

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Удосконалення конструкції сушарки для казеїну марки ВС-200

Виконав: здобувач вищої освіти	6 курсу,	групи МОм-61
спеціальності	133 «Галузеве машинобудування»	
	(шифр і назва спеціальності)	
	(підпис)	Савич І.А. (прізвище та ініціали)
Керівник	(підпис)	Кравець О.І.. (прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	(підпис)	Ворощук В.Я. (прізвище та ініціали)
В.о. зав. кафедри	(підпис)	Ворощук В.Я. (прізвище та ініціали)
Рецензент	(підпис)	Кухтин М.Д. (прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій

(повна назва факультету)

Кафедра обладнання харчових технологій

(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри ОХ

Ворошук В.Я.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

«__» _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня магістр

(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

(шифр і назва спеціальності)

здобувачу вищої освіти

Савичу Івану Анатолійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення конструкції сушарки для казеїну марки ВС-200

Керівник роботи Кравець Олег Ігорович, к.т.н. доцент

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

Затверджені наказом ректора від 12.12.2025р № 4/7-998

2. Термін подання завершеної роботи 26 грудня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Технічний паспорт та інструкції з експлуатації, монтажу та технічного обслуговування і ремонту сушарки для казеїну марки ВС-200

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Огляд обладнання для сушіння казеїну. Аналіз об'єкту дослідження. 2. Модернізація сушарки ВС-200. 3. Конструювання сушарки марки ВС-200. Розробка конструкції сушарки ВС-200. 4. Дослідження гідродинамічних властивостей псевдокипячого шару казеїну у процесі сушіння. Методики досліджень. Методика дослідження гідродинаміки псевдокипячого шару казеїну. Результати досліджень

4.2. Методика дослідження гранулометричного складу зерен казеїну

5.1 Розроблення заходів з охорони праці і техніки безпеки. 5.2. Безпека у надзвичайних ситуаціях. Висновки

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

Сушарка для казеїну марки ВС-200. Вигляд загальний, 1 лист ФА1

Вузол завантаження. Складальне креслення, 1 лист ФА1

Решітка. Складальне креслення, 1 лист ФА1

Математична модель, 1 лист ФА1

Установка для дослідження характеристик псевдозрідженого шару, 1 лист ФА1

Крива псевдозрідження, 1 лист ФА1

6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Кравець О.І. – к.т.н., доцент Стручок В.С. – ст. викладач		
Нормоконтроль	Ворощук В.Я. – к.т.н., доцент		

7. Дата видачі завдання _____ 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітки
1.	<i>Вступ</i>	до 01.10.2025р.	
2.	<i>Розділ 1. Огляд обладнання для сушіння казеїну. Аналіз об'єкту дослідження. 2 Модернізація сушарки ВС-200. 3. Конструювання сушарки марки ВС-200. 4. Дослідження гідродинамічних властивостей псевдокипячого шару казеїну у процесі сушіння.</i>	до 15.10.2025р.	
3.	<i>Розділ 2. Модернізація сушарки ВС-200</i>	до 25.10.2025р.	
4.	<i>Розділ 3. Конструювання сушарки марки ВС-200</i>	до 01.11.2025р.	
5.	<i>Розділ 4. Дослідження гідродинамічних властивостей псевдокипячого шару казеїну у процесі сушіння</i>	до 05.11.2025р.	
6.	<i>Розділ 5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.</i>	до 10.11.2025р.	
7.	<i>Загальні висновки</i>	До 13.11.2025р.	
	<i>Графічна частина</i>		
8.	<i>1. Сушарка для казеїну марки ВС-200. Вигляд загальний, 1 лист ФА1</i>	до 15.11.2025р.	
9.	<i>2. Вузол завантаження. Складальне креслення, 1 лист ФА1</i>	до 20.11.2025р.	
10.	<i>3. Решітка. Складальне креслення, 1 лист ФА1</i>	до 20.11.2025р.	
11.	<i>4. Математична модель, 1 лист ФА1</i>	до 25.11.2025р.	
12.	<i>5. Установка для дослідження характеристик псевдозріженого шару, 1 лист ФА1</i>	до 25.11.2025р.	
13.	<i>6. Крива псевдозрідження, 1 лист ФА1</i>	до 01.12.2025р.	

