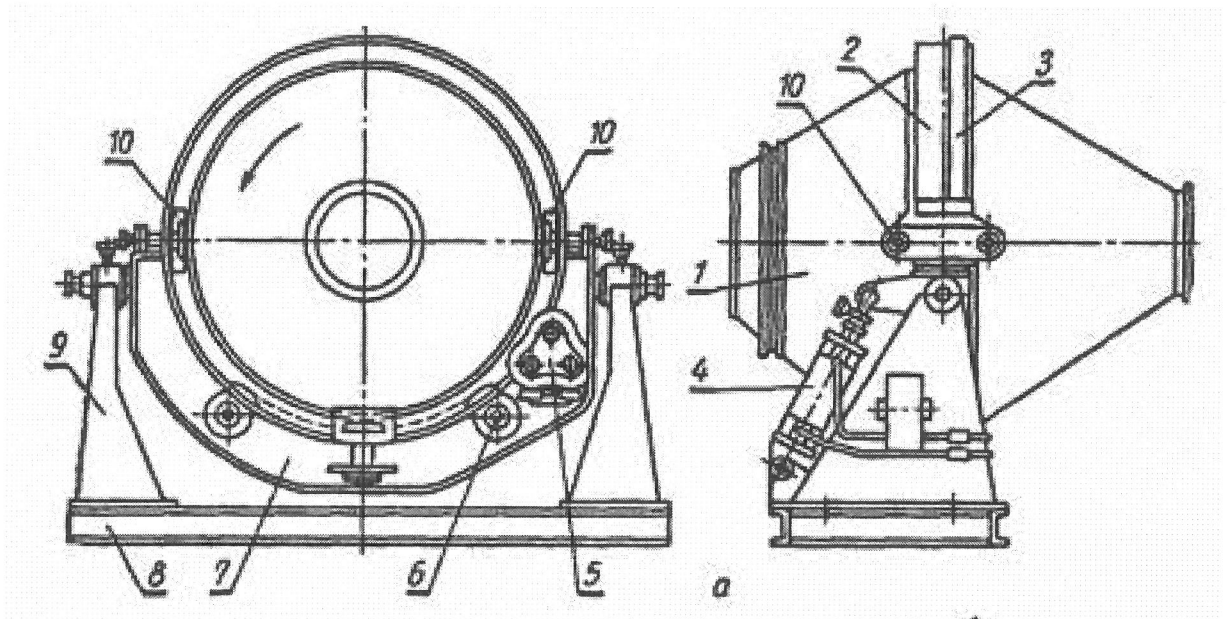


1 – корпус; 2 – опора; 3 – гвинтові направляючі потоку; 4 – перегородки; 5 – шнек

Рисунок 1.6 – Схема циліндричного барабанного змішувача

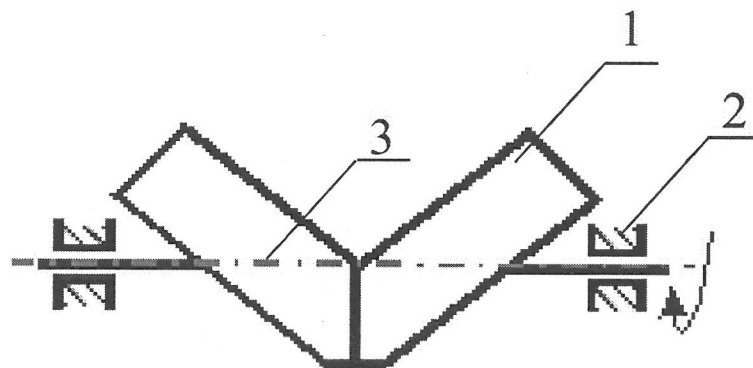
розмірами і щільністю частинок змішуваних речовин, властивостями їхньої проникності, загальною висотою шару матеріалу, рівнем його вологості та коефіцієнтом внутрішнього тертя між частинками. Водночас конструкція та геометричні параметри робочої камери також мають великий вплив на ефективність змішування. Основний принцип дії передбачає складну систему коливань, яка забезпечує інтенсивний і контрольований процес перерозподілу частинок. На рисунку 1.9 наведено технічну схему вібраційного змішувача – машини, яка функціонує без використання внутрішніх виконавчих органів завдяки енергії вібраційної дії. Ця особливість конструктивного виконання забезпечує високу надійність обладнання, спрощує його експлуатацію та обслуговування. Усе

це разом сприяло тому, що віброзмішувачі набули широкого застосування в різних галузях промисловості і сьогодні активно використовуються як ефективний інструмент для обробки сипучих матеріалів.



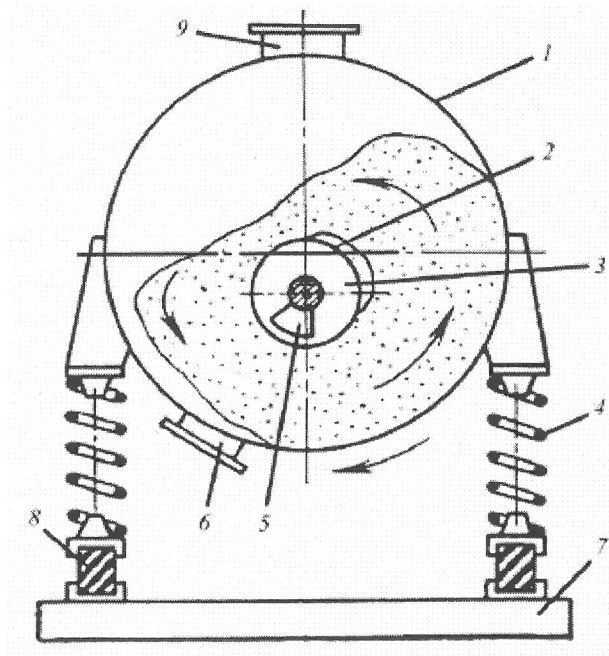
1 – обертовий барабан; 2 – бандаж; 3 – зубчаста передача; 4 – гідравлічний циліндр; 5 – редуктор приводу барабана; 6 – опорні ролики; 7 – траверса; 8 – корпус; 9 – стійки; 10 – опори поздовжнього обертання

Рисунок 1.7 – Схема гравітаційного змішувача



1 – корпус; 2 – опора; 3 – головний вал

Рисунок 1.8 – Схема Y-подібного змішувача

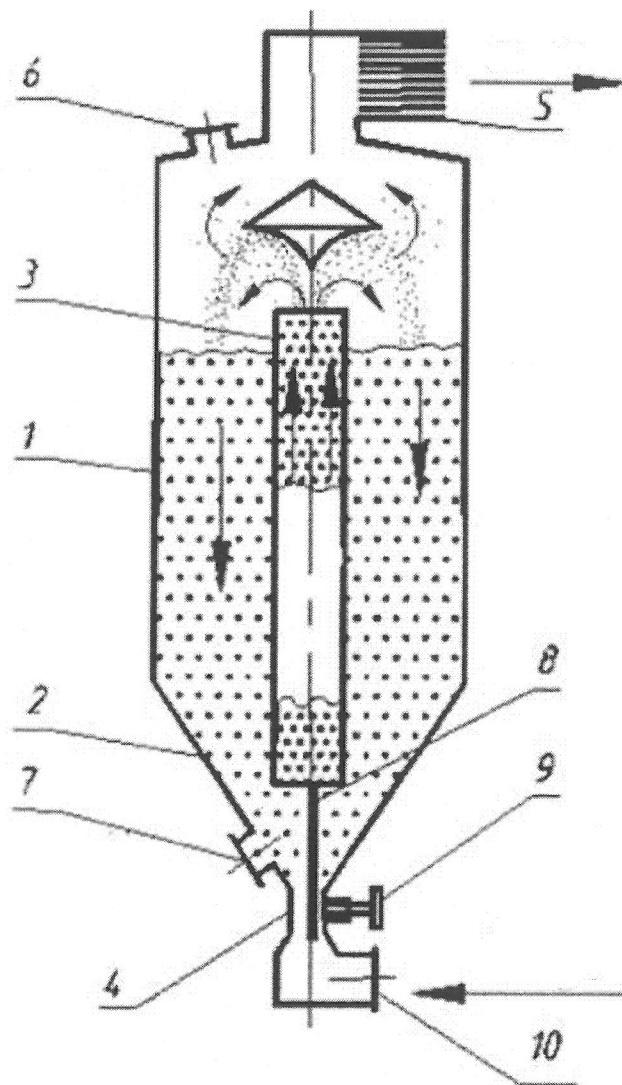


1 – корпус; 2 – труба; 3 – головний вал; 4 – пружні опори; 5 – дебаланс; 6 – нижній патрубок; 7 – основа; 8 – демпфери; 9 – верхній патрубок

Рисунок 1.9 – Схема вібраційного змішувача

Існують припущення, що в окремих випадках у таких змішувачах застосовують внутрішні напрямні, які створюють закручений потік і оптимізують процес змішування. Основною перевагою цих змішувачів є досягнення високого рівня однорідності сипучих матеріалів. Однак їх недоліком можна вважати недостатню ефективність під час роботи з матеріалами різної щільності, що властиво теплоізоляційним сумішам.

У пневматичних змішувачах, що функціонують за принципом замкнутого циклу (рисунок 1.10), описати процес змішування стає складним завданням через численні складні фізичні явища, які супроводжують цей процес у змішувальній камері. У таких системах відбувається поєднання кількох типів змішування. Зокрема, конвективне змішування, яке характеризується переміщенням шарів дисперсного середовища між різними зонами робочого об'єму, і дифузійне змішування, під час якого частинки взаємодіють під впливом сил гравітації, інерції, електростатики та інших зовнішніх факторів, утворюючи рівномірну



1 – циліндрична частина камери корпусу; 2 – конічна частина камери корпусу;
3 – труба; 4 – сопло; 5 – фільтр; 6 – завантажувальний патрубок;
7 – вивантажувальний патрубок; 8 – трубка; 9 – вентиль керування; 10 – канал
подачі повітря

Рисунок 1.10 – Схема пневматичного змішувача

суміш [5]. Одним із визначальних показників ефективності таких змішувачів є коефіцієнт неоднорідності, який зазвичай коливається в межах до 10%. Це свідчить про високу якість отриманих сумішей. Особливістю конструкцій подібних пристроїв є відсутність рухомих механічних частин, що дозволяє зменшити зношення та виключити необхідність додаткових заходів захисту

механізму від пилу та забруднень. Значною перевагою пневматичних змішувачів є те, що енергоносії безпосередньо впливає на матеріали, сприяючи їх ефективному перемішуванню. Завдяки цьому можливо змішувати матеріали як з однаковою густиною, так і з абсолютно різною, без будь-якого погіршення кінцевої якості продукту. Це робить подібні пристрої універсальними для використання у виробничих процесах різної складності та обсягів.

1.3 Модифікації пневматичних змішувачів

Пневматичні змішувачі є найбільш цікавими з точки зору їх використання для приготування сухих теплоізоляційних сумішей. Вони повністю відповідають сучасним екологічним та виробничим стандартам, не завдаючи шкоди здоров'ю працівників і демонструючи технічні характеристики, які не поступаються механічним аналогам. Однак пневматичне змішування залишається недостатньо дослідженою сферою. Основними напрямками розвитку цього методу є створення та вдосконалення ефективної камери змішування, а також розробка технологічного процесу для обробки сухих багатокомпонентних сумішей. Завдяки прогресу в розробці пневматичних змішувачів та точним розрахункам можна спроектувати універсальний пристрій, здатний забезпечити однорідність готової суміші в межах до 5%. Такий змішувач дозволить якісно працювати з компонентами різної густини, розміру частинок і великою питомою поверхнею, гарантуючи високу ефективність перемішування.

Процес приготування суміші в пневматичному змішувачі здійснюється завдяки використанню енергоносія, який надходить у корпус пристрою та вступає в контакт із матеріалом. У результаті цієї взаємодії створюється хаотично-вихровий рух суміші, що забезпечує не лише перемішування загального об'єму, але й ретельне змішування окремих часток між собою. Такий процес сприяє

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		18

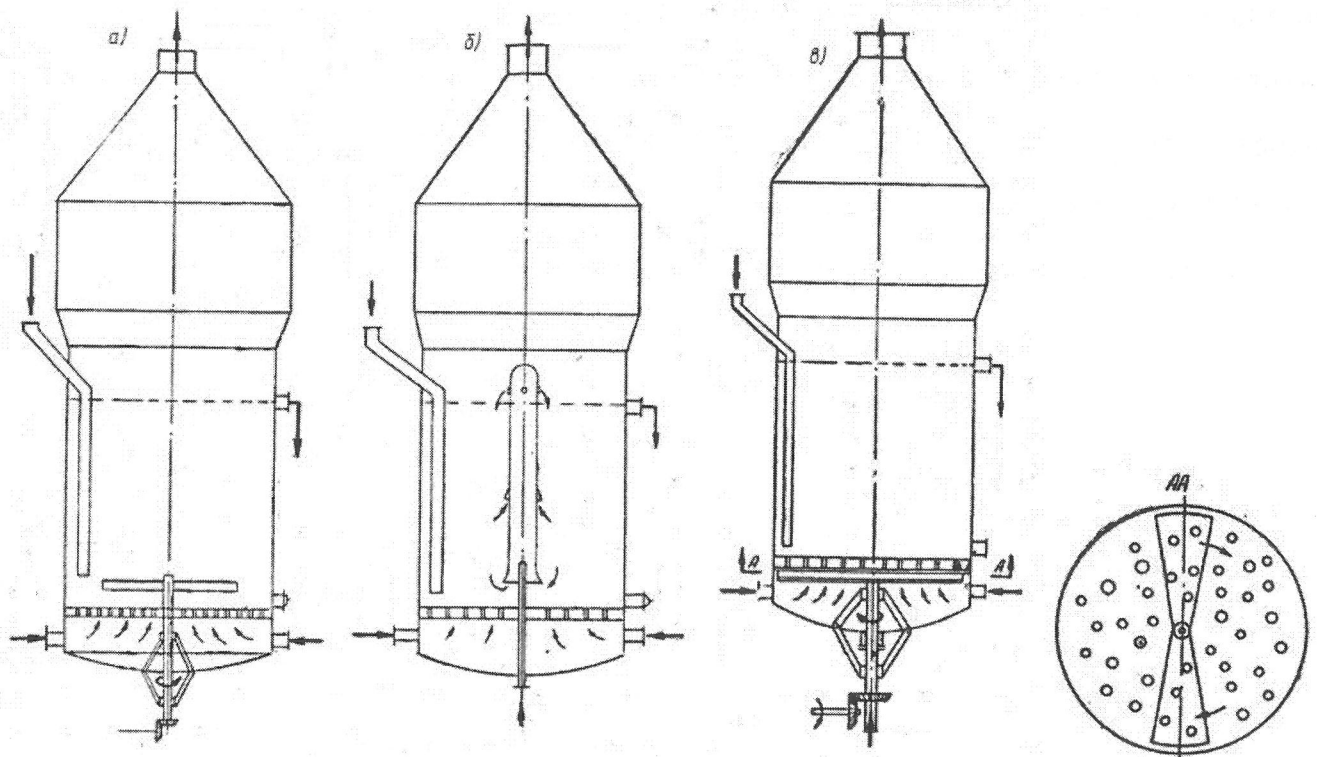
формуванню високоякісної суміші, яка характеризується високим рівнем однорідності розподілу компонентів. Після закінчення самого процесу пневматичного змішування енергоносій, перенасичений частинками пилу, проходить етапи очищення та відокремлення пилу. Спершу його направляють на циклони для грубого розділення, а після цього – на рукавні фільтри для глибшого очищення.

Однією з ключових особливостей пневматичного методу змішування є високі швидкості руху енергоносія, що забезпечує ефективне перемішування компонентів, навіть у складних технологічних умовах. До основних переваг пневматичних змішувачів можна віднести їх простоту конструкції, яка дозволяє застосовувати такі установки у широкому спектрі виробничих процесів. Окрім того, цей тип обладнання здатний одночасно обробляти великі обсяги матеріалів та компоненти з різноманітними фізико-механічними характеристиками і ступенями міцності без значного зношування внутрішніх поверхонь. Варто зазначити, що такі змішувачі можуть функціонувати в режимах періодичної або безперервної роботи, забезпечуючи таким чином високу гнучкість у виробничих процесах. Ще однією важливою перевагою даних пристроїв є виключно короткий час змішування, який може становити лише 10 секунд. Така швидкість досягається завдяки дії потужного вихрового потоку енергоносія на матеріали, які піддаються обробці. Після завершення роботи змішувача потрібен мінімальний час для осідання і стабілізації дрібнодисперсних частинок. Таким чином, пневматичні змішувачі демонструють ефективність і швидкість в умовах сучасного виробництва. Далі звернемо увагу на різні види пневматичних змішувачів, які використовуються в промисловій практиці, детально аналізуючи їхні конструкційні особливості та області застосування.

Пневматичні змішувачі представляють собою різноманітні конструктивні рішення, відображені на рисунках 1.11 і 1.12. Зокрема, існує пневматичний змішувач із додатковою мішалкою (рисунок 1.11 а), який поєднує вплив пневматичних і механічних факторів для ефективного змішування компонентів.

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
						19
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Ще одним прикладом є пневматичний змішувач за принципом аерліфта (рисунок 1.11 б), де використовується сила гравітації для перемішування, а підйом компонентів здійснюється через вертикальну аеротрубу. Також слід згадати пневматичний змішувач з обертним розподільником повітря (рисунок 1.11 в), конструкція якого базується на обертанні сопел для подачі енергоносія, що забезпечує більш інтенсивний змішувальний процес.



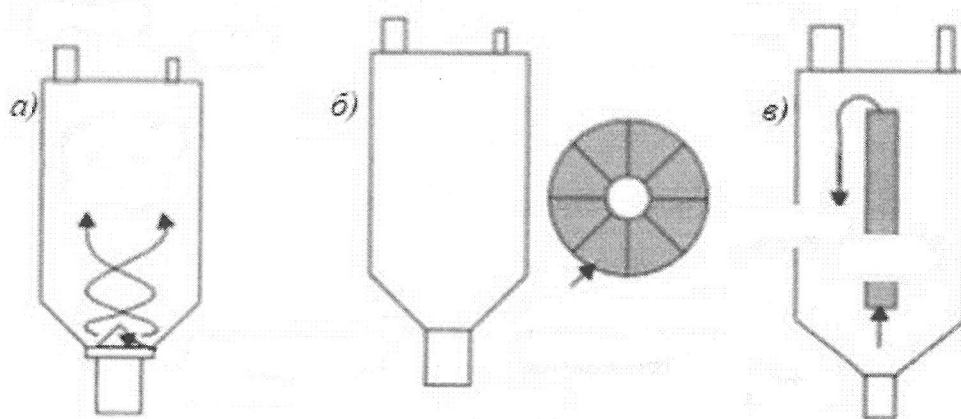
а) – з додатковою мішалкою; б) – з аерліфтом; в) – з обертним розподільником повітря

Рисунок 1.11 – Схеми різновидів пневматичних змішувачів

Пневматичний змішувач із регульованим потоком повітря зображений на рисунку 1.12 а). Потік регулюється за допомогою спеціального регулювального клапана. Тоді як пневматичний змішувач із розділеною на сегменти регульованою камерою змішування представлений на рисунку 1.12 б).

Також відома конструкція пневматичного змішувача з витяжною трубою (рисунок 1.12 в). Він має центральну витяжну трубу, яка суттєво підвищує ефективність процесу змішування [10]. Зона, де відбувається змішування, розміщена в серцевині камери змішувача. У такій конструкції компоненти матеріалу під час роботи піднімаються вгору через витяжну трубу, потім викидаються з її верхньої частини та спрямовуються назовні до нижнього сегмента труби для повторного циклу рециркуляції.

Застосування пневматичних змішувачів є дуже широким: їх використовують як у будівництві, так і в нафтохімічній, фармацевтичній та багатьох інших галузях промисловості [1, 7, 12].



а) – з клапаном; б) – з розподільчими сегментами камери; в) – з трубою

Рисунок 1.12 – Схеми різновидів пневматичних змішувачів

Змішувачі, виготовлені компанією NOL-TEC (рисунок 1.13), демонструють ефективну роботу з матеріалами, розмір частинок яких не перевищує 6 мм [30].

На сьогоднішній день ці пневматичні змішувачі широко застосовуються для обробки сипучих матеріалів, а також активно використовуються у різних сегментах хімічної промисловості. Основними технічними параметрами таких пристроїв є здатність працювати із завантаженням до 30 кілограмів матеріалу, витрачаючи при цьому приблизно 0,007 м³/с повітря під тиском в 1,5 bar. Час

повного циклу змішування становить всього декілька хвилин, що робить їх надзвичайно продуктивними для задач середньої складності.

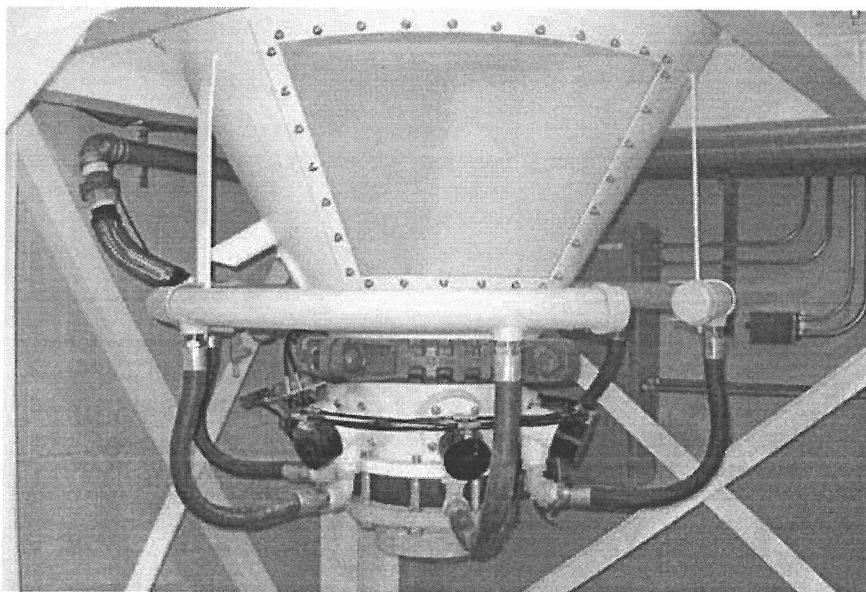


Рисунок 1.13 – Пневматичний змішувач NOL-TEC

Бренд Petrosadid, у свою чергу, створив інноваційний пневматичний змішувач (рисунок 1.14), який значно розширює можливості ефективного змішування завдяки здатності працювати з більшими обсягами сумішей [30]. Ця установка може змішувати різномірні сухі дрібнодисперсні матеріали з помітною різницею в їхній густині, що забезпечує універсальність її використання в багатьох сферах промисловості. Однією з головних переваг конструкції є легкість очищення камери змішування, що мінімізує затрати часу і підвищує ефективність експлуатації обладнання.