Здобувач

(підпис)

Савич І.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Кравець О.І.
(прізвище та ініціали)

Анотація

Савич Іван Анатолійович. Удосконалення конструкції сушарки для казеїну марки ВС-200

Робота присвячена підвищенню ефективності роботи обладнання для сушіння казеїну.

Розроблено заходи із модернізації сушарки ВС-200, що полягають у використанні частини відпрацьованого сушильного агенту для попереднього підігрівання вологого казеїну перед його надходженням у сушильну камеру.

Досліджено гідродинамічні властивості псевдокипачого шару казеїну у процесі його сушіння. Отримали математичні вирази для визначення зміни гранулометричних властивостей казеїну у процесі його сушіння.

Ключові слова: казеїн, вологість, сушіння, гранулометричний склад.

Abstract

Savych I. A. Improvement of the Design of the VS-200 Casein Dryer.

The work is devoted to increasing the efficiency of equipment used for casein drying. Measures for модернізація the VS-200 dryer have been developed, which involve using a portion of the spent drying agent to preheat wet casein before it enters the drying chamber.

The hydrodynamic properties of the fluidized bed of casein during the drying process were investigated. Mathematical expressions were obtained to determine changes in the granulometric properties of casein during drying.

Keywords: casein, moisture content, drying, particle size distribution.

Зміст

Вступ.....	8
1. Огляд обладнання для сушіння казеїну. Аналіз об'єкту дослідження	10
1.1. Технологічний процес виробництва технічного казеїну	10
1.2. Аналіз обладнання для сушіння казеїну	12
1.3. Особливості процесу сушіння у псевдозрідженому шарі.....	18
1.4. Властивості казеїну як об'єкту сушіння	20
1.5. Будова та принцип роботи сушарки ВС-200	21
1.6. Мета і основні задачі кваліфікаційної роботи	24
2. Модернізація сушарки ВС-200	26
2.1 Задачі модернізації сушарки	26
2.2. Модернізація сушарки	28
2.3. Конструкція модернізованого завантажувального пристрою сушарки	31
2.4. Висновки до розділи	33
3. Конструювання сушарки марки ВС-200	35
3.1. Розробка конструкції сушарки ВС-200.....	35
3.2. Конструювання та розрахунок окремих вузлів сушарки.....	36
3.2.1. Розрахунок завантажувального валу сушарки.....	36
3.2.2. Розрахунок муфти	41
3.2.3. Підбір підшипників.....	43
4. Дослідження гідродинамічних властивостей псевдокип'ячого шару казеїну у процесі сушіння	45
4.1. Методики досліджень	45
4.1.1 Методика дослідження гідродинаміки псевдокип'ячого шару казеїну	45
4.1.2. Методика дослідження гранулометричного складу зерен казеїну	48
4.2. Результати дослідження гідродинамічних властивостей псевдокип'ячого шару казеїну у процесі сушіння	49
4.3 Висновки до розділу	58
5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	60
5.1. Охорона праці.....	60

5.1.1. Основні причини травматизму в харчовій галузі та його динаміка	60
5.1.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів підприємств харчової промисловості.....	62
5.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях	65
5.2.1. Організація та проведення дослідження стійкості роботи підприємств харчової та переробної промисловості в умовах надзвичайних ситуацій	65
5.2.2. Радіоактивне забруднення місцевості та його вплив на виробничу діяльність підприємств харчової та переробної промисловості	69
Загальні висновки.....	72
Перелік посилань.....	73
Додатки.....	76
Специфікації	81

Вступ

Актуальність теми

Необхідною умовою розвитку молочної промисловості є вдосконалення технологічного обладнання, спрямованого як на підвищення ефективності переробки сировини, так і на зменшення експлуатаційних витрат. Аналіз технологічного процесу виробництва технічного казеїну дозволяє зробити висновок, що найбільш енерговитратним етапом є процес сушіння.

Мета і завдання досліджень.

Метою кваліфікаційної роботи є оптимізація енергоспоживання при виробництві казеїну.