Особливістю даного змішувача є наявність шести або дванадцяти спеціальних сопел, які розташовані симетрично по нижньому радіусу камери змішування. Завдяки цьому через них спрямовується стиснене повітря в центр об'єму матеріалу, створюючи потужний висхідний вертикальний потік. Дія цього потоку дозволяє піднімати та перемішувати частинки різного розміру й ваги,

досягаючи однорідності суміші.

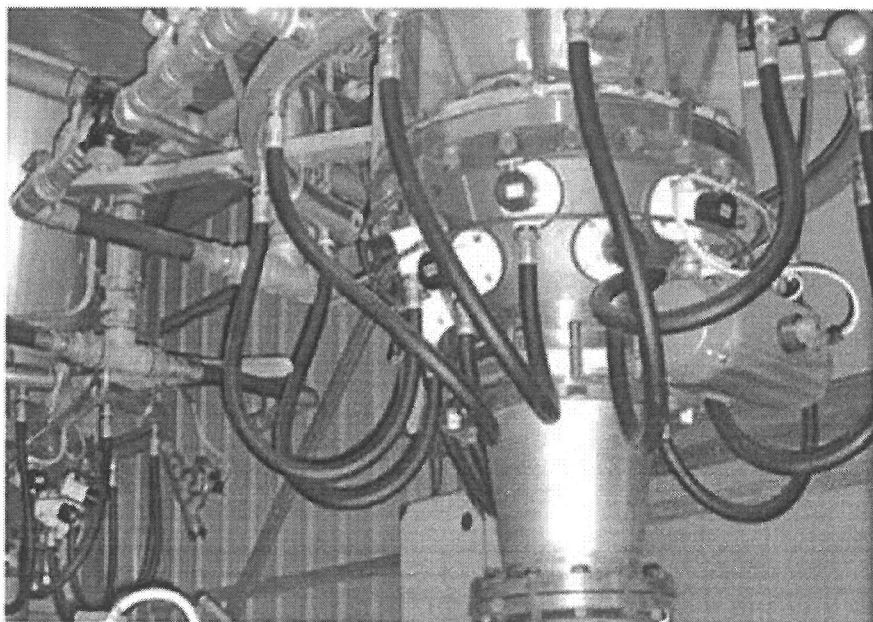


Рисунок 1.14 – Пневматичний змішувач Petrosadid

Крім того, пристрій оснащено автоматизованою системою управління процесом змішування, яка допомагає точно налаштовувати найважливіші технологічні параметри. Це дозволяє оптимізувати процес залежно від специфіки матеріалу або інших технічних вимог. Технічні характеристики цього обладнання включають спроможність працювати із завантаженням до 50 кілограмів, із витратою повітря на рівні $0,03 \text{ м}^3/\text{с}$. Тиск нагнітання повітря становить $0,3 \text{ МПа}$. Завдяки таким характеристикам та функціональним перевагам цей пневматичний змішувач знаходить застосування у численних галузях промисловості та стає незамінним у виробничих процесах із високими вимогами до якості та ефективності.

Виробник Dynamic Air створив змішувач BLENDCON (рисунок 1.15) Змішування у ньому здійснюється завдяки використанню струменя стисненого повітря, який підвищує кінетичну енергію частинок, змушуючи їх хаотично

рухатися у камері змішування [30]. Також важливим фактором є пульсація повітряних потоків, що формують висхідну спіраль.

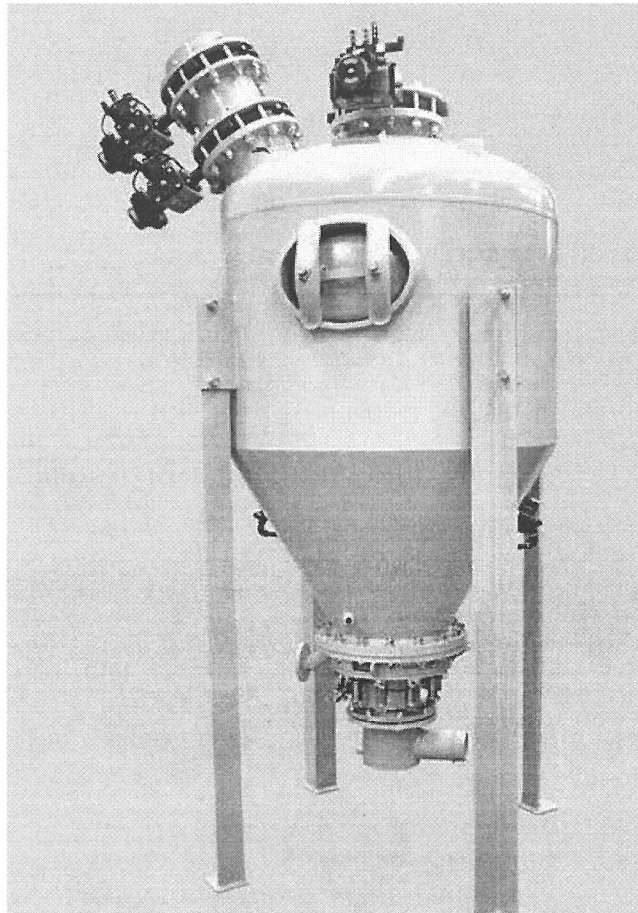


Рисунок 1.15 – Пневматичний змішувач BLENDCON

Основною перевагою цього змішувача є можливість автоматичного регулювання подачі імпульсів стисненого повітря, що дозволяє ефективно змішувати навіть крихкі та абразивні компоненти. Конструкція змішувальної камери передбачає полегшене очищення від залишків суміші, що сприяє спрощенню технологічного процесу і підвищенню зручності обслуговування. Технічні характеристики обладнання: максимальна вага завантаження до 100 кг; витрата повітря становить 0,11 м³/с; тиск нагнітання повітря дорівнює 0,6 МПа.

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		24

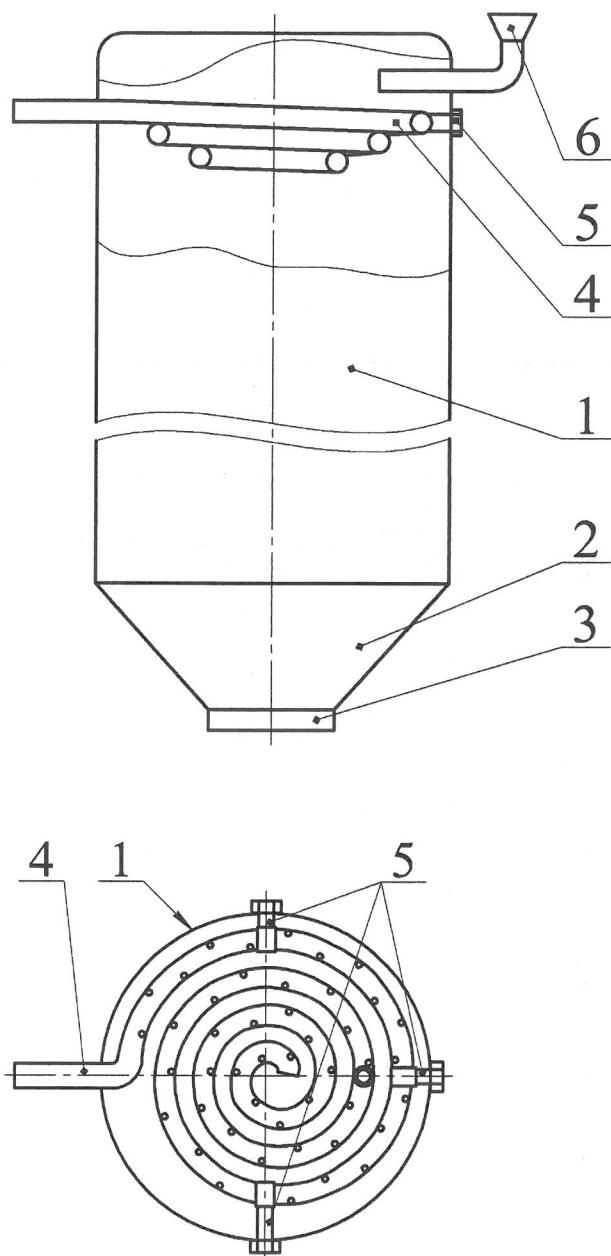
1.4 Конструкція змішувача адаптована для роботи із теплоізоляційними сумішами

Після детального аналізу існуючих конструкцій змішувачів, визначення сучасних напрямів розвитку даної групи техніки у підсумку для дослідження особливостей виробництва спеціальних сухих теплоізоляційних будівельних сумішей, з урахуванням вимог щодо їх якості, обрано конструкцію пневматичного змішувача з конічним гвинтовим каналом, котрий приймає на вході повітряний потік до робочої камери (рисунок 1.16). До речі, така конструкція може бути ефективною і в інших галузях промисловості, зокрема, у хімічній, лакофарбовій, харчовій, а також в інших сферах, де потрібні комплексні технологічні рішення для обробки матеріалів.

Головна особливість обраної конструкції полягає у здатності створювати хаотично-вихрові потоки стисненого повітря разом із матеріалом через посилення ефекту від тангенційних складових швидкостей. Це технічне рішення забезпечує високоефективне змішування, що сприяє значному підвищенню рівня однорідності суміші, навіть, при суттєвій різниці у густині складових компонентів суміші, як у випадку з теплоізоляційними продуктами. В результаті досягається покращення якісних характеристик кінцевого матеріалу, що відповідає сучасним стандартам і запитам промисловості.

Принцип роботи пневматичного змішувача із конічним гвинтовим каналом ґрунтується на ефекті переміщення складових фракцій суміші в умовах вихрового потоку, створеного повітрям, що нагнітається під тиском. Потік матеріалу надходить у корпус, що позначений позицією 1, через патрубок 6 (рисунок 1.16). Усередині корпусу матеріал вступає в контакт із потужним струменем стисненого повітря, яке спрямовується через спеціальні отвори, розташовані в конічному гвинтовому каналі, позначений позицією 4. Канал 4 фіксується усередині корпусу 1 за допомогою спеціальних тримачів 5. Розташування отворів у трубці є

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		25



1 – циліндрична частина камери корпусу; 2 – конічна частина камери корпусу;
3 – вивантажувальний патрубок; 4 – конічний гвинтовий канал; 5 – тримачі
конічного гвинтового каналу; 6 – завантажувальний патрубок

Рисунок 1.16 – Пневматичний змішувач із конічним гвинтовим каналом

рівномірно розподіленим, причому вони спрямовані по обидві сторони ходу руху основного потоку під різними кутами в діапазоні від 25 до 40 градусів до вертикальної осі. Завдяки тому, що конічний гвинтовий канал 4 нахилений

вершиною свого конусу донизу, збільшується сумарний об'єм зони інтенсивного контакту між стисненим повітрям і складовими суміші, які знаходяться в процесі змішування всередині корпусу. Камера корпусу знизу має конічну частину 2. У ній тиск поволі спадає у суміш набуває все більше осьової вертикальної складової у своїй швидкості руху, а тангенційна зменшується аж до нульового значення у вивантажувальному патрубку 3, що йде наступним на виході з камери змішувача. Завдяки цьому суміш проходить через патрубок 3 у відповідний приймальний осадовий пристрій для осаджування, який може бути під'єднано до патрубку 3.

Це інженерне рішення має за мету мінімізувати коефіцієнт неоднорідності суміші, коли вона вже є кінцевим товарним продуктом. А його ефективність досягається завдяки високому рівню динаміки впливу повітря, що нагнітається під тиском, на окремі складові суміші (у тому числі й з різною густиною) в процесі їх перемішування. Це і гарантує значне покращення якості отриманого продукту.

Саме тому є актуальним питання вивчення особливостей роботи розглянутого пневматичного змішувача з конічним гвинтовим каналом для приготування сухих теплоізоляційних сумішей. Це може бути корисним для розуміння картини розподілу складових швидкості повітряно-пилового потоку, керування цими складовими через зміну параметрів змішувача, та можливості оцінки експлуатаційних характеристик обладнання.

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		27

2 Теоретичне дослідження особливостей роботи пневматичного змішувача

2.1 Попередні положення та припущення

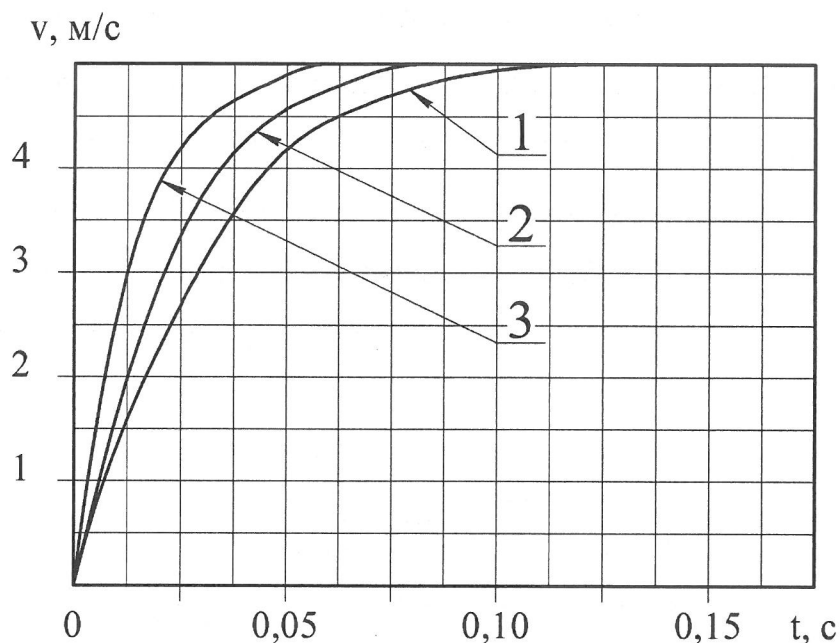
Розглянемо в деталях процес руху пилоповітряного потоку повітря із дрібнодисперсними часточками компонентів суміші, що відбувається у пневматичному змішувачі для приготування сухих теплоізоляційних сумішей, оснащеному конічним гвинтовим каналом. У цьому пристрої компоненти суміші, які необхідно змішати, подаються до змішувача за допомогою спеціалізованих дозаторів, які забезпечують точність і контроль над кількістю внесених речовин. Водночас ефективне функціонування змішувача значною мірою визначається характером аеродинамічного тривимірного потоку, формування якого є складним і багатofакторним процесом. Аеродинаміка цієї системи залежить від цілого ряду факторів, які суттєво впливають на якість і швидкість змішування. Серед основних параметрів, які можна регулювати для досягнення оптимальних результатів, варто виділити швидкість витoku енергоносія у якості повітря, яка обумовлює динаміку руху часток у системі, а також діаметр вхідного отвору каналу. Обидва ці показники визначають інтерактивну взаємодію часток компонентів суміші та енергоносія в умовах турбулентного потоку. Опис тривимірної структури потоку є складним завданням з точки зору фізико-математичного моделювання, оскільки він залежить від багатьох взаємопов'язаних вхідних параметрів. Швидкість потоку, форма і розмір конічного гвинтового каналу, властивості суміші та інші змінні

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ				
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Теоретичне дослідження особливостей роботи пневматичного змішувача	Літ.	Лист	Листів	
Розроб.		Мороз		19.01					
Перев.		Рогозін		19.01			28	35	
Н. конт.		Васильєв		19.01		Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІ ІТР, 2026 р.			
Затв.		Орисенко		19.01					

параметри потребують точного аналізу й адаптації для забезпечення максимальної ефективності роботи змішувача. [1, 5].

Для створення математичної моделі процесу потоку середовища у камері пневматичного змішувача необхідно обмежитися деякими припущеннями:

По-перше для аналізу результатів досліджень [30] враховуємо те, що швидкість руху дрібнодисперсної частинки, яка зазнає лобового опору, досить швидко набуває стабільної постійної величини. Згідно із графіком (рисунок 2.1) [30], швидкість дрібнодисперсної частинки у процесі руху змінюється за закономірністю асимптоти і досить близько наближається до загальної швидкості повітряного потоку за дуже короткий час, і цей процес завершується впродовж приблизно 0,1 секунди для частинок, майже, будь-якої групи дрібнодисперсних розмірів. Виходячи з цього, надалі можна приймати, що різниця між швидкістю руху частинки чи матеріалу і швидкістю повітряного потоку є настільки незначною, що нею можна знехтувати.



1 – розмірна група 100 мкм; 2 – розмірна група 80 мкм; 3 – розмірна група 60 мкм

Рисунок 2.1 – Характер зміни швидкості руху дрібнодисперсних частинок суміші різних розмірів у часі

По-друге вважаємо, що концентрація дрібнодисперсних частинок у пилоповітряній суміші у камері пневматичного змішувача є відносно невеликою, тому можна ігнорувати взаємодію між частинками під час їх руху.

2.2 Математична модель руху потоку повітря зі складовими суміші у камері змішувача

Потік повітря зі складовими суміші у камері змішувача головним чином задається об'ємом повітря, яке нагнітає компресор, а сипучі компоненти, що подає дозатор, відіграють набагато меншу роль. Так, до камери пневматичного змішувача (рисунок 2.2) через конічний гвинтовий канал надходить повітря, витрата Q_B , м³/с, якого може бути знайдена за виразом:

$$Q_B = \frac{\pi \cdot d}{4} \cdot v_B, \quad (2.1)$$

де d – внутрішній діаметр конічного гвинтового каналу, м;

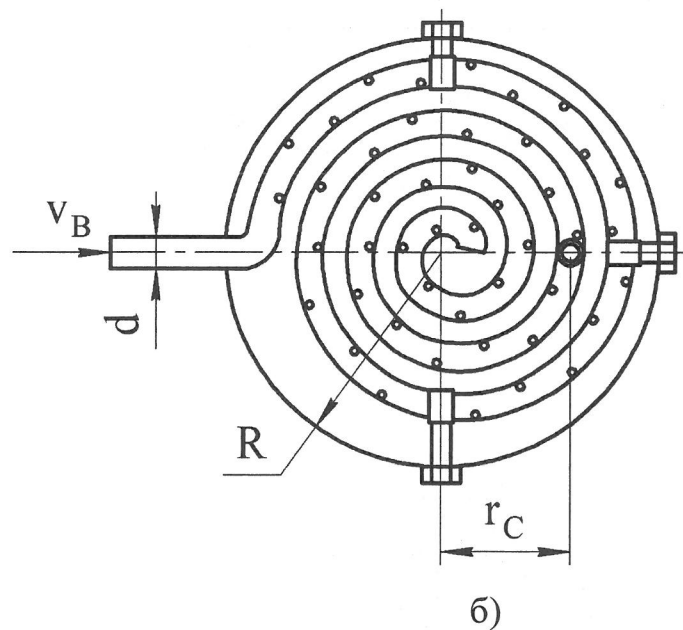
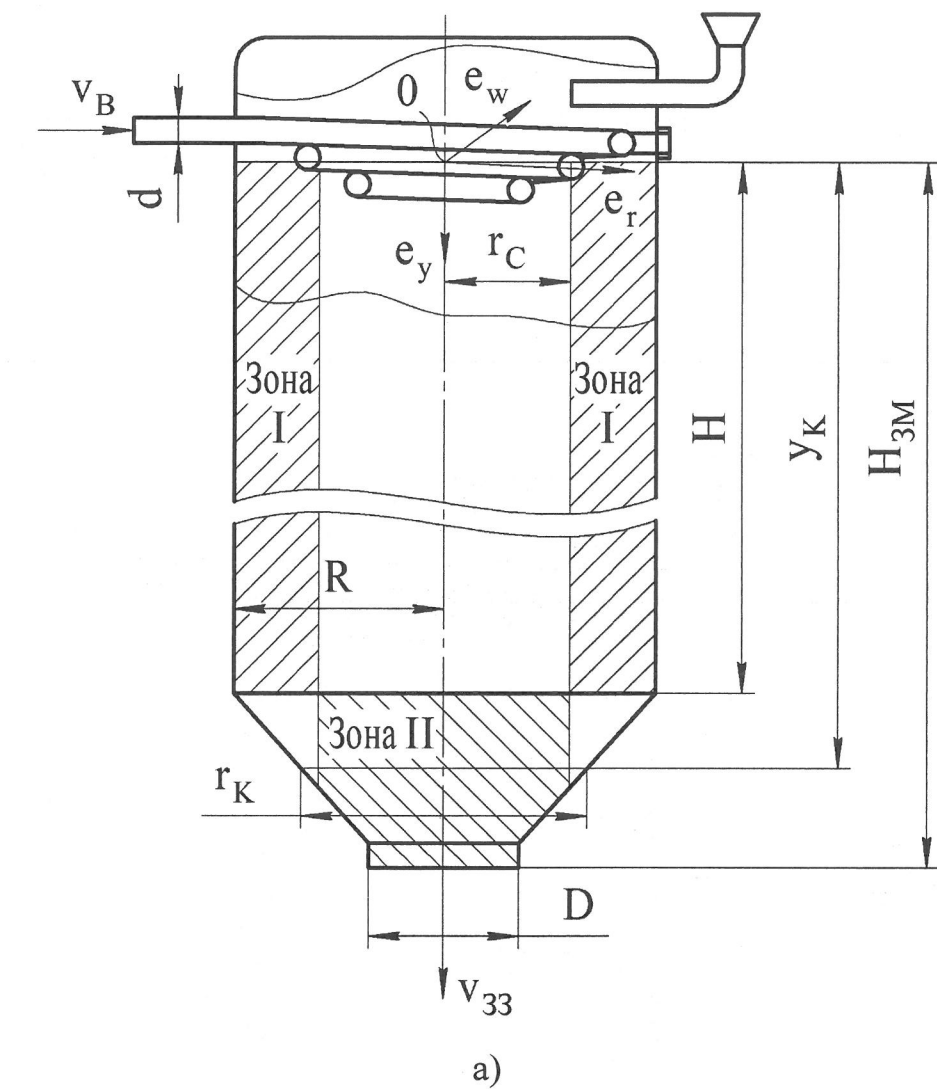
v_B – входна швидкість повітря до конічного гвинтового каналу, м/с.

Також потрібно буде знайти і об'ємну витрату повітря Q_3 , м³/с, котре виходить назовні із конічного гвинтового каналу. Отримаємо рівняння наступного вигляду:

$$Q_3 = \frac{\pi \cdot d_3 \cdot n}{4} \cdot v_3, \quad (2.2)$$

де d_3 – діаметр отворів конічного гвинтового каналу, м;

n – кількість отворів у конічному гвинтовому каналі;



а) – загальний вигляд; б) – вигляд згори на конічний гвинтовий канал

Рисунок 2.2 – Схема пневматичного змішувача

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ

Лист

31

v_3 – вихідна швидкість руху повітря назовні із окремо взятого отвору конічного гвинтового каналу, м/с, яку можна буде розрахувати на основі даних про різницю тисків наступним чином:

$$v_3 = k_v \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_k - p_{k3})}{\rho}}, \quad (2.3)$$

де k_v – коефіцієнт швидкості повітря, для умов роботи змішувача становить $k_v = 0,67$ [10];

p_k – тиск усередині конічного гвинтового каналу, Па;

p_{k3} – тиск усередині камери пневматичного змішувача, Па;

ρ – густина повітря, для умов роботи змішувача становить $\rho = 1,2$ кг/м³ [38].

Оскільки витрата повітря на вході конічного гвинтового каналу змішувача дорівнює витраті повітря на його виході:

$$Q_B = Q_3, \quad (2.4)$$

то можемо записати рівність виразів (2.1) та (2.2) у вигляді:

$$\frac{\pi \cdot d}{4} \cdot v_B = \frac{\pi \cdot d_3 \cdot n}{4} \cdot v_3. \quad (2.5)$$

Є очевидним, що отвори конічного гвинтового каналу мають відносно невеликий діаметр та обмеження у пропускній здатності повітря, тому їх необхідну кількість можна розрахувати за формулою, отриманою на основі виразу (2.5).

$$n = \frac{d^2}{d_3^2} \cdot \frac{v_B}{v_3}. \quad (2.6)$$

Підставивши значення вихідної швидкості руху повітря назовні із окремо взятого отвору конічного гвинтового каналу із формули (2.3), отримаємо:

$$n = 1,49 \cdot \frac{d \cdot v_B}{d_3} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot (p_K - p_{K3})}}. \quad (2.7)$$

Також необхідно знайти витрату повітря Q_{33} , м³/с, яка буде виходити назовні із циліндричної камери пневматичного змішувача. Вона становитиме:

$$Q_{33} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v_{33}, \quad (2.8)$$

де D – діаметр патрубку на виході із камери змішувача, м;

v_{33} – вихідна швидкість руху повітря назовні із патрубка на виході із камери змішувача, м/с.

Тоді можемо записати:

$$\frac{\pi \cdot d}{4} \cdot v_B = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v_{33}. \quad (2.9)$$

Звідси отримаємо співвідношення:

$$v_{33} = \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cdot v_B. \quad (2.10)$$

Якщо скористатися рівнянням неперервності, то матимемо:

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
						33
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \cdot \vec{v}) = 0, \quad (2.11)$$

де $\vec{v}$ – вектор швидкості елементарного об'єму потоку повітря всередині циліндричної камери змішувача, м/с.

Відповідно поле швидкостей потоку повітря в камері, із урахуванням того, що густина повітря із виваженими дрібнодисперсними компонентами суміші всередині циліндричної камери змішувача буде константою, можна записати у вигляді:

$$\operatorname{div}(\vec{v}) = 0. \quad (2.12)$$

Якщо скористатися градієнтом потенціалу швидкості, то отримаємо наступну рівність:

$$\vec{v} = -\operatorname{grad}(\psi), \quad (2.13)$$

де ψ – функція, котра є скалярною та відображає потенціал швидкості v , м/с.

Тепер, взявши до уваги оператор Лапласа Δ , зможемо записати:

$$\Delta \psi = 0. \quad (2.14)$$

Щоб мати можливість далі працювати із рівнянням (2.14) необхідно на осі кінцевого гвинтового каналу додатково встановити допоміжну циліндричну систему координат із осями r , w , y . Відповідно така система матиме одиничні орти e_r , e_w , e_y , як показано на рисунку 2.2.

У введеній додатковій системі координат будемо мати наступну закономірність для оператора Лапласа [33]:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2}{\partial w^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}. \quad (2.15)$$

Враховуючи геометричні особливості кінцевого гвинтового каналу, можемо стверджувати, що він має аксіальну симетрію. Тому можемо використовувати спрощення, що потенціал швидкостей потоку повітря буде залежним виключно від координат r та y . Тобто потенціал швидкостей матиме вигляд $\psi(r, y)$, а рівняння (2.14), з урахуванням закономірності для оператора функції Лапласа (2.15), запишемо, як:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = 0. \quad (2.16)$$

Далі використаємо метод Фур'є [33], згідно якого розв'язок попереднього рівняння потрібно задати у вигляді:

$$\psi(r, y) = \psi_A(r) \cdot \psi_B(y). \quad (2.17)$$

На основі виразу (2.17), із врахуванням виразу (2.16), можемо записати:

$$\psi_B(y) \cdot \left(\frac{d^2 \psi_A}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\psi_A}{dr} \right) + \psi_A(r) \cdot \frac{d^2 \psi_B}{dy^2} = 0. \quad (2.18)$$

Перенесемо другий доданок за знак рівності та розділимо складові потенціалу швидкості по різних сторонах рівності, тоді отримаємо:

$$\frac{1}{\psi_A(r)} \cdot \left(\frac{d^2 \psi_A}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\psi_A}{dr} \right) = - \frac{1}{\psi_B(y)} \cdot \frac{d^2 \psi_B}{dy^2}. \quad (2.19)$$

Тепер рівність має вигляд, коли добре видно, що вона справджується тільки за умови однакового значення і з лівої і з правої сторони деякої невідомої константи N^2 . І подальша задача полягає у знаходженні цієї константи.

Запишемо залежності, які можна отримати за допомогою рівняння (2.19) із використанням введеної константи N^2 .

$$\frac{d^2\psi_A}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{d\psi_A}{dr} = N^2 \cdot \psi_A(r); \quad (2.20)$$

$$\frac{d^2\psi_B}{dy^2} + N^2 \cdot \psi_B(y) = 0. \quad (2.21)$$

Із рівняння (2.21) отримаємо:

$$\psi_B(y) = s_1 \cdot \cos(N \cdot y) + s_2 \cdot \sin(N \cdot y), \quad (2.22)$$

де s_1 та s_2 – довільні сталі величини.

У рівнянні (2.20) введемо нову змінну наступного характеру:

$$\eta = N \cdot r. \quad (2.23)$$

Тоді рівняння (2.20) набуде вигляду:

$$\eta^2 \cdot \frac{d^2\psi_A}{d\eta^2} + \eta \cdot \frac{d\psi_A}{d\eta} - \eta^2 \cdot \psi_A = 0. \quad (2.24)$$

Подальші розрахунки можливо виконати із залученням спеціального програмного забезпечення математичного характеру. Наприклад, за допомогою програмного продукту MathCad отримуємо базисні розв'язки:

$$[I_B(\eta), K_B(\eta)]. \quad (2.25)$$

У виразі (2.25) наведені модифіковані функції Бесселя з нульовим порядком [22, 33]. Для них побудовано функціональні залежності для $I_B(\eta)$ на рисунку 2.3 та для $K_B(\eta)$ на рисунку 2.4.

З графіку на рисунку 2.3 помітно, що функція $I_B(\eta)$ зростає. Її мінімальне значення становить 1 при значенні аргументу, що, приблизно, дорівнює нулю. А максимальне значення більше на 1% від мінімального при аргументі в 0,2.

Аналогічно з рисунку 2.4 бачимо, що функція $K_B(\eta)$ спадає. Її мінімальне значення становить, приблизно, 0 при значенні аргументу в 0,7. А максимальне значення наближається до п'яти при значенні аргументу, що прямує до нуля.

Такі характеристики функцій (2.25), свідчать про те, що вираз (2.24) буде мати різні вигляди, залежно від початкових умов. Так, за умови, що

$$r < r_c, \quad (2.26)$$

де r_c – середній розмір конічного гвинтового каналу визначений у радіальному напрямку, м;

матимемо:

$$\psi_A(\eta) = s_3 \cdot I_B(N \cdot r), \quad (2.27)$$

де s_3 – довільна стала величина.

А у випадку, коли

$$r > r_c, \quad (2.28)$$

матимемо:

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
						37
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

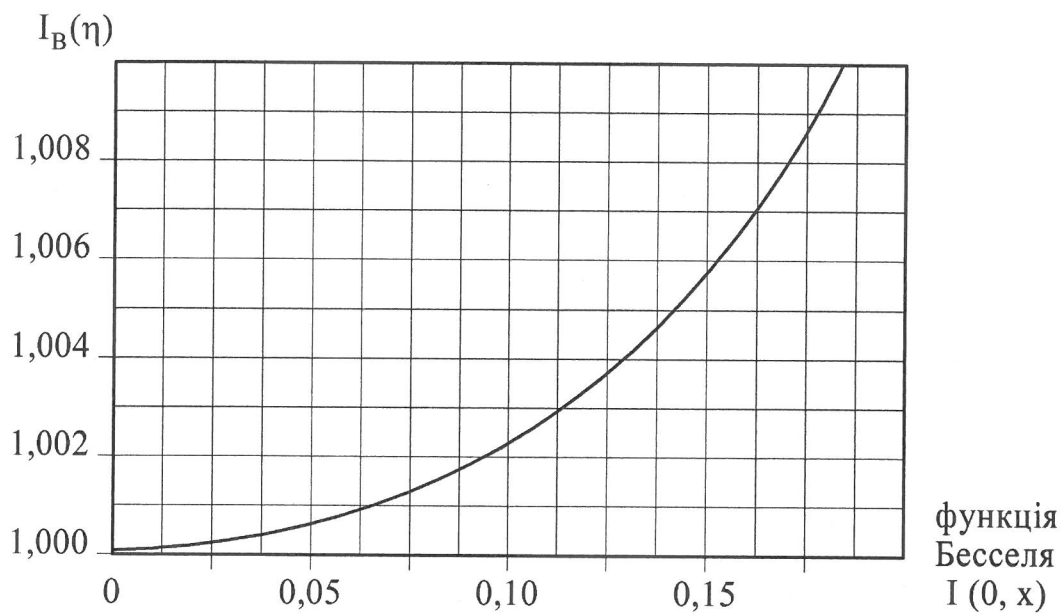


Рисунок 2.3 – Графік функції Бесселя $I_B(\eta)$

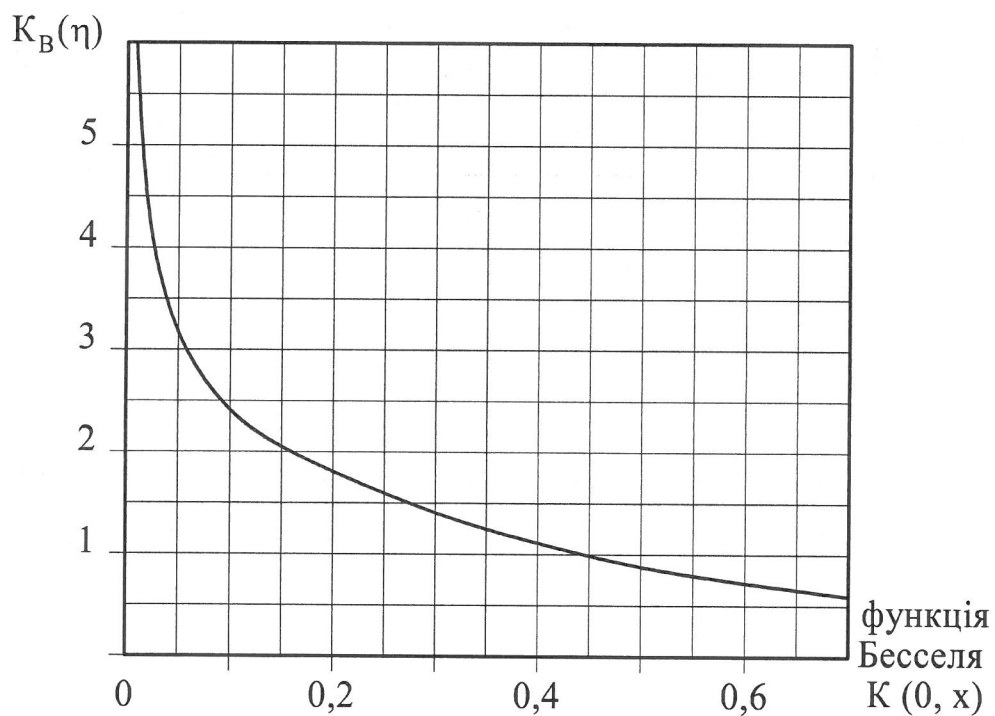


Рисунок 2.4 – Графік функції Бесселя $K_B(\eta)$

$$\psi_A(\eta) = s_4 \cdot K_B(N \cdot r), \quad (2.29)$$

де s_4 – інша довільна стала величина, відмінна від s_3 .

Також, якщо виконуватиметься рівність:

$$r = r_C, \quad (2.30)$$

отримаємо:

$$s_3 \cdot I_B(N \cdot r_C) = s_4 \cdot K_B(N \cdot r_C). \quad (2.31)$$

Звідси випливає, що

$$s_4 = \frac{s_3 \cdot I_B(N \cdot r_C)}{K_B(N \cdot r_C)}. \quad (2.32)$$

Визначимо вектор швидкості елементарного об'єму потоку повітря всередині циліндричної камери змішувача.

$$\vec{v} = -\frac{\partial \psi}{\partial r} \cdot \vec{e}_r - \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot \vec{e}_y. \quad (2.33)$$

Після перетворень отримаємо:

$$\vec{v} = v_r \cdot \vec{e}_r + v_y \cdot \vec{e}_y. \quad (2.34)$$

На основі згаданих рівнянь, можемо знайти складові v_r та v_y і записати їх як

$$v_r = -\frac{\partial \psi}{\partial r}; \quad (2.35)$$

$$v_y = -\frac{\partial \psi}{\partial y}. \quad (2.36)$$

Або у вигляді

$$v_r = -\frac{\partial \psi_A}{\partial r} \psi_B(y); \quad (2.37)$$

$$v_y = -\psi_A \left(\frac{\partial \psi_B}{\partial y} \right); \quad (2.38)$$

$$v_y = -\psi_A(r) \cdot [-s_1 \cdot N \cdot \sin(N \cdot y) + s_2 \cdot N \cdot \cos(N \cdot y)]. \quad (2.39)$$

Отже, швидкість у напрямку r буде залежати від початкових умов і за виконання нерівності (2.26) матимемо:

$$v_r = s_3 \cdot N \cdot \frac{dI_B(\eta)}{d\eta} \cdot [s_1 \cdot N \cdot \cos(N \cdot y) + s_2 \cdot N \cdot \cos(N \cdot y)]. \quad (2.40)$$

Або ж коли буде виконуватися рівність (2.28), зможемо записати:

$$v_r = -s_4 \cdot N \cdot \frac{dK_B(\eta)}{d\eta} \cdot [s_1 \cdot \cos(N \cdot y) + s_2 \cdot N \cdot \cos(N \cdot y)]. \quad (2.41)$$

Для знаходження довільних сталих величин потрібно мати граничні умови. Задамо їх у наступному вигляді: при $r = r_c$ та $y = 0$ буде $v_y = 0$. При застосуванні цих граничних умов до виразу (2.39) отримаємо:

$$-\psi_A(r_c) \cdot s_2 \cdot N = 0. \quad (2.42)$$

З умов роботи пневматичного змішувача зрозуміло, що

$$\psi_A(r_C) \neq 0. \quad (2.43)$$

Це означає, що довільна стала величина $s_2 = 0$. Враховуючи це за виконання умови (2.26) можемо записати наступне:

$$v_y = N \cdot s_3 \cdot I_B(N \cdot r) \cdot \sin(N \cdot y). \quad (2.44)$$

Якщо ж виконується умова (2.28), то матимемо:

$$v_y = N \cdot s_4 \cdot K_B(N \cdot r) \cdot \sin(N \cdot y). \quad (2.45)$$

Розглянемо геометричні співвідношення у нижній конічній частині камери пневматичного змішувача. Якщо взяти довільний переріз цієї конічної частини (показана на схемі на рисунку 2.2), то він матиме радіус r_k , м, та віддалення y_k , м, по вертикалі від верхнього краю камери, де знаходиться початок координат додаткової циліндричної системи. Також із схеми помітно, що радіус r_k буде змінюватися у діапазоні значень:

$$0,5 \cdot D \leq r_k \leq R, \quad (2.46)$$

а відстань y_k , відповідно у діапазоні значень:

$$H \leq y_k \leq H_{зм}, \quad (2.47)$$

де R – радіус циліндричної частини камери пневматичного змішувача, м;

H – висота циліндричної частини камери пневматичного змішувача

визначена від початку координат додаткової циліндричної системи до нижнього краю, м;

H_{3M} – повна висота камери пневматичного змішувача визначена від початку координат додаткової циліндричної системи до нижнього краю, м.

Тоді співвідношення між радіусом r_K довільного перерізу конічної частини камери пневматичного змішувача та відстанню до нього буде становити:

$$y_K = \frac{r_K - R}{0,5 \cdot D - R} \cdot (H_{3M} - H) + H. \quad (2.48)$$

Після цього можемо визначити граничні умови. Так на виході камери, при $r_K = 0,5D$ та $y_K = H_{3M}$ швидкості потоку матимуть значення:

$$v_y = v_{33}; \quad (2.49)$$

$$v_r = 0. \quad (2.50)$$

Враховуючи це, запишемо вирази (2.40) та (2.41) відповідно у наступному вигляді:

$$v_r = s_3 \cdot N \cdot I_M(N \cdot r) \cdot \cos(N \cdot y); \quad (2.51)$$

$$v_r = s_4 \cdot N \cdot K_M(N \cdot r) \cdot \cos(N \cdot y), \quad (2.52)$$

У останній двох рівняннях (2.51) та (2.52) використано модифіковані функції Бесселя I-го порядку $I_M(\eta)$ та $K_M(\eta)$, які пов'язані із аналогічними функціями нульового порядку наступним чином [22, 33]:

$$I_M(\eta) = \frac{dI_B(\eta)}{d\eta}; \quad (2.53)$$

$$K_M(\eta) = -\frac{dK_B(\eta)}{d\eta}. \quad (2.54)$$

Якщо взяти до уваги рівняння (2.52) та записати його, коли виконуються граничні умови (2.50), то отримаємо:

$$s_4 \cdot N \cdot K_M(N \cdot r_k) \cdot \cos(N \cdot H) = 0. \quad (2.55)$$

Із всіх множників рівняння (2.55) тільки останній має теоретичну можливість бути рівним нулю, тому можна записати:

$$\cos(N \cdot H) = 0. \quad (2.56)$$

Звідси

$$N \cdot H = \frac{\pi}{2}. \quad (2.57)$$

І відповідно

$$N = \frac{\pi}{2 \cdot H}. \quad (2.58)$$

Якщо взяти до уваги рівняння (2.44) та записати його, коли виконуються граничні умови (2.49), то отримаємо:

$$v_{33} = N \cdot s_3 \cdot \sin(N \cdot H). \quad (2.59)$$

А звідси можна виразити довільну сталу величину s_3 :

$$s_3 = \frac{v_B \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2}{N \cdot \sin(N \cdot H)}. \quad (2.60)$$

Тепер маємо можливість знайти поле швидкостей потоку повітря у циліндричній частині камери пневматичного змішувача. Воно буде залежати від тієї частини об'єму камери, де відбуватиметься рух. Тому, щоб задати формули для розрахунку, потрібно окреслити умови, за яких вони будуть справедливими. І якщо для координати y умова є загальною, то для координати r можуть бути дві різні ситуації.

Для координати y додаткової циліндричної системи координат повинна справджуватися умова:

$$0 \leq y \leq H. \quad (2.61)$$

А для координати r у першому випадку за умови:

$$0 \leq r < r_c, \quad (2.62)$$

розрахункові залежності для швидкостей будуть:

$$v_r = \frac{v_B \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot I_M(N \cdot r) \cdot \cos(N \cdot y)}{I_B(N \cdot 0,5 \cdot D) \cdot \sin(N \cdot H)}; \quad (2.63)$$

$$v_y = \frac{v_B \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot I_B(N \cdot r) \cdot \sin(N \cdot y)}{I_B(N \cdot 0,5 \cdot D) \cdot \sin(N \cdot H)} \quad (2.64)$$

Також для координати r у другому випадку за умови:

$$r \geq r_C, \quad (2.65)$$

розрахункові залежності для швидкостей будуть:

$$v_r = \frac{v_B \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot I_B(N \cdot r_C) \cdot K_M(N \cdot r) \cdot \cos(N \cdot y)}{I_B(N \cdot 0,5 \cdot D) \cdot \sin(N \cdot H) \cdot K_B(N \cdot r_C)}; \quad (2.66)$$

$$v_y = \frac{v_B \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^2 \cdot I_B(N \cdot r_C) \cdot K_B(N \cdot r_C) \cdot \sin(N \cdot y)}{I_B(N \cdot 0,5 \cdot D) \cdot \sin(N \cdot H) \cdot K_B(N \cdot r_C)}. \quad (2.67)$$

Отже, математичну модель руху потоку середовища у камері пневматичного змішувача побудовано для всіх характерних напрямків.