Основні задачі:

- аналіз технологічного процесу виробництва казеїну;
- вивчення та оцінка обладнання, призначеного для його сушіння;
- розробка пропозицій щодо вдосконалення конструкції сушарки;
- дослідження змін гранулометричного складу казеїну-сирцю під час сушіння;
- виконання розрахунків установки для сушіння казеїну;
- розробка заходів з охорони навколишнього середовища;

Об'єкт дослідження – процес сушіння казеїну в сушарці із псевдокипачим шаром

Предмет дослідження – дисперсний склад та вологість казеїну

Наукова новизна отриманих результатів:

Отримали математичні вирази для визначення зміни дисперсного складу та вологості казеїну у процесі його сушіння

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблено заходи із модернізації сушарки ВС-200, що полягають у використанні частини відпрацьованого сушильного агенту для попереднього підігрівання вологого казеїну перед його надходженням у сушильну камеру.

Очікуваний ефект від модернізації: зниження енергозатрат на процес сушіння; підвищення коефіцієнту корисного використання теплоти та покращення загальних техніко-економічних показників виробництва казеїну.

Апробація результатів досліджень. Результати досліджень роботи апробувалися на наступних конференціях:

VIII Міжнародна науково-технічна конференція „Стан і перспективи харчової науки та промисловості “присвяченої 30-річчю заснування кафедри харчової біотехнології і хімії ТНТУ імені Івана Пулюя

XIV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-12 грудня 2025 року

1. Огляд обладнання для сушіння казеїну. Аналіз об'єкту дослідження

1.1. Технологічний процес виробництва технічного казеїну

Технологічний процес виробництва казеїну включає такі основні стадії: отримання та підготовка знежиреного молока, приготування коагулянту, осадження казеїну, формування й обробка зерна, його промивання, видалення вологи, подрібнення та подальше сушіння.

Отримання і підготовка знежиреного молока.

Для виготовлення казеїну застосовують коров'яче молоко, що закуповується відповідно до вимог ДСТУ 13264-70. Для проведення процесів знежирення та очищення молоко піддають сепаруванню і механічному очищенню. Отримане знежирене молоко пастеризують при температурі 72...74 °С із витримкою 15...20 с.

Приготування коагулянту.

У ролі коагулянтів використовують соляну кислоту, кислу сироватку або бактеріальну закваску. Розчин соляної кислоти готують шляхом розведення концентрованої кислоти у десятикратному об'ємі води. Підготовлений робочий розчин соляної кислоти додають до знежиреного молока в кількості 4% від його об'єму. Для виробництва застосовують молочну сироватку, що відповідає вимогам ДСТУ 4992-75. Сироватку підігрівають до температури 39 ± 1 °С і заквашують чистими культурами молочнокислих бактерій у кількості 3...5%. Сквашування здійснюють до досягнення кислотності не менше ніж 200 °Т.

Тривалість процесу сквашування сироватки при температурі 39 ± 1 °С становить 36...48 годин. Бактеріальну закваску готують відповідно до технологічної інструкції щодо виробництва заквасок чистих культур молочнокислих бактерій для кисломолочної продукції. До підготовленого молока вносять 1...5% бактеріальної закваски, залежно від необхідної тривалості сквашування. Після внесення закваски молоко ретельно перемішують.

Осадження казеїну, формування та обробка зерна. Під час осадження казеїну соляною кислотою у знежирене молоко, нагріте до температури 36 ± 1 °С,

вносять робочий кислотний розчин. Додавання кислоти здійснюють поступово до досягнення активної кислотності сироватки на рівні 4,4...4,2.

Отриманий осад казеїну перемішують у сироватці протягом 3...5 хвилин з метою формування зерна однорідної структури. Осадження казеїну за допомогою кислої сироватки проводять при температурі 38 ± 1 °С. Такої ж температури повинні бути знежирене молоко та сквашена сироватка, що додається до нього.

Сироватку безперервно перемішують із знежиреним молоком. Після досягнення кислотності сироватки $52,5 \pm 2,5$ °Т казеїнове зерно перемішують 10...15 хвилин для його ущільнення та доведення розміру до 3...5 мм. Потім додають додаткову кількість кислої сироватки з метою підвищення кислотності до $72,5 \pm 2,5$ °Т і продовжують перемішування зерна протягом 25...30 хвилин для його обсушки. Швидкість обертання мішалок повинна становити приблизно 14...16 об/хв.

Занадто повільне перемішування спричиняє утворення грудкуватої маси, тоді як надмірно швидке — появу білкового пилу.

Під час осадження казеїну молочною кислотою, що утворюється внаслідок дії бактеріальної закваски, молоко спершу нагрівають до 30...32 °С у зимовий період або до 28...30 °С у літній період, після чого вносять бактеріальну закваску. Закваску додають у кількості 1...5%, що визначається необхідною тривалістю сквашування (8...12 год).

Процес сквашування ведуть до досягнення кислотності сироватки 85 ± 5 °Т.

Сформований згусток розрізають на кубики з ребром приблизно 2 см.

Теплова обробка зерна необхідна для його обсушки (видалення вологи) та зменшення мікробного обсіменіння. Сутність теплової обробки полягає у поступовому підвищенні температури сироватки й зерна до 60 °С. Тривалість витримки при 60 °С до повної готовності зерна становить близько 10 хвилин.

У ході теплової обробки зерно постійно перемішують. Після завершення оброблення сироватку зливають і переходять до промивання казеїну. Під час коагуляції казеїну кислою сироваткою тепла обробка зерна при температурі 60

°C триває 15 хвилин. Оцінювання якості зерна здійснюють візуально: при достатній обсушці зерно, стиснуте в долоні, легко розпадається.

Промивання проводять тричі для видалення лактози, мінеральних солей, залишків кислоти та жиру.

За коагуляції казеїну кислою сироваткою температура води при першому промиванні становить 62 ± 1 °C, при другому — 22 ± 2 °C, при третьому — 20 °C та нижче.

Під час коагуляції казеїну соляною або молочною кислотою температура води для першого промивання дорівнює $37,5 \pm 2,5$ °C, другого — $23,5 \pm 1,5$ °C, третього — 20 °C і нижче.

Тривалість витримки казеїну на кожному етапі промивання становить 15...20 хвилин. Витрати промивної води складають 25...30% від маси знежиреного молока, переробленого на казеїн. Казеїнове зерно з початковою масовою часткою вологи 80% зневоднюють до рівня $61 \pm 1\%$ шляхом пресування або центрифугування.

Пресування казеїну необхідно здійснювати в приміщенні, де температура повітря підтримується на рівні (16 ± 2) °C. Дроблення сирцю казеїну виконують з метою отримання однорідного зерна розміром 4...7 мм у поперечнику. Температура повітря на початку процесу сушіння казеїну становить 40...45 °C.

1.2. Аналіз обладнання для сушіння казеїну

Для сушіння казеїну переважно застосовують спеціалізовані тунельні сушарки та інші сушильні установки. У таких апаратах тепле повітря з температурою 40 °C на початковому етапі та 55–60 °C на наступному проходить крізь тонкий шар продукту, завдяки чому відбувається поглинання водяної пари й висушування казеїну. Для підвищення інтенсивності процесу сушіння казеїнову масу переміщують кожні 45–60 хвилин, а рами з продуктом переставляють між різними секціями, тобто свіжий казеїн переміщують до нижніх рядів із нижчою температурою, тоді як підсушений — у верхні ряди, де температура повітря є вищою. Загальна тривалість сушіння становить близько

3,5 год. Крім того, для висушування казеїну можуть використовуватися скребкові або вихрові сушарки.

Для сушіння казеїну найбільш ефективними є стрічкова сушарка безперервної дії та сушарка періодичної дії, призначена для обробки продукту в киплячому шарі.

Стрічкова сушильна установка являє собою камеру, у якій розміщені стрічкові конвеєри 1 (рис. 1.1), що працюють безперервно та виготовлені з металевої сітки.