2.3 Аналіз результатів математичної моделі руху потоку у камері змішувача

Для того, щоб оцінити особливості роботи змішувача за отриманою математичною моделлю, необхідно задатися його конкретними геометричними параметрами, що зведені до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Геометричні параметри пневматичного змішувача

№	Параметр	Позначення	Величина
1	Радіус циліндричної частини пневматичної камери змішувача	R	240 мм
2	Висота циліндричної частини пневматичної камери змішувача визначена від початку координат допоміжної циліндричної системи координат	H	980 мм
3	Висота всієї пневматичної камери змішувача визначена від початку координат допоміжної циліндричної системи координат до нижньої частини вихідного патрубку	H _{зм}	1180 мм
4	Кількість отворів у конічному гвинтовому каналі	n	32
5	Внутрішній діаметр конічного гвинтового каналу	d	20 мм
6	Середній розмір конічного гвинтового каналу визначений у радіальному напрямку	r _c	120 мм
7	Діаметр патрубка на виході із камери змішувача	D	50 мм

Побудуємо графіки зміни складової v_r від швидкості потоку в залежності від зміни координат у додатковій циліндричній системі відліку (рисунки 2.5 та 2.6). Складові v_r швидкості потоку будуть суттєво відрізнятися у циліндричній частині камери пневматичного змішувача, коли виконується умова:

$$0 \leq y \leq H, \quad (2.68)$$

та у конічній частині камери, коли виконується умова:

$$H < y \leq H_{зм}. \quad (2.69)$$

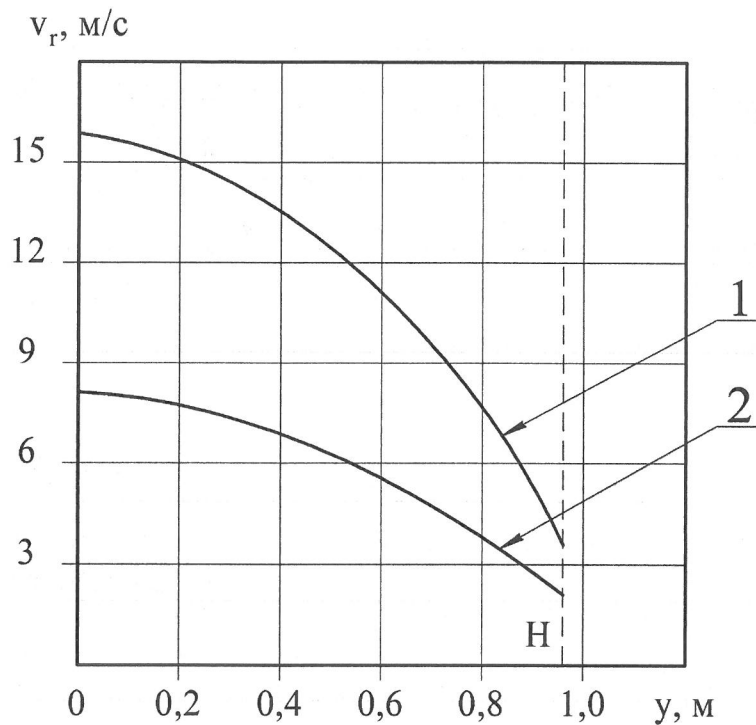
Також вона буде істотно залежати від зони камери змішувача, що буде

визначатися у радіальному перерізі. Тобто можна виділити дві характерні зони: одна у центральній частині, навколо осі камери, яка буде характеризуватися умовою (2.62); а інша назовні, поблизу стінок камери, з виконанням умови (2.65).

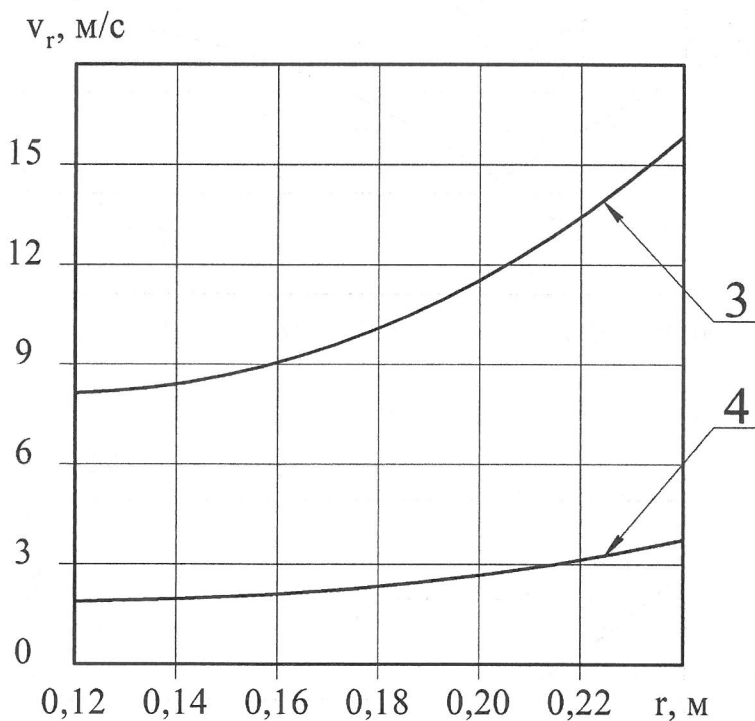
Основна маса суміші в циліндричній частині камери змішувача, де виконується умова (2.68), буде розганятися потоком повітря та рухатися ближче до стінок камери із виконанням умови (2.65). Умовно назовемо цю зону – зоною I (рисунок 2.2). При опаданні маси суміші до конічної частини камери, де виконується умова (2.69), вона буде зміщуватися до центральної частини, ближче до осі, і переходитиме у зону, де справедливою буде умова (2.62). Умовно назовемо цю зону – зоною II (рисунок 2.2). Тому доцільно дослідити характер зміни складових швидкості потоку, саме у цих двох типових зонах.

Графіки зміни складової v_r від швидкості потоку в залежності від зміни координат у додатковій циліндричній системі відліку у зоні I представлені на рисунку 2.5. Аналізуючи графіки бачимо, що початкова складова v_r , що задана на вході, зі збільшенням значення кожної з координат буде падати. Причому координата y має суттєво більший вплив на цей процес, порівняно із координатою r , у нижній циліндричній частині камери змішувача. Також помітно, що вплив на зниження швидкості від координати y з її збільшенням посилюється, а для координати r відбувається протилежна ситуація.

Графіки зміни складової v_r у зоні II представлені на рисунку 2.6. Тут ситуація відрізняється, бо починають діяти інші фізичні процеси та остаточне затухання складової швидкості v_r , яка на виході із камери змішувача зовсім зникає і стає рівною нулю. Тому для випадку, коли координата $y = 1,18$ м графік відсутній, оскільки на цій висоті по всьому поперечному перерізу $v_r = 0$. Збільшення координати y буде сприяти зниженню складової швидкості v_r . Збільшення ж координати r , навпаки, буде сприяти її підвищенню. Причому координата r у зоні II має, майже, лінійну залежність впливу на згасання швидкості v_r .



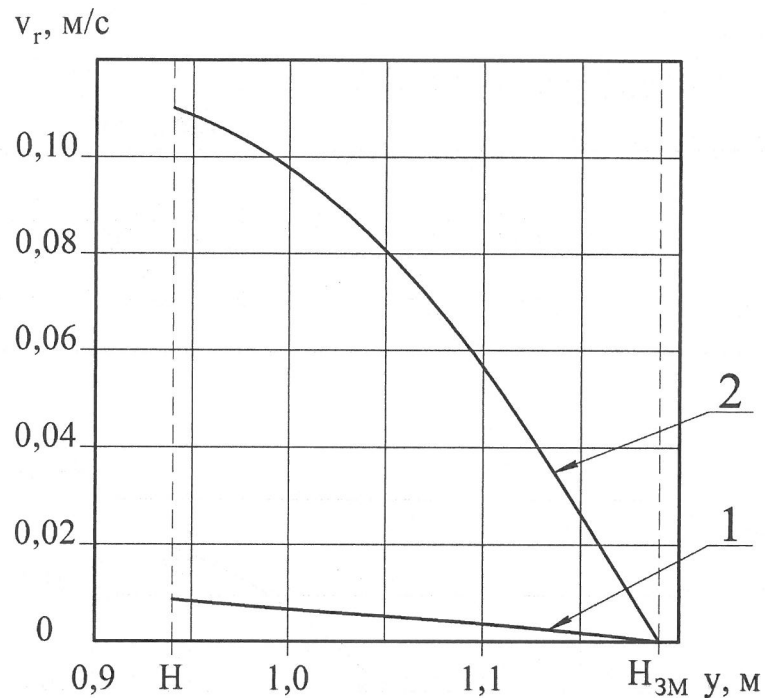
а)



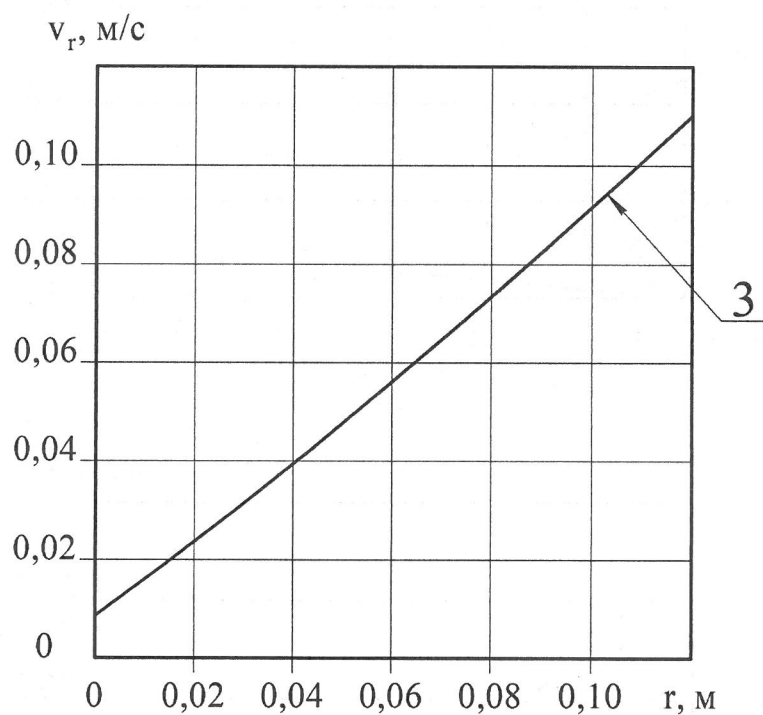
б)

а) – залежно від координати y ; б) – залежно від координати r ; 1 – при $r = 0,12$ м;
2 – при $r = 0,24$ м; 3 – при $y = 0$ м; 4 – при $y = 0,98$ м

Рисунок 2.5 – Графіки зміни складової v_r швидкості потоку від
циліндричних координат y та r в зоні I



а)



б)

а) – залежно від координати y ; б) – залежно від координати r ; 1 – при $r = 0$ м; 2 – при $r = 0,12$ м; 3 – при $y = 0,98$ м

Рисунок 2.6 – Графіки зміни складової v_r швидкості потоку від циліндричних координат y та r в зоні II

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ

Лист

49

Загалом, можна зробити висновок, що складова v_r швидкості потоку при подачі стисненого повітря до камери пневматичного змішувача спочатку має максимально можливе значення понад 15 м/с, адже, вся енергія спрямовується на закручування по стінкам конічного гвинтового каналу та циліндричної камери. Але з поступовим рухом до вихідного патрубку і збільшенням координати u , тобто переміщенням донизу, вона спадає і на відстані H_{3M} від початку додаткової циліндричної системи координат, взагалі, зникає і прирівнюється нулю.

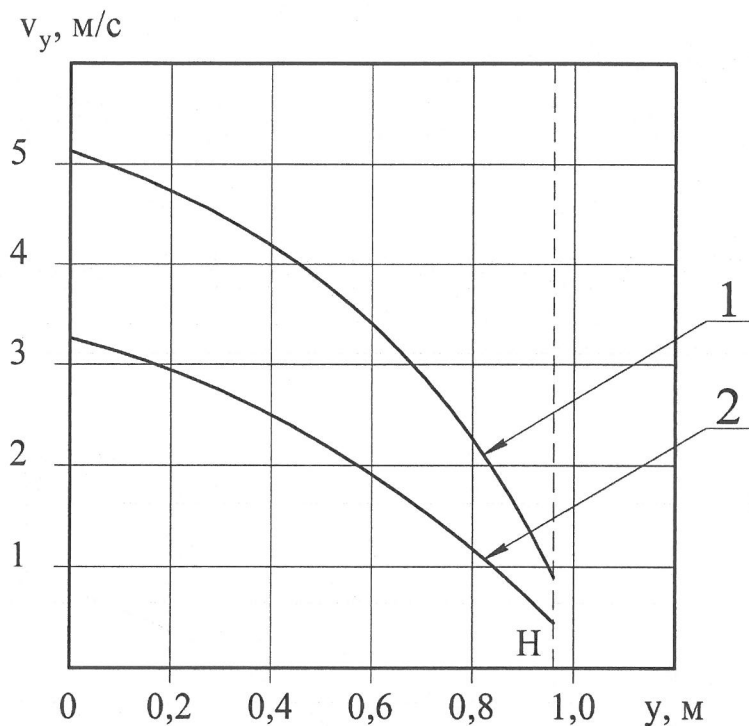
Можна позитивно оцінити таку тенденцію, що зі змінами координат зони камери змішувача, складова швидкості змінюється доволі інтенсивно. Різниця у швидкостях між сусідніми шарами повітряно-пилової суміші сприяє більш якісному перемішуванню компонентів суміші.

Аналогічні дії виконаємо і для складової v_y від швидкості потоку. Для зони I графіки наведено на рисунку 2.7. Складова v_y при зростанні координати u , що характеризує зміну висоти, починає, на відміну від складової v_r , зростати. Тобто із переміщенням вниз вектор швидкості змінює свій головний напрям, що є корисним для інтенсивного змішування компонентів суміші. При зростанні ж r картина є подібною для обох складових швидкості потоку. Також координата u має суттєво більший вплив на процес зростання v_y у порівнянні із координатою r .

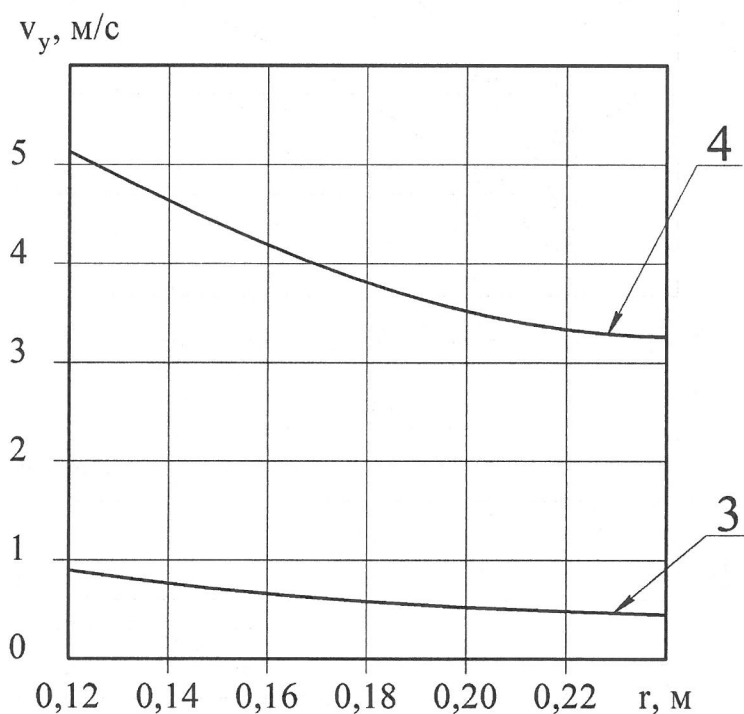
Нарощування величини v_y відбувається від значення близького до нуля, лише 0,5 м/с, що зумовлено незначним кутом нахилу конічного гвинтового каналу, через який заходить повітря, до значення близького до максимального у понад 5 м/с (що в 10 разів вище за початкове) вже у зоні переходу від циліндричної частини камери пневматичного змішувача до конічної.

Графіки зміни складової v_y у зоні II показані на рисунку 2.8. У цій зоні v_y набуває своїх максимальних значень, що сягають до 5,27 м/с, і змінюється зовсім несуттєво від переходу по будь-якій із координат. Тому, особливо у нижній частині зони II, можемо констатувати, майже, відсутність змін. Але саме тут це не є проблемою, адже, на виході із камери змішувача суміш вже набуває необхідної однорідності та якості розподілу компонентів.

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		50



а)



б)

а) – залежно від координати y ; б) – залежно від координати r ; 1 – при $r = 0,12$ м;
2 – при $r = 0,24$ м; 3 – при $y = 0$ м; 4 – при $y = 0,98$ м

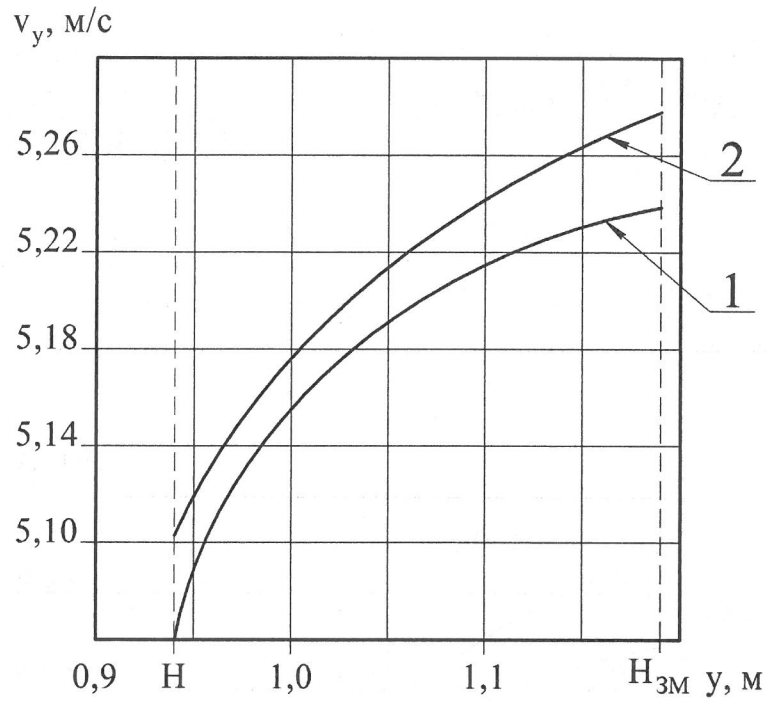
Рисунок 2.7 – Графіки зміни складової v_y швидкості потоку від
циліндричних координат y та r в зоні I

Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

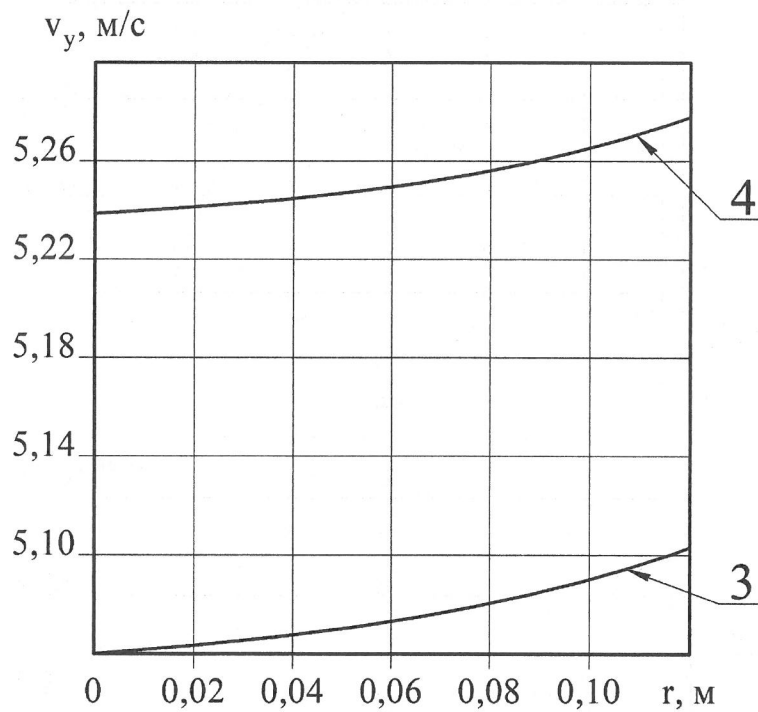
ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ

Лист

51



а)



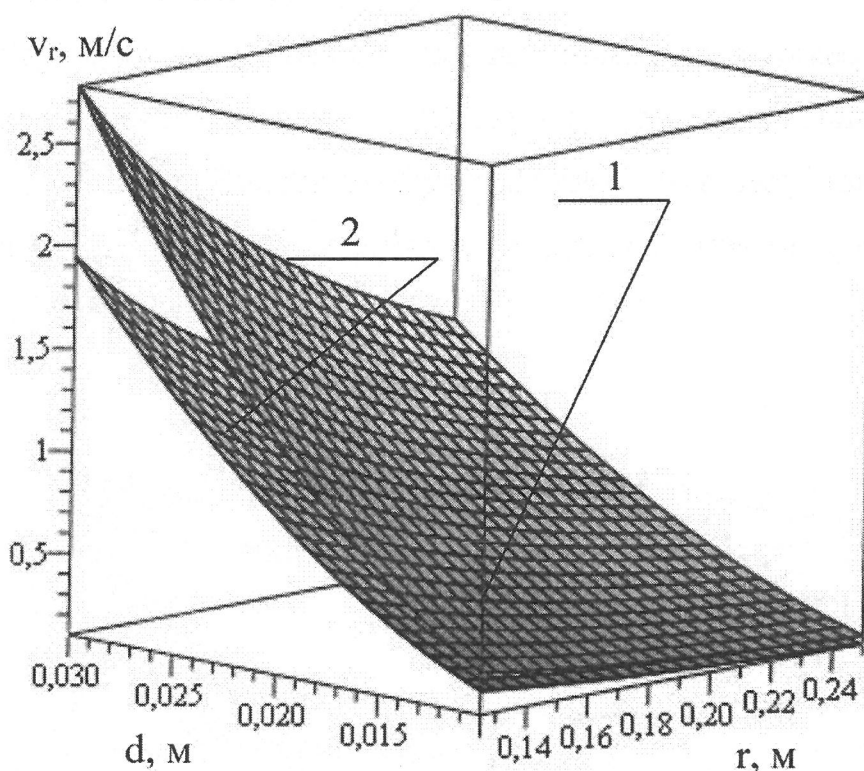
б)

а) – залежно від координати y ; б) – залежно від координати r ; 1 – при $r = 0$ м; 2 – при $r = 0,12$ м; 3 – при $y = 0,98$ м; 4 – при $y = 1,18$ м

Рисунок 2.8 – Графіки зміни складової v_y швидкості потоку від циліндричних координат y та r в зоні II

Для продуктивності змішувача є важливим показник внутрішнього діаметру конічного гвинтового каналу d . Тому побудуємо графіки складових швидкості повітряного потоку для діапазону значень d від 10 мм до 30 мм також із врахуванням координати r і у розрізі різних висот циліндричної камери змішувача (рисунки 2.9 та 2.10).