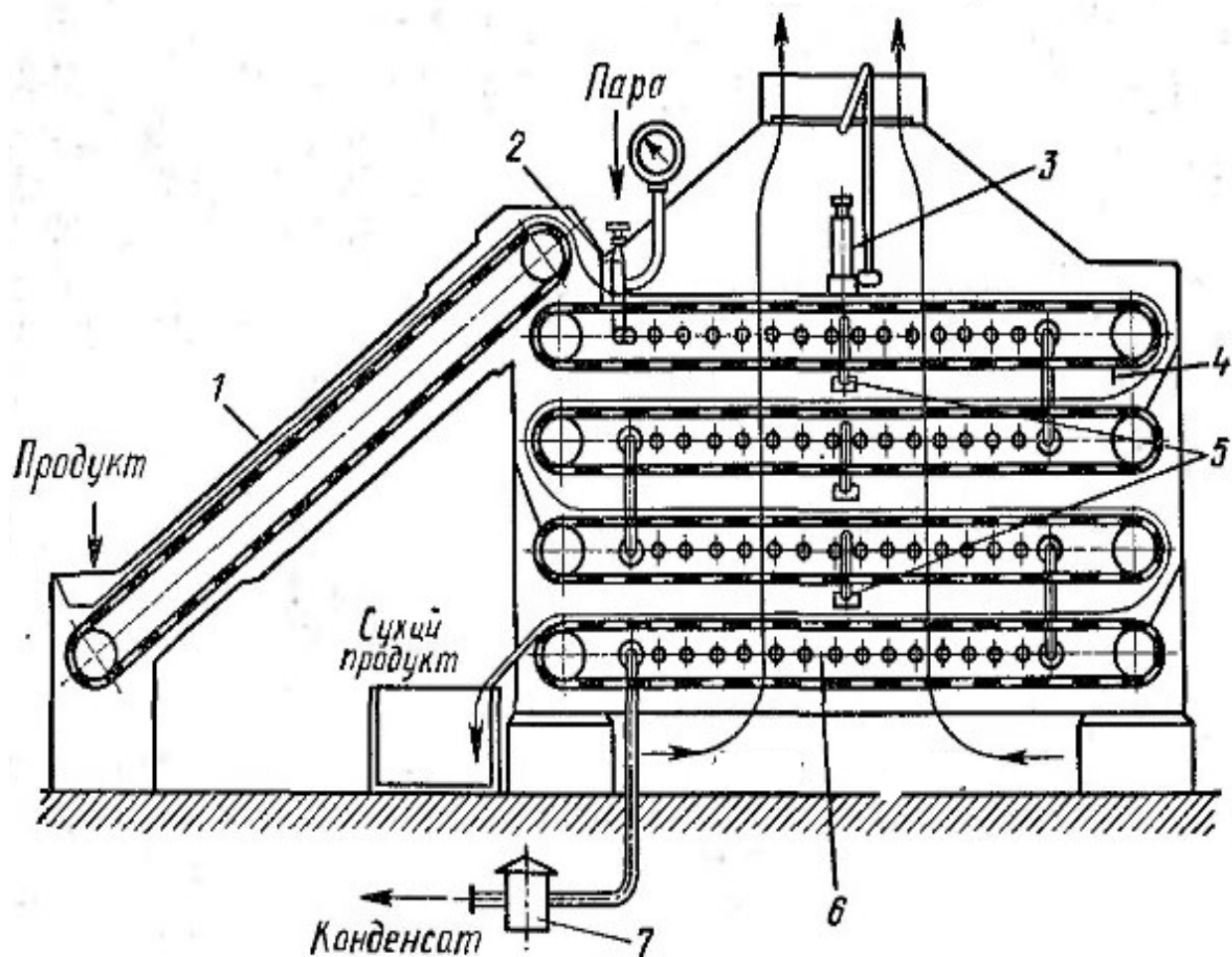


Рисунок 1.1. Схема парової стрічкової сушарки

1 – транспортер; 2 – шибєр; 3 – психрометр; 4 – скребки очисні; 5 – термометри; 6 – секція калорифера; 7 – патрубок для конденсату.

Гаряче повітря з температурою $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ проходить крізь шар казеїну, забезпечуючи його висушування під час постійного переміщення продукту.

Температура повітря, що виходить із камери після відбору вологи, становить приблизно 55 °С. Одночасно до камери подається гаряче повітря з температурою 100–110 °С у такій швидкості та кількості, які дозволяють підтримувати стабільний режим «кипіння» гранульованого казеїну

Казеїн подається до сушильної установки за допомогою транспортера 1, розміщеного під нахилом. За допомогою шибера 2 шар продукту вирівнюють і рівномірно розподіляють тонким шаром по сітчастих стрічках. Скребок 4 використовується для очищення стрічки від залишків продукту.

У середині камери сушарки встановлено калорифер 6, який забезпечує нагрівання повітря, що виконує функцію сушильного агента. У процесі переміщення продукту з однієї стрічки на іншу його висушування відбувається завдяки обдуву гарячим повітрям. Верхні стрічки рухаються з більшою швидкістю, ніж нижні, причому їхня швидкість регулюється за допомогою варіатора. Величина швидкості стрічок визначає тривалість перебування казеїну в сушарці, яка може становити від 1,5 до 5,5 годин.

Скребкову сушарку показано на рисунку 1.2. Зовнішній каркас установки закритий металевими щитами. На її бічних стінках розміщено по три оглядові вікна. Полки 1 сушарки являють собою знімні рами, на які натягнута металева сітка. Перемішування казеїну та його просування вздовж полиць забезпечується скребками 2, що закріплені у рамах 3. Рух рами зі скребками здійснюється циклічно. Верхня рама переміщується горизонтально зліва направо, і в цей час скребки перемішують казеїнову масу та пересувають її вперед.

Після завершення ходу рама підіймається вгору та повертається у вихідне положення, не торкаючись продукту. Коли вона досягає початку робочої ділянки, цикл повторюється. Нижня рама рухається у напрямку, протилежному руху верхньої. Подача електроенергії до рам здійснюється від електродвигуна через редуктор і ланцюгову або ремінну передачу.

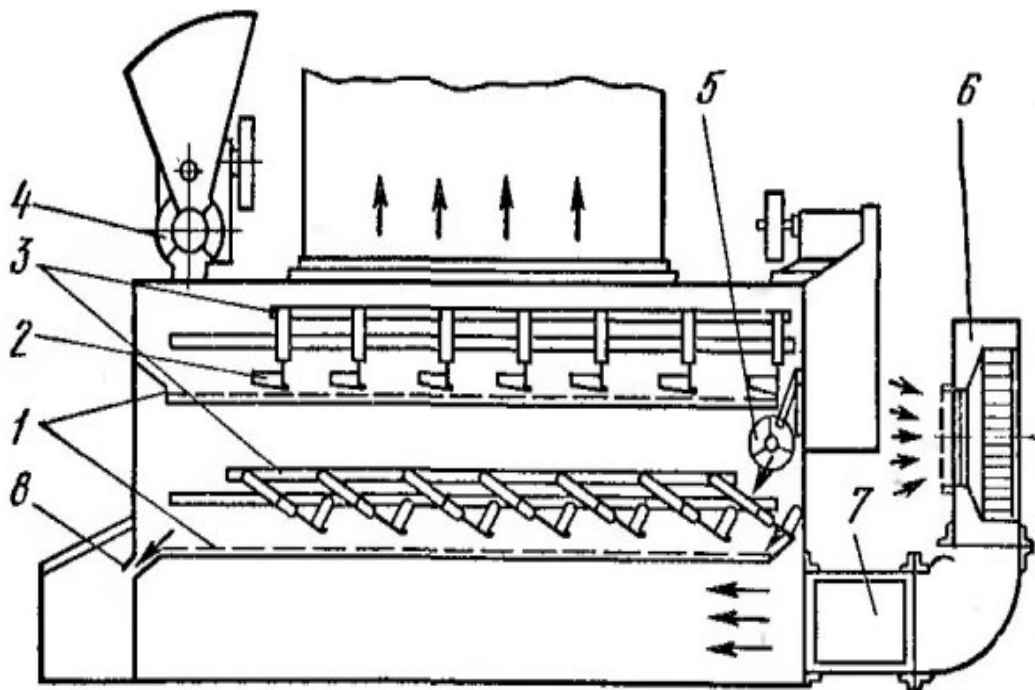


Рисунок 1.2. Схема скребкової сушарки

1 -полки; 2 -скребки; 3 -рами; 4 -подрібнювач;
5 -додатковий подрібнюючий пристрій; 6 –відцентровий вентилятор;
7 -калорифер; 8 -бункер шнеку.

Товщина шару казеїну, що розподіляється на полиці, дорівнює 3 мм. Верхня полиця не доходить до правого торця установки, і цей зазор створює умови для переходу продукту з верхньої полиці на нижню. У зоні переходу розміщено подрібнювальний пристрій 5. Після проходження по всій довжині нижньої полиці казеїн надходить у бункер 8, з якого шнековим транспортером подається на фасування.