З графіку (рисунок 2.9) видно, що збільшення діаметру d сприяє нарощуванню складової v_r швидкості потоку і паралельно посилює вплив на це зростання координати r . Висота камери змішувача має таку тенденцію, що зі зниженням та наближенням до вихідного патрубку впливовість кожного з двох факторів, що розглядалися, зменшується.



1 – при висоті з координатою 0,5 Н; 2 – при висоті з координатою 0,75 Н

Рисунок 2.9 – Графіки зміни складової v_r швидкості потоку від циліндричної координати r в зоні I та внутрішнього діаметру конічного гвинтового каналу d

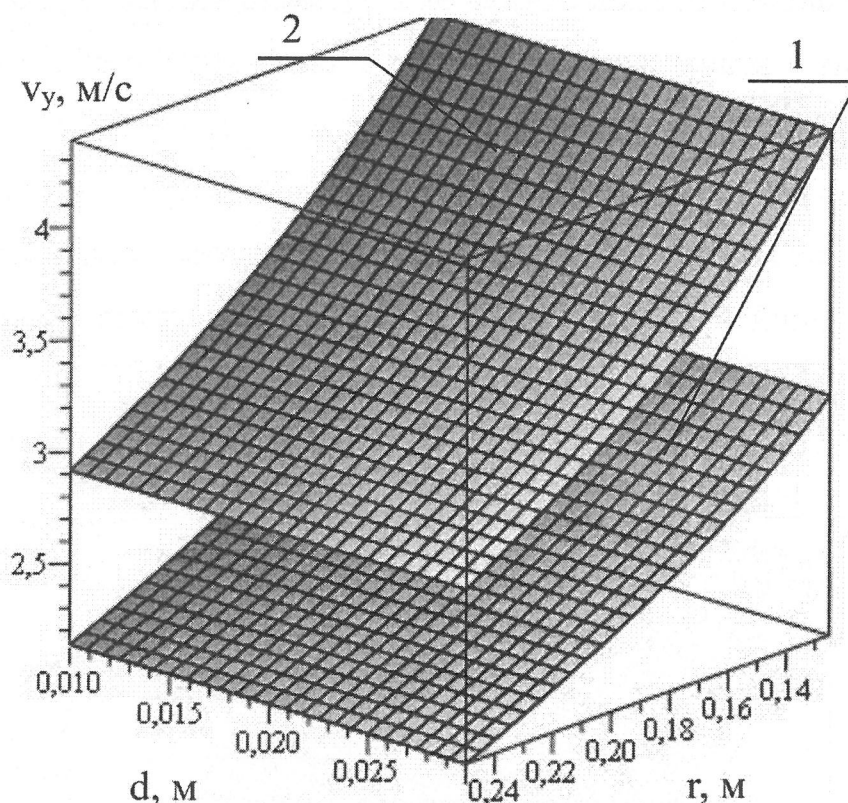
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата

ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ

Лист

53

Якщо ж розглядати зміни складової v_y швидкості потоку (рисунок 2.10), то чітко прослідковується, що діаметру d не чинить ніякого істотного впливу на неї. Також діаметр d не змінює характер впливу ні координати r , ні висоти камери змішувача. Отже, він, головним чином відповідає за закручування суміші у корпусі змішувача, і сприяє його зростанню із збільшенням прохідного перерізу конічного гвинтового каналу. Тому складова v_y швидкості потоку більше залежить від кута нахилу гвинтової лінії каналу та гравітаційного впливу.



1 – при висоті з координатою 0,5 Н; 2 – при висоті з координатою 0,75 Н

Рисунок 2.10 – Графіки зміни складової v_y швидкості потоку від циліндричної координати r в зоні I та внутрішнього діаметру конічного гвинтового каналу d

Графіки змін складових швидкості потоку показують, що для змішувача

підтримується наявність значної величини тангенційної складової, що відображена показником v_r . Це підтверджує можливості такого пневматичного змішувача створювати хаотично-вихрові потоки та забезпечувати інтенсивне перемішування матеріалів сухої будівельної суміші, в тому числі й теплоізоляційної, котра вимагає високої інтенсивності впливу через різницю у густині окремих складових компонентів. І, у підсумку, підтверджує можливість змішувача досягати необхідного рівня однорідності та якості сухої будівельної суміші, включно із теплоізоляційними продуктами.

2.4 Конструктивні параметри змішувача

Витрата повітря у змішувачі з конічним гвинтовим каналом може бути описана трьома закономірностями, які утворюють систему [36].

Перша закономірність характеризуватиме умови руху:

$$\frac{dp_B}{g \cdot \rho} + v_{33} \cdot \frac{dv_{33}}{2 \cdot g} - K_\Gamma \cdot \frac{dx \cdot v_{33}^2}{2 \cdot d \cdot g} = 0, \quad (2.70)$$

де p_B – тиск на вході у конічний гвинтовий канал від повітря, що нагнітається, Па;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

ρ – густина повітря, кг/м³;

K_Γ – коефіцієнт гідравлічного опору, котрий можна визначити як [40]:

$$K_\Gamma = 0,0668 \cdot \left(\frac{158}{Re} + \frac{2 \cdot S_E}{d} \right)^{0,2}, \quad (2.71)$$

де S_E – еквівалентне значення шорсткості внутрішньої поверхні камери.

Друга закономірність характеризуватиме умови стану:

$$p_B = \rho \cdot R_\Gamma \cdot T, \quad (2.72)$$

де R_Γ – універсальна газова стала для повітря, Дж/(моль К);

T – температура потоку суміші у змішувачі, К.

Третя закономірність характеризуватиме умови рівноваги масових витрат Q_M , кг/с, повітря під тиском через канали змішувача:

$$Q_M = \rho \cdot v_{33} \cdot A, \quad (2.73)$$

де A – площа поперечного перерізу отвору, виконаному на конічному гвинтовому каналу, m^2 .

Також звідси отримаємо:

$$v_{33} = \frac{Q_M}{\rho \cdot A}. \quad (2.74)$$

Запишемо рівняння руху (2.68) у вигляді:

$$\frac{dp_B}{g \cdot \rho} = K_\Gamma \cdot \frac{dx \cdot v_{33}^2}{2 \cdot d \cdot g} - v_{33} \cdot \frac{dv_{33}}{2 \cdot g}. \quad (2.75)$$

Домноживши обидві його частини на ρ^2 та g отримаємо:

$$\rho \cdot dp_B = K_\Gamma \cdot \frac{dx \cdot v_{33}^2 \cdot \rho^2}{2 \cdot d} - v_{33} \cdot \frac{dv_{33} \cdot \rho^2}{2}. \quad (2.76)$$

Підставивши значення швидкості v_{33} потоку назовні змішувача (2.72) до рівняння (2.74) матимемо:

$$\rho \cdot dp_B = \frac{dx \cdot Q_M^2 \cdot K_\Gamma}{2 \cdot d \cdot A^2} - \frac{v_B \cdot dv_{33} \cdot \rho^2}{2}. \quad (2.77)$$

Підставивши значення тиску p_B (2.70) до рівняння (2.75) матимемо:

$$\frac{\rho \cdot dp_B}{R_\Gamma \cdot T} = \frac{Q_M^2 \cdot K_\Gamma \cdot dx}{2 \cdot d \cdot A^2} - \frac{v_B \cdot dv_{33} \cdot \rho^2}{2}. \quad (2.78)$$

Виконаємо інтегрування рівняння (2.76) від початкового тиску на певній висоті у циліндричній частині камери пневматичного змішувача p_{B0} до кінцевого тиску p_{B1} . А також аналогічно до тиску по висоті камери від 0 до H , і по швидкості руху повітряних мас назовні змішувача від початкової швидкості v_{330} на вході в камеру пневматичного змішувача до кінцевої v_{331} на виході з камери.

$$\frac{1}{R_\Gamma \cdot T} \cdot \int_{p_{B0}}^{p_{B1}} \rho \cdot dp_B = \frac{Q_M^2 \cdot K_\Gamma}{2 \cdot d \cdot A^2} \cdot \int_0^H dx - \frac{\rho^2}{2} \cdot \int_{v_{330}}^{v_{331}} v_B \cdot dv_{33}. \quad (2.79)$$

У результаті отримаємо:

$$\frac{p_{B0}^2 - p_{B1}^2}{R_\Gamma \cdot T} = \frac{Q_M^2 \cdot K_\Gamma \cdot H}{2 \cdot d \cdot A^2} - \frac{(v_{330}^2 - v_{331}^2) \cdot \rho^2}{2}. \quad (2.80)$$

Якщо виразити площу перерізу A у вигляді:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}. \quad (2.81)$$

Тоді зможемо записати:

$$\frac{4 \cdot Q_M^2 \cdot K_\Gamma \cdot H}{\pi^2 \cdot d^5} = \frac{p_{B0}^2 - p_{B1}^2}{R_\Gamma \cdot T} + \frac{(v_{330}^2 - v_{331}^2) \cdot \rho^2}{2}. \quad (2.82)$$

Тепер є можливість отримати розрахункову формулу для визначення витрати повітря під тиском за масою. Вона матиме вигляд:

$$Q_M = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot d^5 \cdot \left[\frac{p_{B0}^2 - p_{B1}^2}{R_\Gamma \cdot T} + \frac{(v_{330}^2 - v_{331}^2) \cdot \rho^2}{2} \right]}{4 \cdot K_\Gamma \cdot H}}. \quad (2.83)$$

Перейдемо до витрати повітря під тиском за об'ємом Q_O , м³/с. Вона визначатиметься за формулою:

$$Q_O = \frac{Q_M}{\rho}. \quad (2.84)$$

У процесі роботи пневматичного змішувача компоненти сухої будівельної суміші знаходяться у виваженому стані у потоці повітря. Тому для оцінки густини такого середовища, слід використовувати формулу [10]:

$$\frac{1}{\rho_3} = \frac{C}{\rho_{CT}} + \frac{1-C}{\rho}, \quad (2.85)$$

де ρ_3 – загальна густина потоку повітрянопилового середовища, кг/м³;

ρ_{CT} – середня густина твердої фази компонентів сухої суміші, кг/м³;

C – масова концентрація твердої фази компонентів сухої суміші, кг/кг.

Для визначення продуктивності пневматичного змішувача Π , кг/с, важливим буде показник середньої густини саме твердої фази. Адже, готовий товарний продукт, що визначає продуктивність машини, складається виключно із твердої фази. Тому із рівняння (2.85) можемо виразити $\rho_{\text{ст}}$, його значення буде:

$$\rho_{\text{ст}} = \frac{C}{\frac{1}{\rho_3} - \frac{1-C}{\rho}} \quad (2.86)$$

Тепер можемо знайти продуктивність.

$$\Pi = \rho_{\text{ст}} \cdot v_{\text{зз}} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.87)$$

На основі отриманою залежності побудовано поверхневий тривимірний графік залежності продуктивності змішувача від швидкості руху повітря назовні із патрубку на виході із його камери $v_{\text{зз}}$ та середньої густини складових суміші $\rho_{\text{ст}}$ при діаметрі вихідного патрубку $D = 100$ мм (рисунок 2.11).

З графіку можна зробити висновок, що з невеликими значеннями швидкості потоку із важкими компонентами суміші працювати складніше, і продуктивність зростає малими темпами. Але зі зростанням інтенсивності руху матеріалу в тому числі і важкі часточки починають активно захоплюватися і підніматися виважуватися у потоці та перемішуватися між собою. І продуктивність обладнання зростає більш відчутно, коли компоненти суміші набирають густину.

Тобто при зменшенні середньої густини складових суміші, наприклад, при введенні до неї відносно легких теплоізоляційних компонентів, для підтримання продуктивності змішувача на одному рівні необхідно буде збільшувати швидкість потоку.

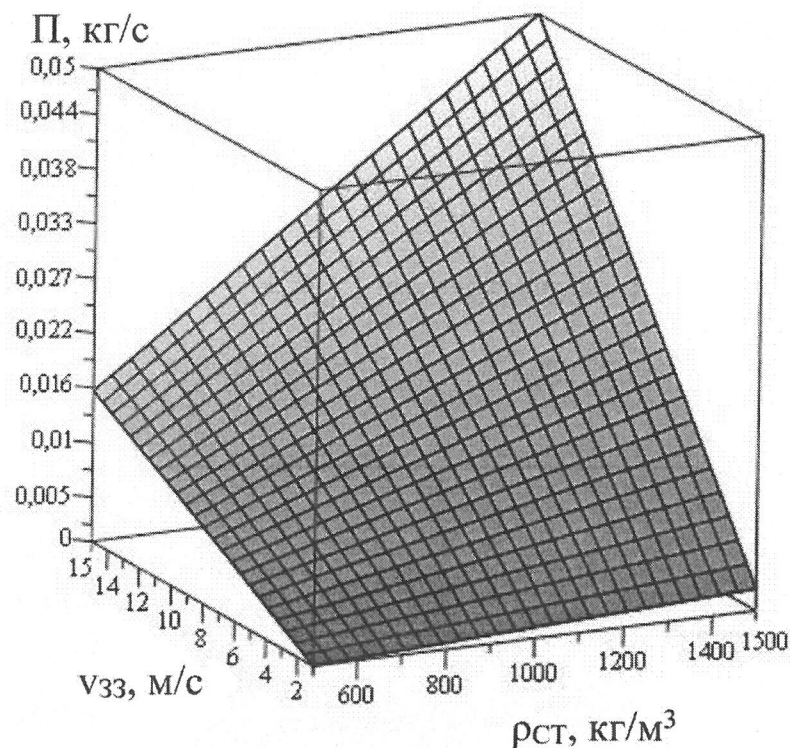


Рисунок 2.11 – Графік зміни продуктивності змішувача від швидкості руху повітря назовні із патрубку на виході із його камери v_{33} та середньої густини складових суміші $\rho_{ст}$ при діаметрі вихідного патрубку $D = 100$ мм

Також побудовано поверхневий тривимірний графік залежності продуктивності змішувача від швидкості руху повітря назовні із патрубку на виході із його камери v_{33} та діаметра вихідного патрубку D при середній густині складових суміші $\rho_{ст} = 800$ кг/м³ (рисунок 2.12).

Дана залежність є подібною до попередньої, тільки замість лінійного характеру впливу факторів, тут діаметр вихідного патрубку на більших значеннях швидкостей має нелінійну ознаку та більш істотний рівень впливу на продуктивність. Це означає, що при зменшенні діаметру вихідного патрубку у 2 рази для підтримання продуктивності змішувача на одному рівні необхідно буде збільшувати швидкість потоку менше, ніж вдвічі.

Отже, отримано детальні аналітичні вирази, які дають змогу визначати ключові конструктивно-технологічні параметри роботи пневматичного

змішувача, оснащеного конічним гвинтовим каналом. Ці вирази враховують як технічні характеристики самого змішувача, так і фізико-механічні властивості компонентів, що використовуються у процесі змішування, забезпечуючи тим самим оптимізацію його функціонування та адаптацію до заданих умов експлуатації.

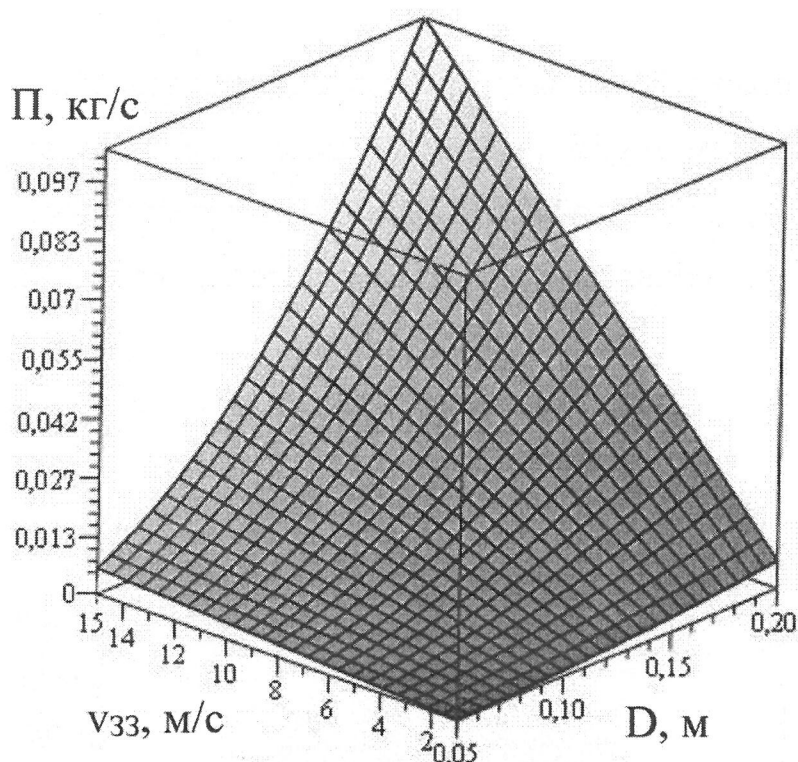


Рисунок 2.12 – Графік зміни продуктивності змішувача від швидкості руху повітря назовні із патрубку на виході із його камери v_{33} та діаметра вихідного патрубку D при середній густині складових суміші $\rho_{ст} = 800 \text{ кг/м}^3$

3 Методика підбору раціональних параметрів пневматичного змішувача для теплоізоляційних матеріалів

3.1 Початкові геометричні параметри змішувача

Для вибору раціональних параметрів змішувача, що будуть формувати його робочі експлуатаційні характеристики необхідно мати базову інформацію про такі показники, як:

v_B – вхідна швидкість повітря до кінцевого гвинтового каналу камери змішувача, м/с;

p – тиск стисненого повітря, що подається до вхідного каналу камери змішувача, Па;

$\rho_{ст}$ – середня густина твердої фази компонентів сухої суміші, кг/м³;

ρ – густина стисненого повітря, кг/м³.

Вихідною експлуатаційною характеристикою, на основі якої виникає потреба проводити розрахунки раціональних параметрів змішувача є його продуктивність Π , що може бути визначена у кг/год, або кг/с. Отже, знаючи продуктивність, спочатку через вираження величини з формули (2.87) знаходиться діаметр вихідного патрубку D , м (рисунок 2.2):

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \Pi}{\rho_{ст} \cdot v_{зз} \cdot \pi}}. \quad (3.1)$$

Вихідну швидкість $v_{зз}$ руху повітря назовні із патрубка на виході із камери

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ					
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Методика підбору раціональних параметрів пневматичного змішувача для теплоізоляційних матеріалів			Літ.	Лист	Листів
Розроб.	Мороз		19.01							
Перев.	Рогозін		19.01						62	4
								Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІ ІТР, 2026 р.		
Н. конт.	Васильєв		19.01							
Затв.	Орисенко		19.01							

змішувача знайдемо із формули (2.10):

$$V_{33} = \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cdot V_B. \quad (3.2)$$

Для подачі матеріалу компонентів суміші використовується вхідний патрубок. Його поперечний переріз знайдемо, як:

$$A_M = \frac{\pi \cdot D_M^2}{4}, \quad (3.3)$$

де D_M – діаметр вхідного патрубку для подачі матеріалу компонентів суміші, м.

3.2 Конструктивно-технологічні параметри змішувача

Стиснене повітря є тим середовищем, де власне і відбувається процес перемішування сухих сипучих матеріалів у пневматичному змішувачі (рисунок 2.2). Воно витрачається на змішування складових суміші, продавлювання повітряно-пилового середовища в камері змішувача до вихідного патрубку і подолання опорів різного характеру та надання напрямків руху потоку.

Витрата стисненого повітря за об'ємом за виразом (2.84) буде становити:

$$Q_o = \frac{Q_M}{\rho}. \quad (3.4)$$

Витрата стисненого повітря за масою за виразом (2.83) буде:

$$Q_M = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot d^5 \cdot \left[\frac{p_{B0}^2 - p_{B1}^2}{R_\Gamma \cdot T} + \frac{(v_{330}^2 - v_{331}^2) \cdot \rho^2}{2} \right]}{4 \cdot K_\Gamma \cdot H}}. \quad (3.5)$$

Тоді діаметр одного окремо взятого отвору на конічному гвинтовому каналі, через який подається повітря, знаходитиметься за формулою:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_M}{\pi \cdot v_{33}}}. \quad (3.6)$$

Конічний гвинтовий канал може мати різну кількість отворів для виходу повітря. Їх необхідна кількість може бути визначена за допомогою виразу (2.6):

$$n = \frac{d^2 \cdot v_B}{d_3^2 \cdot v_3}. \quad (3.7)$$

Висота гвинтової лінії конічного гвинтового каналу становитиме:

$$H_\Gamma = \frac{1}{10} \cdot H. \quad (3.8)$$

З метою забезпечення постійного пневматичного змішування складових суміші у вертикальному напрямку на основі заданої витрати повітря розраховується діаметр вхідного отвору конічного гвинтового каналу. Він буде:

$$d = \frac{Q_M}{\rho_\Pi \cdot v_{33}}. \quad (3.9)$$

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
						64
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

Циліндрична частина камери пневматичного змішувача матиме об'єм, що визначатиметься за формулою:

$$V_{\text{змц}} = \pi \cdot R^2 \cdot H. \quad (3.10)$$

Потужність компресора, яка буде потрібна для нагнітання стисненого повітря до пневматичного змішувача, може бути знайдена як [10]:

$$N_K = 1,69 \cdot Q_{\text{мм}} \cdot R \cdot T_0 \cdot \ln \left(\frac{p}{p_0} \right), \quad (3.11)$$

де $Q_{\text{мм}}$ – витрата матеріалу, що змішується, за масою, кг/с;

T_0 – температура навколишнього середовища, де працює змішувач, К;

p_0 – атмосферний тиск, Па;

p – тиск, який створює компресор при нагнітанні повітря, Па.

Витрату матеріалу, що змішується, за масою можна знайти із виразу:

$$Q_{\text{мм}} = Q_{\text{м}} \cdot C, \quad (3.12)$$

де C – масова концентрація твердої фази компонентів сухої суміші, кг/кг.

Використовуючи запропоновані залежності, можна підібрати конструктивно-технологічні параметри для забезпечення максимальної ефективності експлуатації пневматичного змішувача для заданих умов.

Висновки

У роботі проаналізовано стан та рівень розвитку обладнання для реалізації технологій виготовлення сухих будівельних сумішей загалом та їх теплоізоляційних видів зокрема. Виявлено проблему, що переважна більшість змішувачів не можуть якісно працювати, коли потрібно змішувати сухі компоненти суміші із густиною, котра суттєво відрізняється, що є характерним для теплоізоляційних сумішей. Встановлено, що найкращі результати з приготування сухих сумішей продемонстрували пневматичні змішувачі, але для вирішення проблем із роботою з теплоізоляційними сумішами, вони повинні мати конструктивні доопрацювання, одним із найефективнішим з яких є встановлення на вході до змішувача конічного гвинтового каналу.

Для пневматичного змішувача з конічним гвинтовим каналом побудовано математичну модель робочих процесів, яка дозволяє визначати закономірності руху потоків повітряно-пилового середовища у камері змішувача. Знайдено рівняння для опису складових вектору швидкості потоку, тангенційної складової, що відображена показником v_r , та поздовжньої вертикальної, що відображена через v_y . Визначено залежності для розрахунку витрат повітря за масою та об'ємом, продуктивності змішувача.

Отримані результати при застосуванні математичної моделі підтвердили, що для змішувача підтримується наявність значної величини тангенційної складової швидкості потоку v_r . Це сприяє створенню хаотично-вихрових потоків та забезпечує інтенсивне перемішування матеріалів сухої будівельної суміші, в тому числі й теплоізоляційної, котра вимагає високої інтенсивності впливу через різницю у густині її окремих складових компонентів.

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ					
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Висновки	Літ.	Лист	Листів		
Розроб.		Мороз		19.01						
Перев.		Рогозін		19.01			66	2		
						Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІ ІТР, 2026 р.				
Н. конт.		Васильєв		19.01						
Затв.		Орисенко		19.01						

Розроблено детальні аналітичні залежності, які дозволяють визначати основні конструктивно-технологічні параметри функціонування пневматичного змішувача з конічним гвинтовим каналом. У цих залежностях враховано технічні особливості самого змішувача й фізико-механічні властивості складових компонентів сумішей, які будуть задіяні у змішувальному процесі. Такий підхід забезпечує ефективну оптимізацію роботи змішувача та його адаптацію до заданих специфічних умов експлуатації.

Також у роботі розроблено методику підбору конструктивно-технологічних параметрів для забезпечення максимальної ефективності експлуатації пневматичного змішувача у заданих умовах. Це дозволить розширити можливі сфери використання пневматичних змішувачів.

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		67

Список літератури

- 1 Назаренко І.І., Туманська О.В. Машини і устаткування підприємств будівельних матеріалів: Конструкції та особливості експлуатації. – К.: Вища школа, 2004. – 590 с.
- 2 Сівко В. Й., Поляченко В. А. Обладнання підприємств промисловості будівельних матеріалів і виробів: підручн. / за ред. В. Й. Сівка. КНУБА. – Київ: «ТОВ «АВЕГА», 2004. – 276 с.
- 3 Ефективні сухі будівельні суміші та розчини на їх основі: монографія. / Дворкін Л.Й., Житковський В.В., Марчук В.В. – Київ: Каравела, 2024. – 348 с.
- 4 Жван В. Д. Технологія будівельного виробництва в житлово-комунальному господарстві: навч. посібник / В. Д. Жван; Харків. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 316 с.
- 5 Баладінський В. Л., Назаренко І. І., Онищенко О. Г. Будівельна техніка: підручник. Київ-Полтава: КНУБА-ПолтНТУ, 2002. 463 с.
- 6 Карапузов Є. К. Матеріали і технології в сучасному будівництві: Підручник / Є. К. Карапузов, В. Г. Соха, Т. Є. Остапченко. – Київ: Вища школа, 2004. – 416 с.
- 7 Будівельна техніка: навч. посібник / В. Л. Баладінський, О. М. Лівінський, Л. А. Хмара та ін. Київ: Либідь, 2001. 368 с.
- 8 Сукач М. К. Будівельна техніка: навч. посібник / М. К. Сукач, І. В. Ніколенко, О. Ю. Вольтерс. – Київ-Сімферополь: КНУБА-НАПКС, 2010. – 296 с.
- 9 Прикладна механіка робочих процесів машин: Монографія / Сівко В.Й., Кузьмінець М.П. – К.: НТУ, 2009. – 349 с.
- 10 Назаренко І.І. Машини для виробництва будівельних матеріалів. – К.: КНУБА, 1999. – 488 с.

					ГММ.601-МММ.011-00.00.000ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата	Список літератури	Літ.	Лист	Листів
Розроб.		Мороз		19.01				
Перев.		Рогозін		19.01			68	4
						Національний університет імені Юрія Кондратюка ННІ ІТР, 2026 р.		
Н. конт.		Васильєв		19.01				
Затв.		Орисенко		19.01				

11 Біла Т. Я. Обробка інформації в інтерактивних середовищах: навчальний посібник / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко – Київ: КНУТД, 2017. – 396 с.

12 Онищенко О. Г., Помазан В. М. Будівельна техніка: навчальний посібник. Київ: Урожай, 1999. 304 с.

13 Коробко Б. О. Дослідження якості процесу інтенсивного перемішування сухої будівельної суміші у змішувачі штукатурного агрегату АШГ-4 конструкції ПолтНТУ / Коробко Б. О., Павленко А. М., Матвієнко А. М., Вірченко В. В. Галузеве машинобудування, будівництво: збірник наукових праць. Полтава: ПолтНТУ, – 2013. Вип. 1 (36)/ – С. 443–450.

14 Ловейкін В. С., Назаренко І. І., Онищенко О. Г. Теорія технічних систем: Навч. посібник. Київ-Полтава: ІЗМН-ПолтДТУ, 1998. 175 с.

15 Клімов С. В. Експлуатація і обслуговування машин: Навч. посібник. – Рівне: НУВГП, 2010. – 218 с.

16 Технологія технічного обслуговування машин: навч. посібник / І.М.Бендера, С.М.Грушецький, П.І.Роздорожнюк, Я.М.Михайлович. – Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В., 2010. – 320 с.

17 Пелевін Л.Є. Гідравліка, гідромашини та гідропневмоавтоматика: підручник / Л.Є. Пелевін та ін. – К.: КНУБА, 2015. – 340 с.

18 Холодов А. М., Руднев В. К., Гарнець В. М. Технічні основи створення машин: підручник. Київ: УМК ВО, 1992. 288 с.

19 Arratia P.E. A study of the mixing and segregation mechanisms in the Bohle Tote Thender via DEM simulations / P.E. Arratia, Duong, Nhat-hang, F.J. Muzzio, P. Godbole, S. Reynolds // Powder Technology. – 2006. – V. 164. – P. 50-57.

20 Basinskas G. Numerical study of the mixing efficiency of a batch mixer using the discrete element method / G. Basinskas, M. Sakai. Powder Technology. – 2016. Vol. 301. – P. 815–829.

21 Beitzel I. Assessment and classification of performance mixers / I. Beitzel // Materials and Structures. – 2003. – №5. – P. 250-264.

- 22 Bowman F. Introduction to Bessel Functions / F. Bowman. – 2012. – 160 p.
- 23 Dury C.M., Competition of mixing and segregation in rotating cylinders Tidsskrift / C.M. Dury, G.H. Ristow // Physics of fluids. – 1999. – V. 11. – № 6. – P. 1387-1394.
- 24 Fenglei Q. Numerical study of particle mixing in a lab-scale screw mixer using the discrete element method / Q. Fenglei, Theodore J. Heindel, Mark M. Wright. Powder Technology. – 2017. Vol. 308. – P. 334–345.
- 25 Goncalves C., Materials for Construction and Civil Engineering / C. Goncalves, Margarido F. – 2015. – 902 p.
- 26 Kölbl A. Design parameter studies on cyclone type mixers / A. Kölbl, M.Kraut, A. Wenka. Chemical Engineering Journal. – 2011. №167 (2–3). – P. 444–454.
- 27 Kresta S. Advances in Industrial Mixing: A Companion to the Handbook of Industrial Mixing / S. Kresta, A. Etchells, D. Dickey, V. Atiemo-Obeng. – 2015. – 1044 p.
- 28 Lockwood E.H. A Book of Curves / E.H. Lockwood. Cambridge University Press. – 2009. – 212 p.
- 29 Naumann R.J. Introduction to the Physics and Chemistry of Materials / R.J. Naumann. – 2008. – 572 p.
- 30 Paul E. Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice / E. Paul, V. Atiemo-Obeng, S. Kresta. – 2003. – 1448 p.
- 31 Wang Duolin. Research on sound absorption properties of expanded perlite material / Wang Duolin // Low Temperature Architecture Technology. – 2011. – V.33 – P. 13-14.
- 32 Біла Т. Я. Математичне моделювання електромеханічних систем: навчальний посібник / Т. Я. Біла, В. В. Стаценко – Київ: КНУТД, 2016. – 400 с.
- 33 Основи наукових досліджень у прикладних задачах / Л.О.Кривопляс-Володіна, О. М. Гавва, В. Л. Яровий, С. В. Токарчук. – Київ: Сталь, 2016. – 271 с.

34 Павлице В. Г. Основи конструювання та розрахунок деталей машин. – К.: Вища школа, 1993. – 556 с.

35 Карачун В.В., Касьянов В.О. Теоретична механіка в прикладах і задачах: Учбове видання. – К.: КМУЦА, 1999. – 252 с.

36 Павловський М.А. Теоретична механіка: Підручник. – К.: Техніка, 2002. – 512 с.

37 Основи технології машинобудування / І. Назаренко, А.Т.Свідерський, Р.І. Рибалко, О.П.Дєдов / Навчальний посібник. Київ, КНУБА, 2010. – 165 с.

38 Кармазін В. В., Семенець В. В. Курс загальної фізики. Київ: Кондор, 2009. 786 с.

39 Сердюк Л. І. Основи теорії різноманітностей, теорії подібності та математичного моделювання. Полтава: ПолтНТУ, 2002. 98 с.

40 Ковальов І. О. Гідравліка, гідро- та пневмоприводи: навч. посіб. / І.О. Ковальов, О. В. Ратушний. – Суми : СумДУ, 2016. – 250 с.

41 Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин / Я. Т. Кіницький. – К.: Наукова думка, 2002. – 660 с.

42 Руденко П. О. Проектування технологічних процесів у машинобудуванні: Навчальний посібник. – Київ: Вища школа, 1993. – 414 с.

43 Жильцов О.Б. Теорія ймовірностей та математична статистика у прикладах і задачах: навч. посіб. Київ: Університет ім. Б. Грінченка.2015. 336 с.

44 ДСТУ Б В.2.7-126:2011 Суміші будівельні сухі модифіковані. Загальні технічні умови / Нац. стандарт України. Вид. офіц. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2011. – 51 с.

45 ДСТУ ISO 9000-2007. Системи управління якістю. основні положення та словник термінів / Нац. стандарт України. Вид. офіц. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2007. – 18 с.

46 ДСТУ ГОСТ 2.001:2006 Єдина система конструкторської документації. Загальні положення (ГОСТ 2.001-93) / Нац. стандарт України. Вид. офіц. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2006. – 27 с.

					ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПЗ	Лист
						71
Зм.	Лист	№ докум.	Підп.	Дата		

**Дослідження особливостей роботи
пневматичного змішувача для приготування
сухих теплоізоляційних сумішей**

Презентаційні матеріали

ГММ.601-мММ.011-00.00.000ПМ

Студент групи 601-мММ

Мороз Ігор Геннадійович

Магістерська робота
на тему:

**«Дослідження особливостей
роботи пневматичного
змішувача для приготування
сухих теплоізоляційних
сумішей»**

Керівник роботи: к. т. н. Рогозін Іван Анатолійович

Класифікація змішувачів для приготування будівельних матеріалів

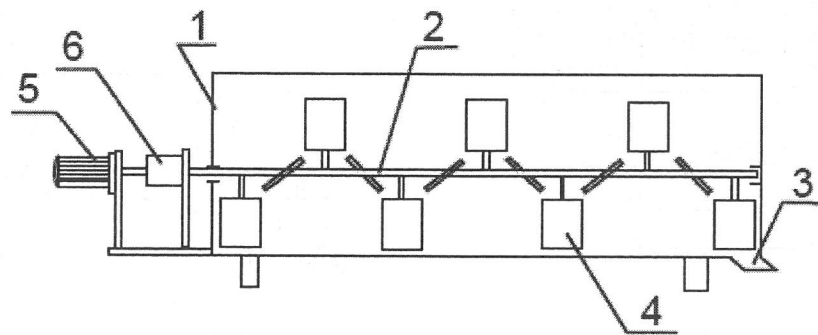
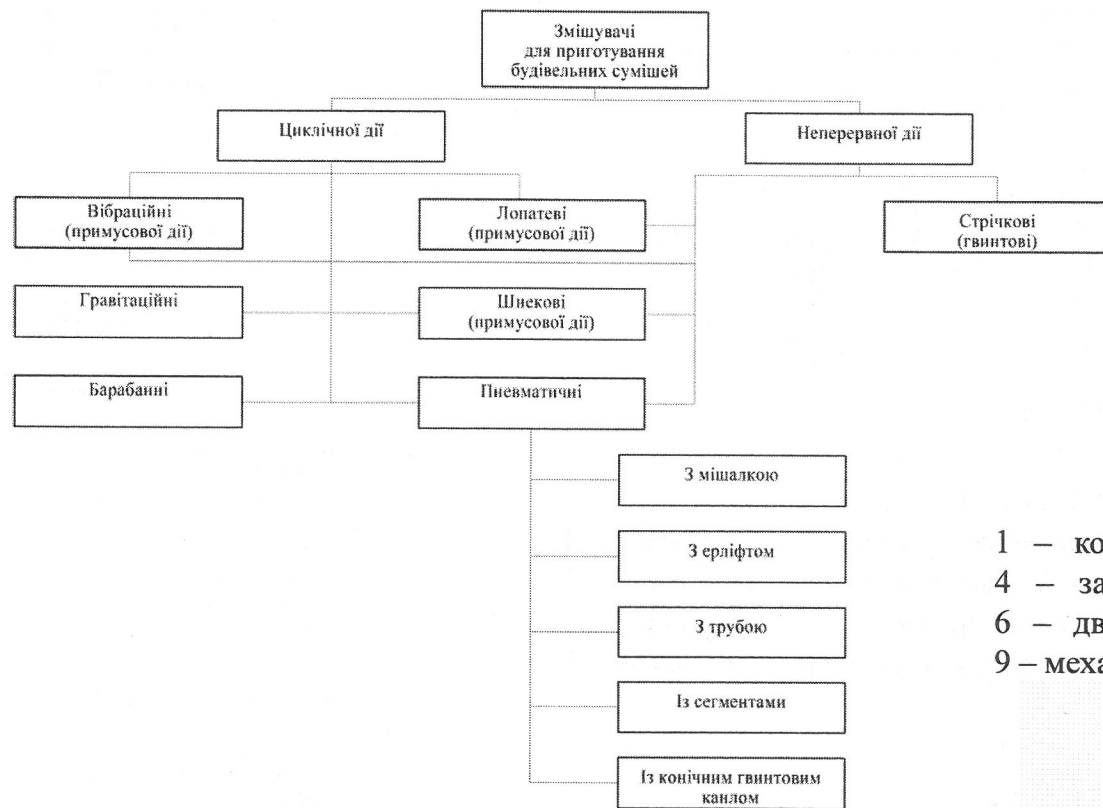


Схема лопатевого змішувача

1 – корпус; 2 – головний вал; 3 – вивантажувальний отвір;
4 – лопаті; 5 – двигун; 6 – редуктор приводу валу

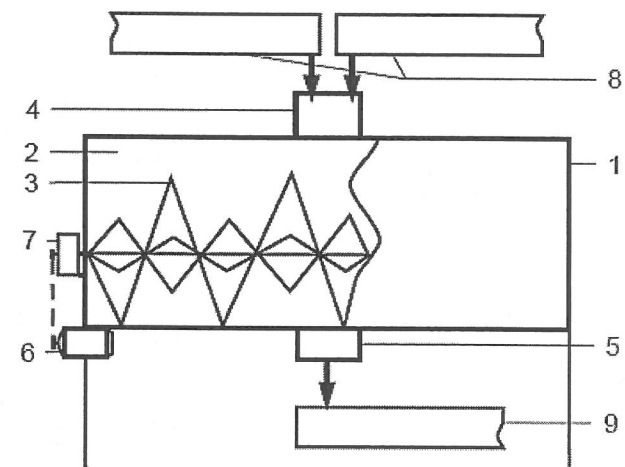


Схема стрічкового змішувача

1 – корпус; 2 – бункер змішувача; 3 – шнекова стрічка;
4 – завантажувальний блок; 5 – вивантажувальний блок;
6 – двигун; 7 – редуктор приводу валу; 8 – живильник;
9 – механізм забору готової суміші

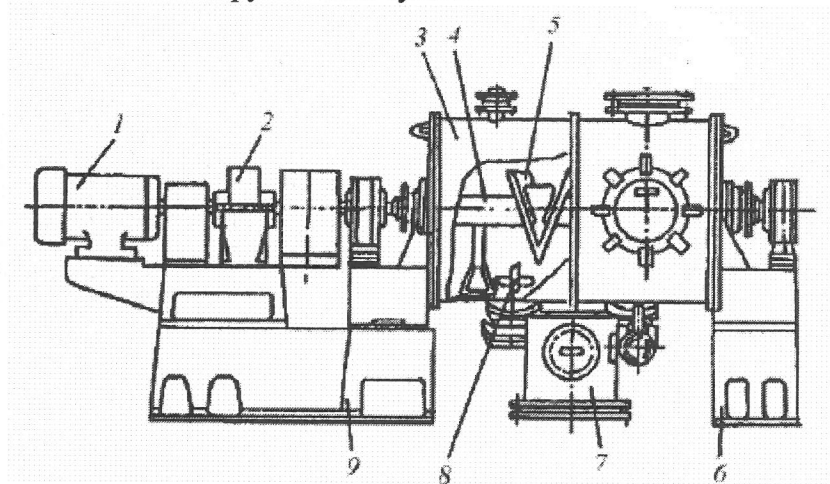


Схема шнекового змішувача

1 – двигун; 2 – редуктор приводу валу; 3 – корпус;
4 – головний вал; 5 – шнек; 6 – опора;
7 – вивантажувальний блок; 8 – щітка; 9 – основа

Класифікація змішувачів для приготування будівельних матеріалів

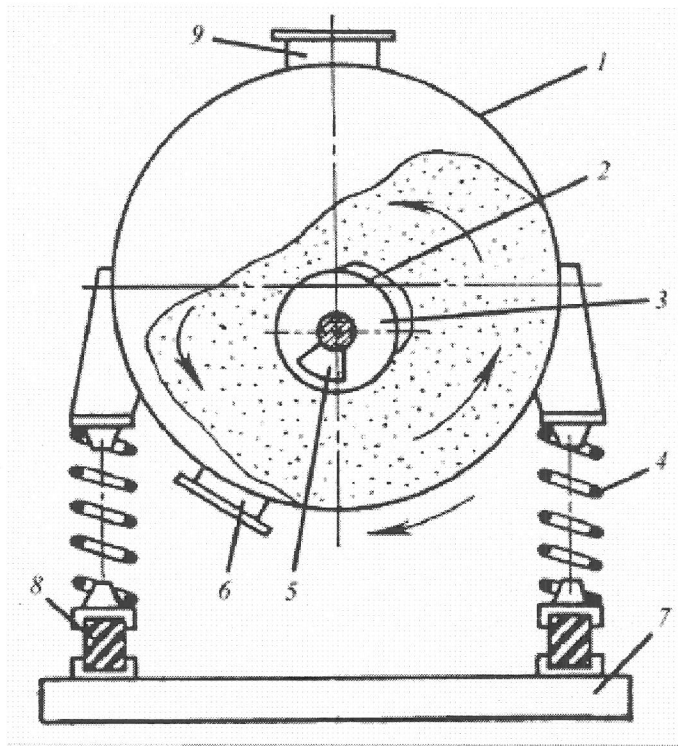


Схема вібраційного змішувача

1 – корпус; 2 – труба; 3 – головний вал; 4 – пружні опори;
5 – дебаланс; 6 – нижній патрубок; 7 – основа; 8 –
демпфери; 9 – верхній патрубок

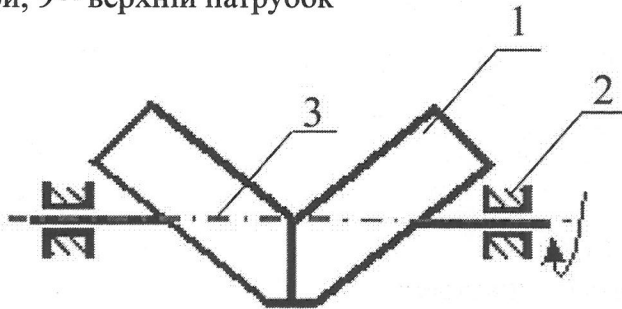


Схема Y-подібного змішувача

1 – корпус; 2 – опора; 3 – головний вал

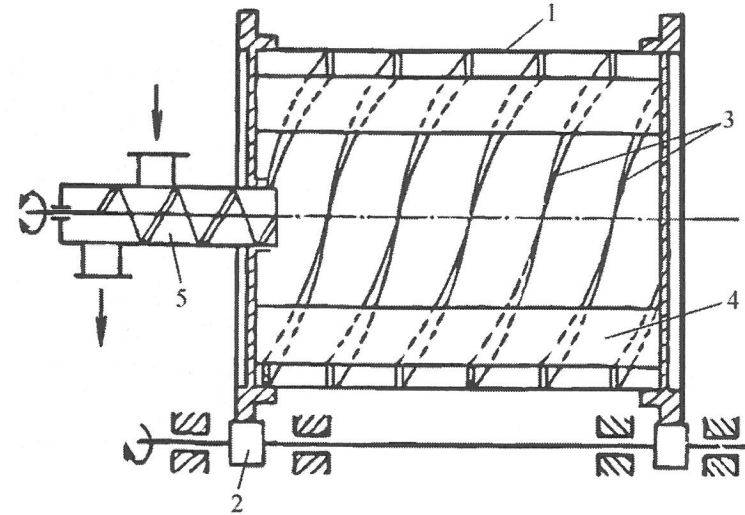


Схема циліндричного барабанного змішувача

1 – корпус; 2 – опора; 3 – гвинтові напрямлюючі потоку;
4 – перегородки; 5 – шнек

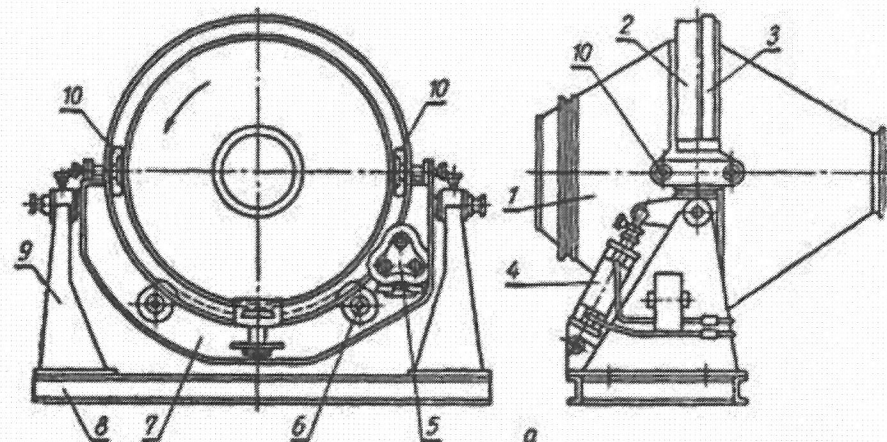


Схема гравітаційного змішувача

1 – обертовий барабан; 2 – бандаж; 3 – зубчаста передача;
4 – гідравлічний циліндр; 5 – редуктор приводу барабана;
6 – опорні ролики; 7 – траверса; 8 – корпус; 9 – стійки; 10 – опори
повздовжнього обертання

Класифікація змішувачів для приготування будівельних матеріалів

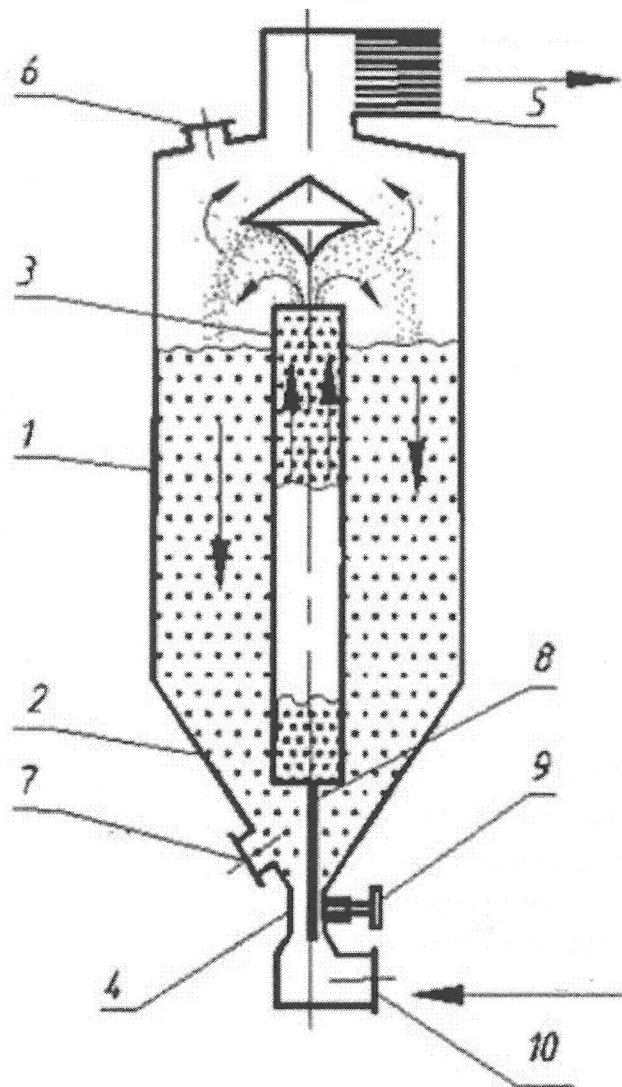
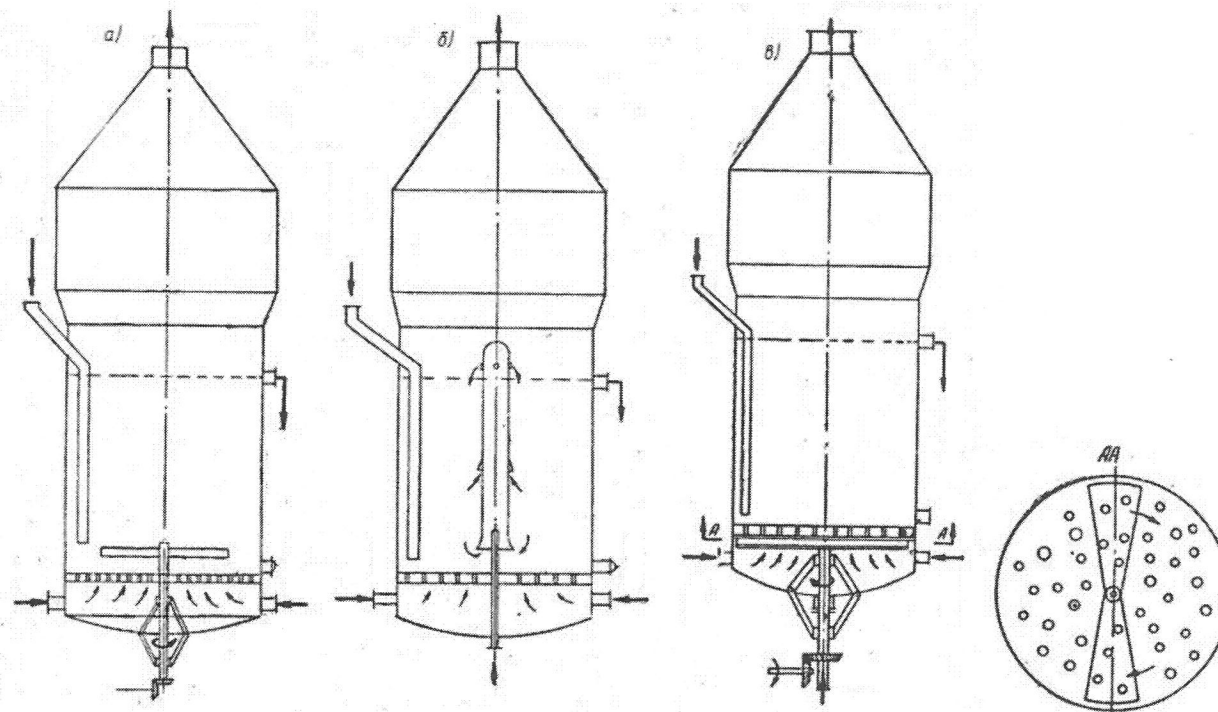


Схема пневматичного змішувача

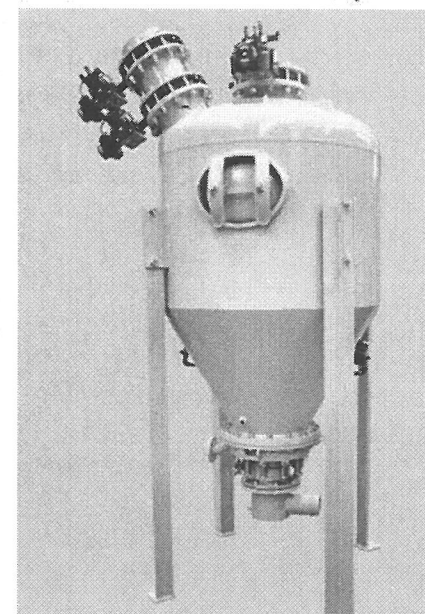
- 1 – циліндрична частина камери корпусу;
- 2 – конічна частина камери корпусу; 3 – труба;
- 4 – сопло; 5 – фільтр; 6 – завантажувальний патрубок;
- 7 – вивантажувальний патрубок; 8 – трубка;
- 9 – вентиль керування; 10 – канал подачі повітря



**Схеми різновидів модифікацій
пневматичних змішувачів**

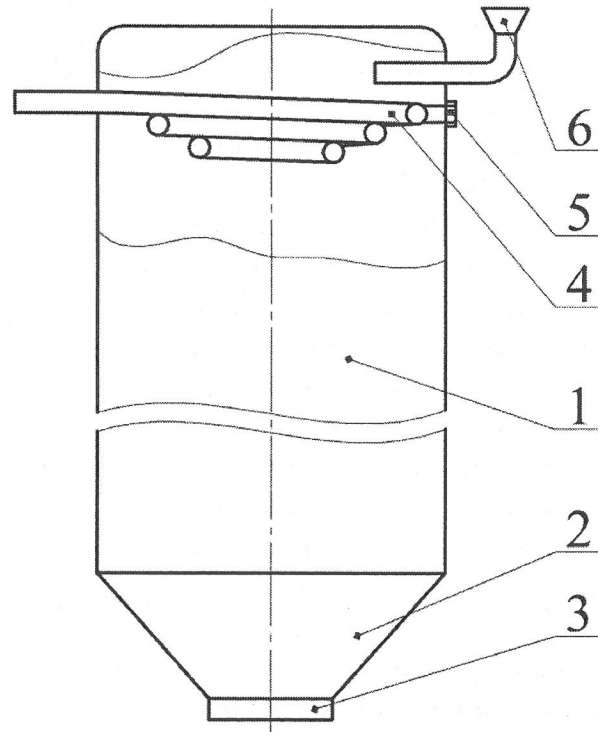
- а) – з додатковою мішалкою;
- б) – з аерліфтом;
- в) – з обертовим розподільником повітря

**Пневматичний
змішувач
BLENDCON**

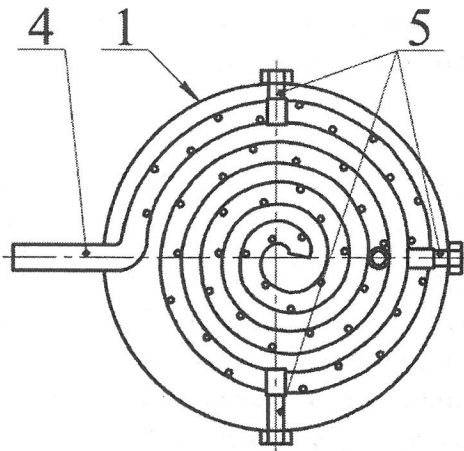


Теоретичне дослідження особливостей роботи змішувача

Розрахункова схема змішувача

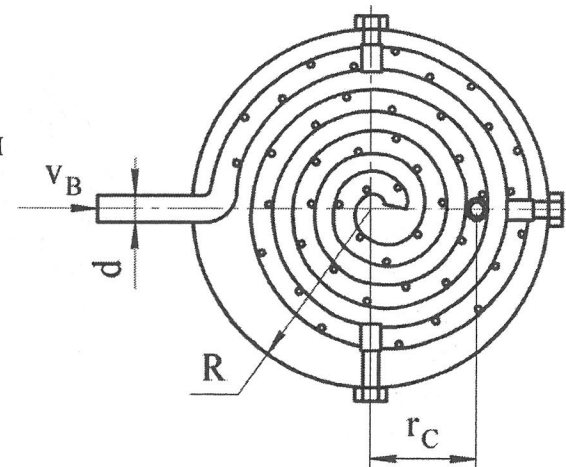
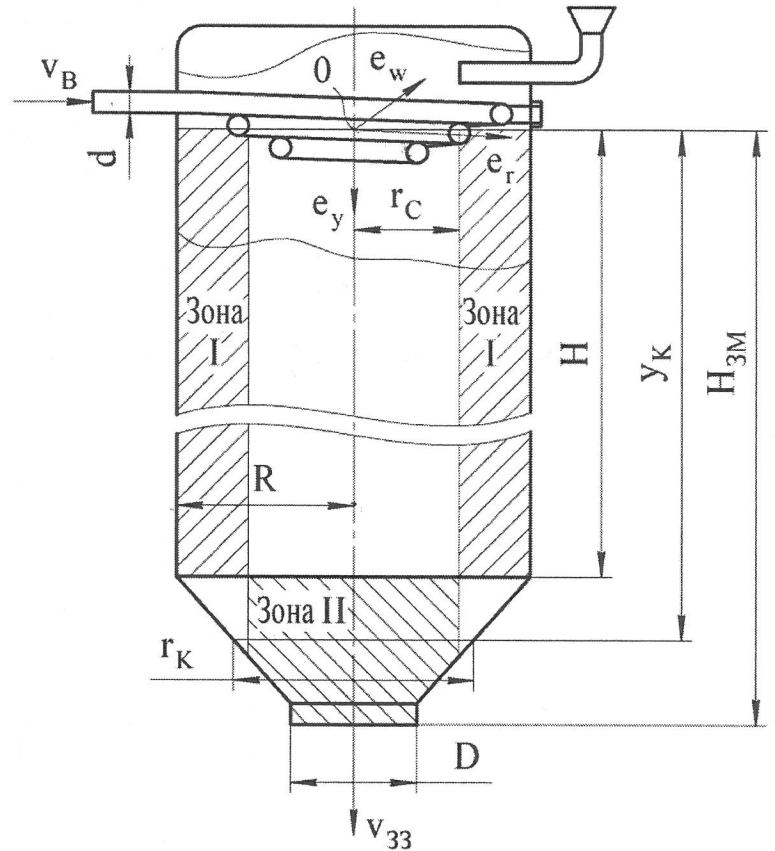


e_r , e_w , e_y – одиничні орти додаткової циліндричної системи координат;
 d – внутрішній діаметр конічного гвинтового каналу;
 v_B – вхідна швидкість повітря до конічного гвинтового каналу;
 D – діаметр патрубку на виході із камери змішувача;
 v_{33} – вихідна швидкість руху повітря назовні із патрубка на виході із камери змішувача;
 r_C – середній розмір конічного гвинтового каналу визначений у радіальному напрямку;
 R – радіус циліндричної частини камери пневматичного змішувача;
 H – висота циліндричної частини камери;
 H_{3M} – повна висота камери пневматичного змішувача



Пневматичний змішувач із конічним гвинтовим каналом

1 – циліндрична частина камери корпусу;
 2 – конічна частина камери корпусу;
 3 – вивантажувальний патрубок;
 4 – конічний гвинтовий канал;
 5 – тримачі конічного гвинтового каналу;
 6 – завантажувальний патрубок



Теоретичне дослідження особливостей роботи змішувача

Об'ємна витрата повітря на вході

$$Q_B = \frac{\pi \cdot d}{4} \cdot v_B$$

Об'ємна витрата повітря на виході

$$Q_{33} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot v_{33}$$

Масова витрата повітря змішувача

$$Q_M = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot d^5 \cdot \left[\frac{p_{B0}^2 - p_{B1}^2}{R_\Gamma \cdot T} + \frac{(v_{330}^2 - v_{331}^2) \cdot \rho^2}{2} \right]}{4 \cdot K_\Gamma \cdot H}}$$

Масова продуктивність змішувача

$$\Pi = \rho_{CT} \cdot v_{33} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

Вектор загальної швидкості потоку

$$\vec{v} = v_r \cdot \vec{e}_r + v_y \cdot \vec{e}_y$$

Складові швидкості потоку за умов

$$0 \leq r < r_C \quad 0 \leq y \leq H$$

$$v_r = \frac{v_B \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cdot I_M(N \cdot r) \cdot \cos(N \cdot y)}{I_B(N \cdot 0,5 \cdot D) \cdot \sin(N \cdot H)}$$

$$v_y = \frac{v_B \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cdot I_B(N \cdot r) \cdot \sin(N \cdot y)}{I_B(N \cdot 0,5 \cdot D) \cdot \sin(N \cdot H)}$$

Складові швидкості потоку за умов

$$r \geq r_C \quad 0 \leq y \leq H$$

$$v_r = \frac{v_B \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cdot I_B(N \cdot r_C) \cdot K_M(N \cdot r) \cdot \cos(N \cdot y)}{I_B(N \cdot 0,5 \cdot D) \cdot \sin(N \cdot H) \cdot K_B(N \cdot r_C)}$$

$$v_y = \frac{v_B \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cdot I_B(N \cdot r_C) \cdot K_B(N \cdot r_C) \cdot \sin(N \cdot y)}{I_B(N \cdot 0,5 \cdot D) \cdot \sin(N \cdot H) \cdot K_B(N \cdot r_C)}$$

Аналіз результатів математичної моделі руху потоку у камері змішувача

Геометричні параметри пневматичного змішувача

№	Параметр	Позначення	Величина
1	Радіус циліндричної частини пневматичної камери змішувача	R	240 мм
2	Висота циліндричної частини пневматичної камери змішувача визначена від початку координат допоміжної циліндричної системи координат	H	980 мм
3	Висота всієї пневматичної камери змішувача визначена від початку координат допоміжної циліндричної системи координат до нижньої частини вихідного патрубку	H _{ЗМ}	1180 мм
4	Кількість отворів у конічному гвинтовому каналі	n	32
5	Внутрішній діаметр конічного гвинтового каналу	d	20 мм
6	Середній розмір конічного гвинтового каналу визначений у радіальному напрямку	r _С	120 мм
7	Діаметр патрубка на виході із камери змішувача	D	50 мм

Умови зони I

$$0 \leq r < r_C$$

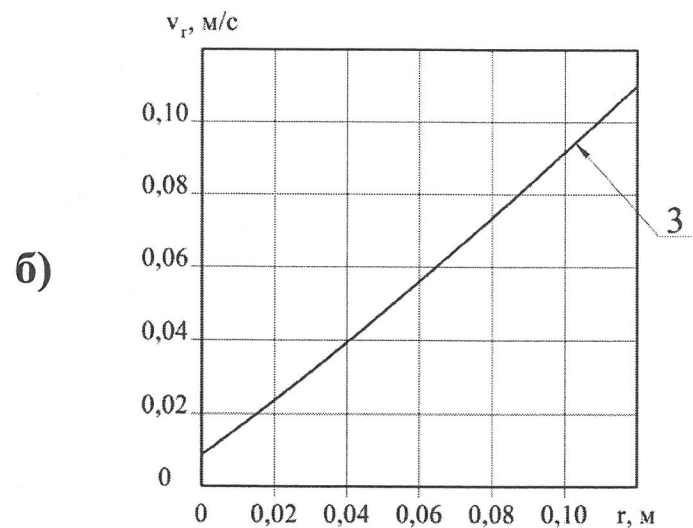
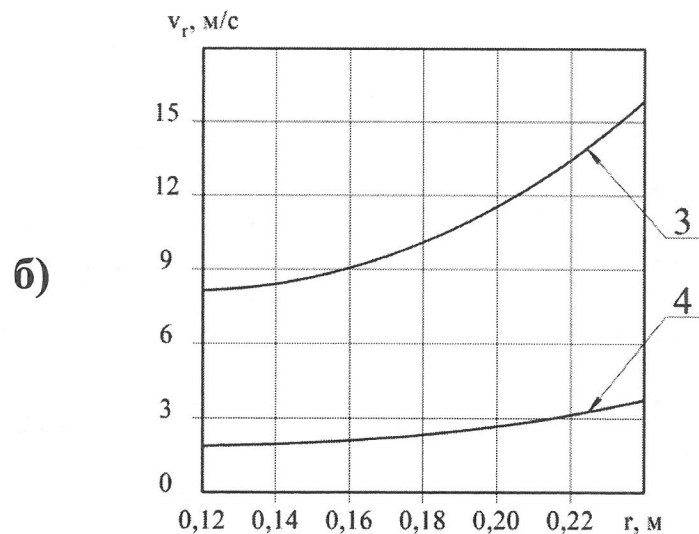
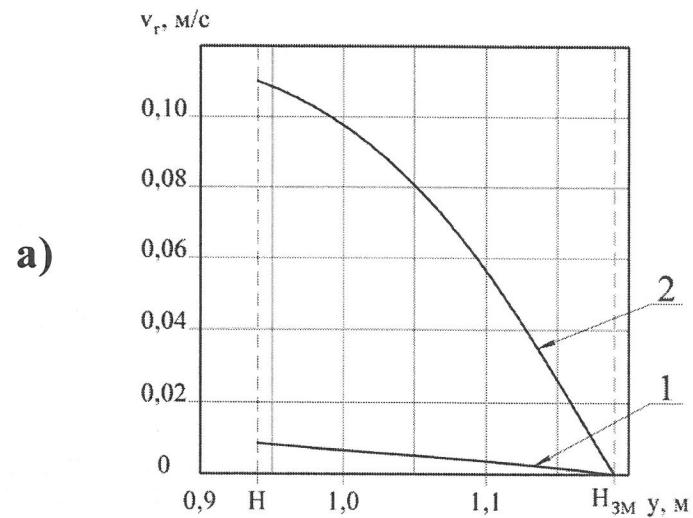
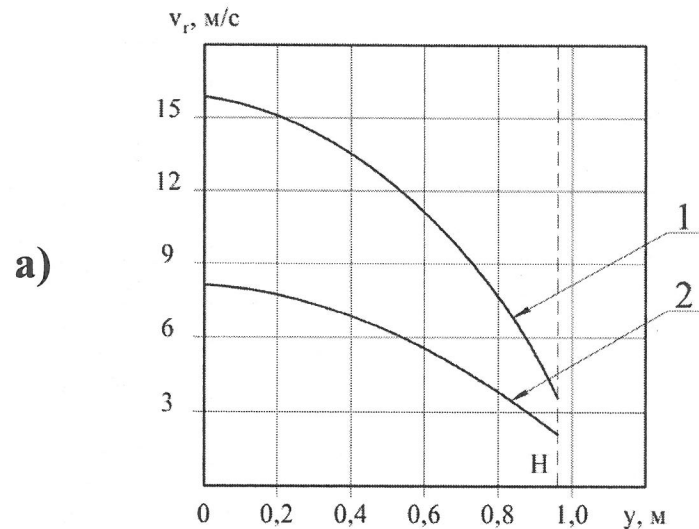
$$0 \leq y \leq H$$

Умови зони II

$$r \geq r_C$$

$$H < y \leq H_{ЗМ}$$

Аналіз результатів математичної моделі руху потоку у камері змішувача



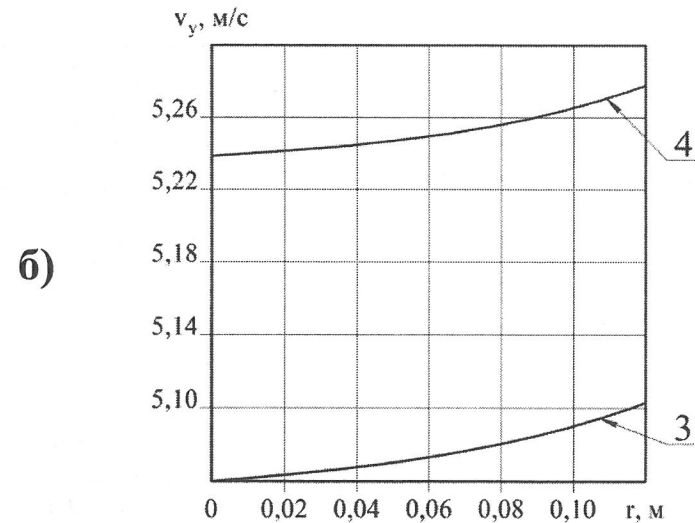
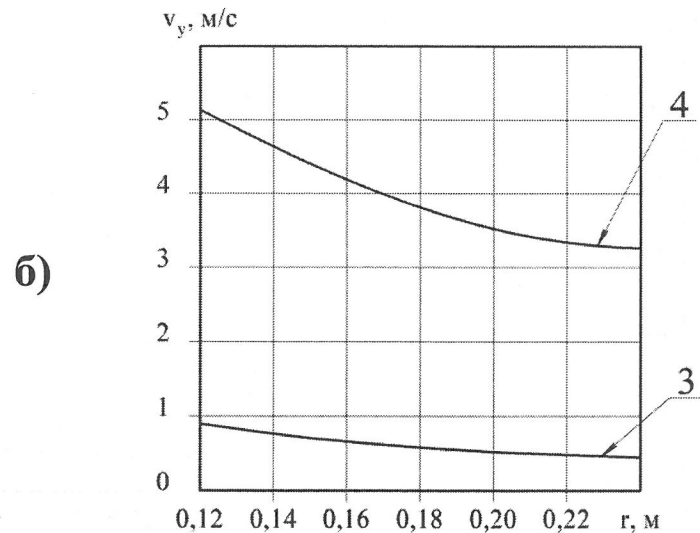
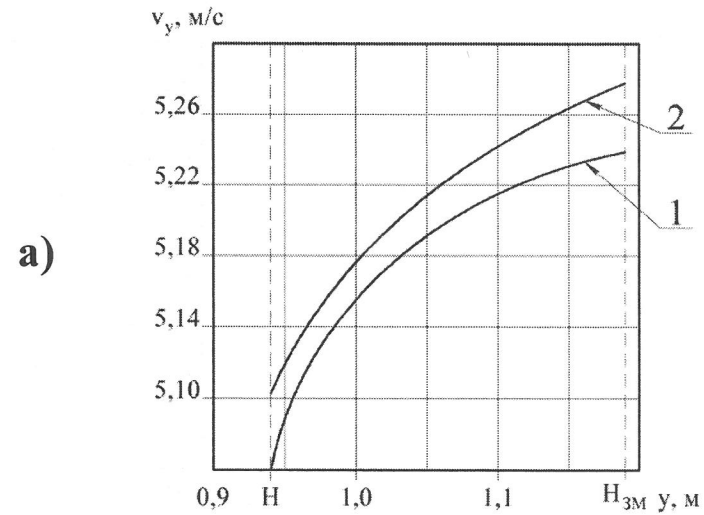
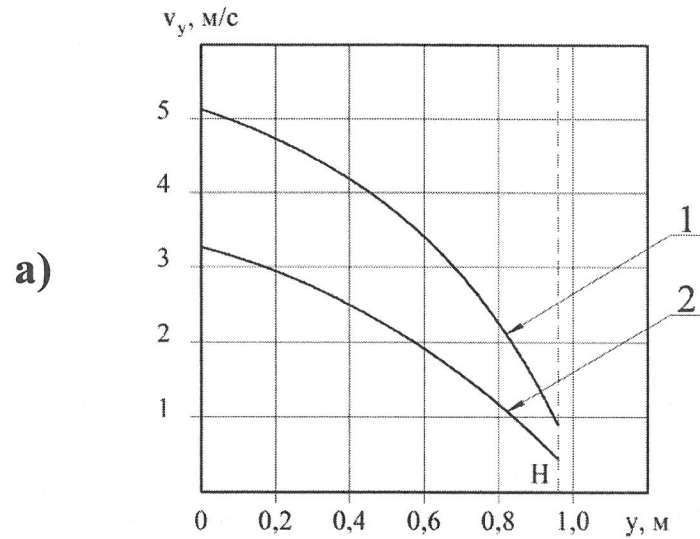
Графіки зміни складової v_r швидкості потоку від циліндричних координат y та r в зоні I

а) – залежно від координати y ; б) – залежно від координати r ;
1 – при $r = 0,12$ м; 2 – при $r = 0,24$ м; 3 – при $y = 0$ м;
4 – при $y = 0,98$ м

Графіки зміни складової v_r швидкості потоку від циліндричних координат y та r в зоні II

а) – залежно від координати y ; б) – залежно від координати r ;
1 – при $r = 0$ м; 2 – при $r = 0,12$ м; 3 – при $y = 0,98$ м

Аналіз результатів математичної моделі руху потоку у камері змішувача



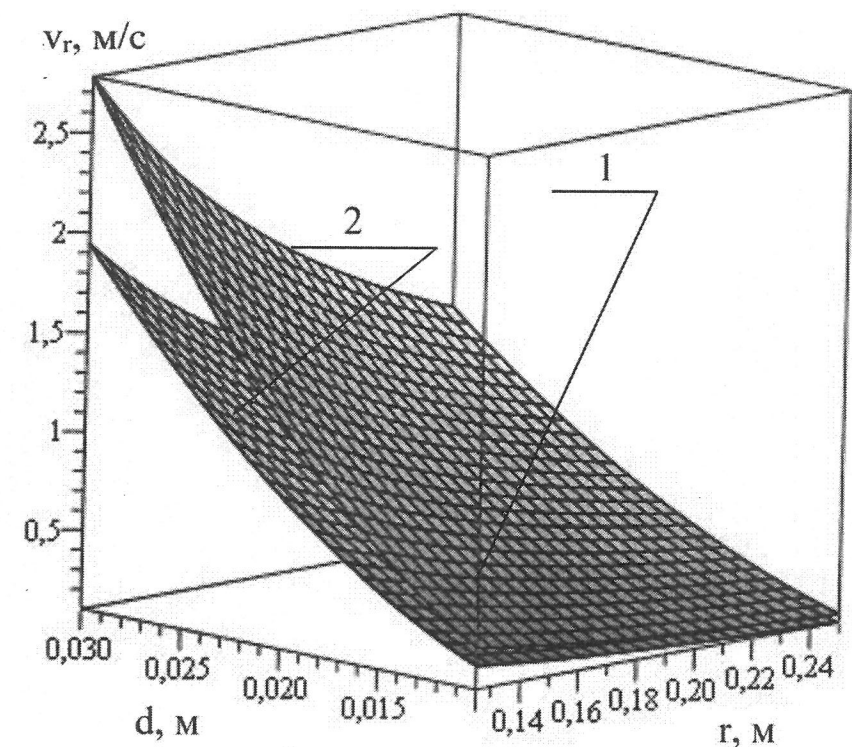
Графіки зміни складової v_y швидкості потоку від циліндричних координат y та r в зоні I

а) – залежно від координати y ; б) – залежно від координати r ;
1 – при $r = 0,12$ м; 2 – при $r = 0,24$ м; 3 – при $y = 0$ м;
4 – при $y = 0,98$ м

Графіки зміни складової v_y швидкості потоку від циліндричних координат y та r в зоні II

а) – залежно від координати y ; б) – залежно від координати r ;
1 – при $r = 0$ м; 2 – при $r = 0,12$ м; 3 – при $y = 0,98$ м;
4 – при $y = 1,18$ м

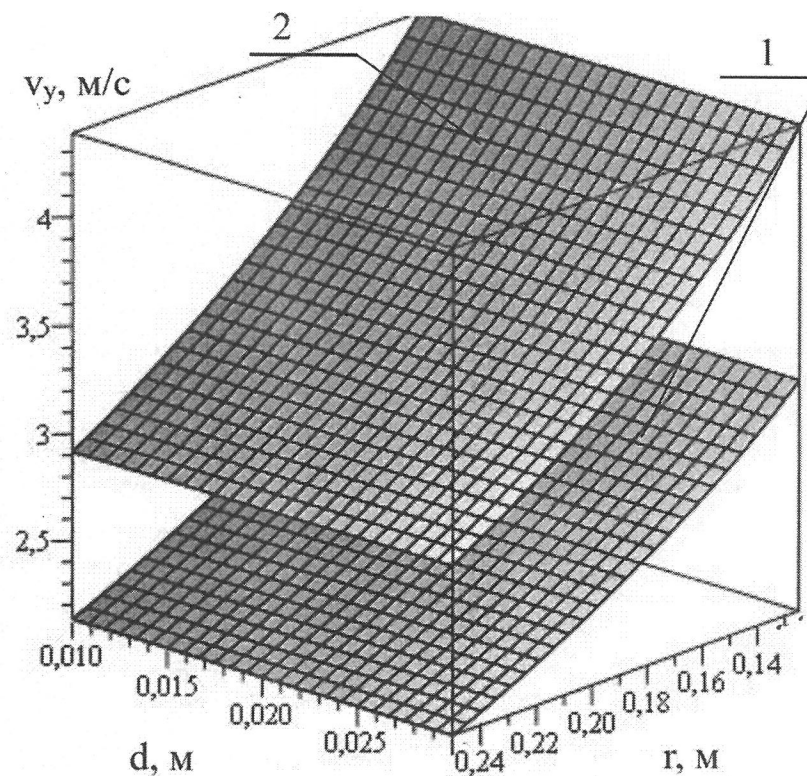
Аналіз результатів математичної моделі руху потоку у камері змішувача



Графіки зміни складової v_r швидкості потоку від циліндричної координати r в зоні I та внутрішнього діаметру конічного гвинтового каналу d

1 – при висоті з координатою 0,5 Н;

2 – при висоті з координатою 0,75 Н

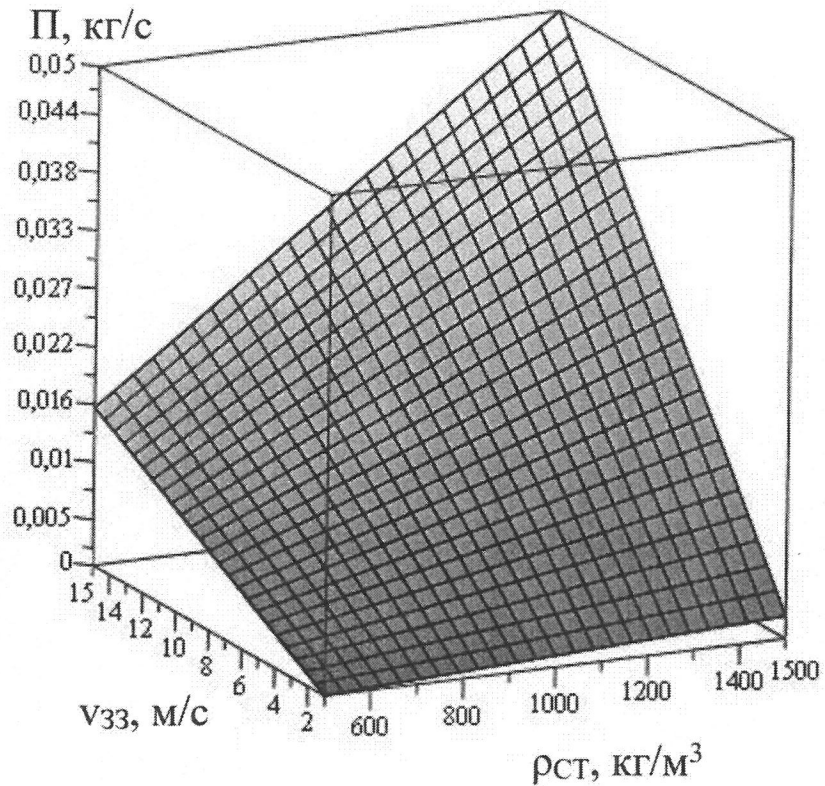


Графіки зміни складової v_y швидкості потоку від циліндричної координати r в зоні I та внутрішнього діаметру конічного гвинтового каналу d

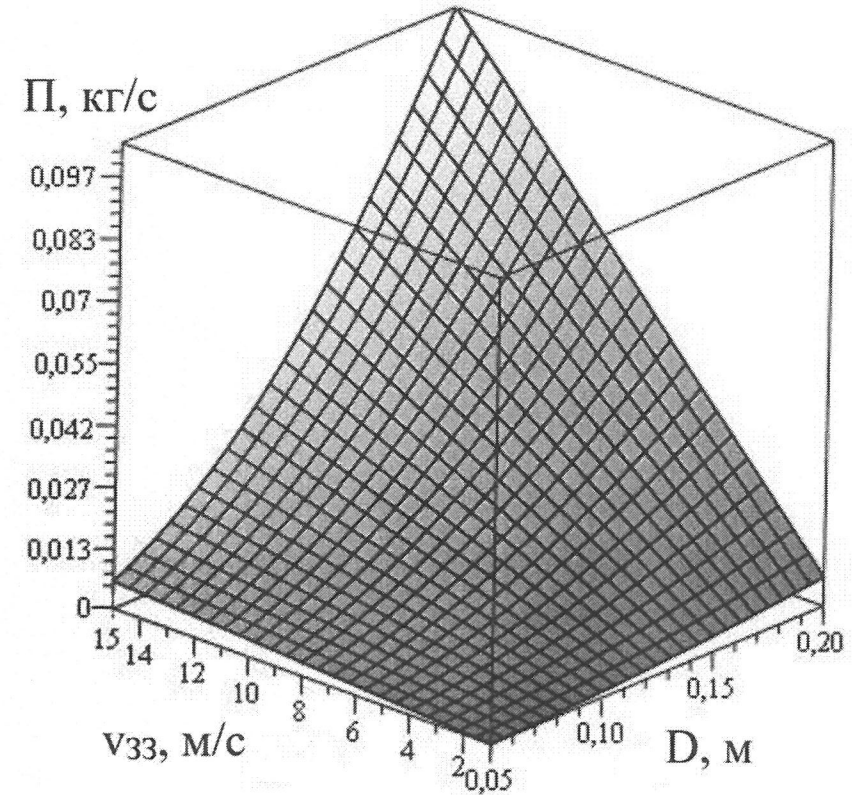
1 – при висоті з координатою 0,5 Н;

2 – при висоті з координатою 0,75 Н

Аналіз конструктивних параметрів змішувача



Графік зміни продуктивності змішувача від швидкості руху повітря назовні із патрубку на виході із його камери $v_{ЗЗ}$ та середньої густини складових суміші $\rho_{СТ}$ при діаметрі вихідного патрубку $D = 100$ мм



Графік зміни продуктивності змішувача від швидкості руху повітря назовні із патрубку на виході із його камери $v_{ЗЗ}$ та діаметра вихідного патрубку D при середній густині складових суміші $\rho_{СТ} = 800$ кг/м³

Методика підбору раціональних параметрів пневматичного змішувача для теплоізоляційних матеріалів

Діаметр патрубку на виході із камери змішувача D

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot \Pi}{\rho_{\text{СТ}} \cdot V_{33} \cdot \pi}}$$

Діаметр вхідного отвору конічного гвинтового каналу d

$$d = \frac{Q_M}{\rho_{\Pi} \cdot V_{33}}$$

Діаметр одного окремо взятого отвору на конічному гвинтовому каналі d_3

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_M}{\pi \cdot V_{33}}}$$

Масова витрата стисненого повітря Q_M

$$Q_M = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot d^5 \cdot \left[\frac{p_{B0}^2 - p_{B1}^2}{R_{\Gamma} \cdot T} + \frac{(v_{330}^2 - v_{331}^2) \cdot \rho^2}{2} \right]}{4 \cdot K_{\Gamma} \cdot H}}$$

Потужність компресора, яка буде потрібна для нагнітання стисненого повітря до пневматичного змішувача N_K

$$N_K = 1,69 \cdot Q_M \cdot C \cdot R \cdot T_0 \cdot \ln \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

Кількість отворів для виходу повітря у конічному гвинтовому каналі n

$$n = \frac{d^2 \cdot v_B}{d_3^2 \cdot v_3}$$

Висновки

У роботі проаналізовано стан та рівень розвитку обладнання для реалізації технологій виготовлення сухих будівельних сумішей загалом та їх теплоізоляційних видів зокрема. Виявлено проблему, що переважна більшість змішувачів не можуть якісно працювати, коли потрібно змішувати сухі компоненти суміші із густиною, котра суттєво відрізняється, що є характерним для теплоізоляційних сумішей. Встановлено, що найкращі результати з приготування сухих сумішей продемонстрували пневматичні змішувачі, але для вирішення проблем із роботою з теплоізоляційними сумішами, вони повинні мати конструктивні доопрацювання, одним із найефективнішим з яких є встановлення на вході до змішувача конічного гвинтового каналу.

Для пневматичного змішувача з конічним гвинтовим каналом побудовано математичну модель робочих процесів, яка дозволяє визначати закономірності руху потоків повітряно-пилового середовища у камері змішувача. Знайдено рівняння для опису складових вектору швидкості потоку, тангенційної складової, що відображена показником v_t , та поздовжньої вертикальної, що відображена через v_u . Визначено залежності для розрахунку витрат повітря за масою та об'ємом, продуктивності змішувача.

Отримані результати при застосуванні математичної моделі підтвердили, що для змішувача підтримується наявність значної величини тангенційної складової швидкості потоку v_t . Це сприяє створенню хаотично-вихрових потоків та забезпечує інтенсивне перемішування матеріалів сухої будівельної суміші, в тому числі й теплоізоляційної, котра вимагає високої інтенсивності впливу через різницю у густині її окремих складових компонентів.

Висновки

Розроблено детальні аналітичні залежності, які дозволяють визначати основні конструктивно-технологічні параметри функціонування пневматичного змішувача з конічним гвинтовим каналом. У цих залежностях враховано технічні особливості самого змішувача й фізико-механічні властивості складових компонентів сумішей, які будуть задіяні у змішувальному процесі. Такий підхід забезпечує ефективну оптимізацію роботи змішувача та його адаптацію до заданих специфічних умов експлуатації.

Також у роботі розроблено методику підбору конструктивно-технологічних параметрів для забезпечення максимальної ефективності експлуатації пневматичного змішувача у заданих умовах. Це дозволить розширити можливі сфери використання пневматичних змішувачів.