Калорифер 7 забезпечує нагрівання повітря до 90–95 °С, за допомогою якого відбувається сушіння казеїну. Відпрацьоване повітря відводиться через центральний отвір сушарки. Для автоматизованого керування процесом сушіння поруч із калорифером встановлено електроконтактний термометр, який через електромагнітний клапан регулює подачу пари в калорифер.

На рисунку 1.3 наведено схему безперервної вихрової сушарки для казеїну з псевдозрідженим шаром. Казеїн із завантажувального пристрою 3 надходить до живильника-гранулятора 4. На виході з нього утворюються гранули розміром

2–5 мм, які відразу спрямовуються в сушарку 5. До сушарки подається гаряче повітря з температурою 120 °С. На його шляху встановлено решітки, крізь щілини яких повітря створює вихровий рух частинок казеїну, надаючи їм псевдозрідженого стану. Висушений казеїн надходить до приймача, а звідти за допомогою пневмотранспорту 9 переміщується до бункера 8.

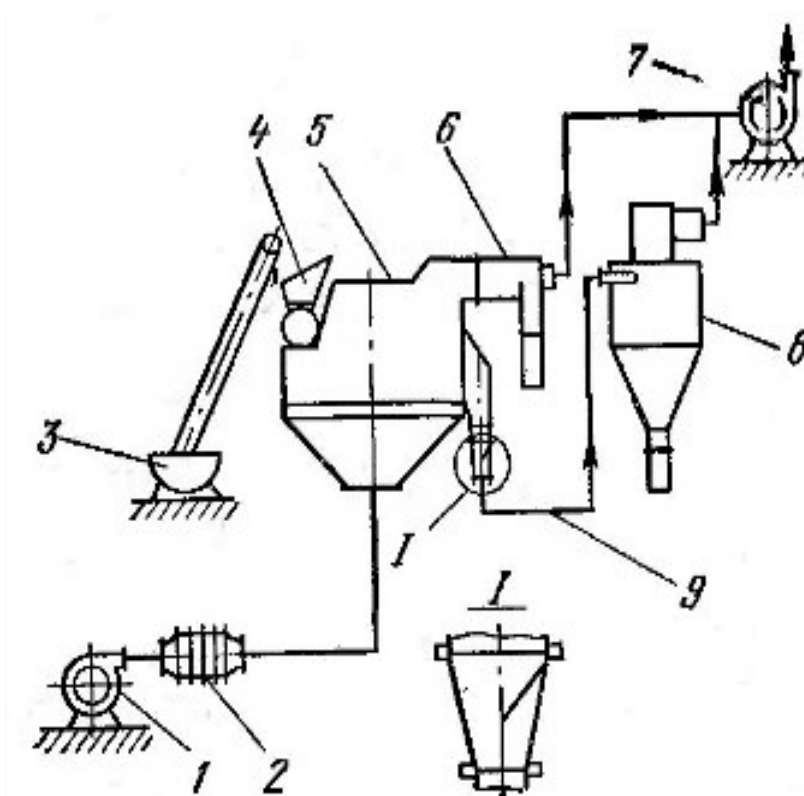


Рисунок 1.3. Схема вихрової сушарки із псевдокипачим шаром:
1 і 7 - вентилятори; 2 - калорифер; 3 - завантажувальний пристрій;
4 - живильник; 5 - сушарка; 6 - циклон; 8 - бункер;
9 - пневмотранспортер

Вентилятор 7 забезпечує подачу повітря для роботи пневмотранспорту та одночасно здійснює відсмоктування повітря з камери безперервної сушарки. Перед цим повітря проходить через циклон 6, у якому відбувається осадження частинок казеїну. Повітря, що подається на нагрівання до калорифера 2, надходить від вентилятора 1.

Вологість казеїну на вході до сушарки має становити 45–65%, а температура — близько 20 °С. Температура готового продукту після сушіння

перебуває в межах 20–50 °С. Продуктивність обладнання за сухим казеїном становить 150–160 кг/год.

Сушильна камера сушарки із псевдо-зрідженим шаром (рис. 1.4) являє собою прямокутний короб 2. Через люк 1 в нижню частину короба встановлено газорозподільне пристрій. Нагріте повітря надходить через горловину 6 і відводиться через патрубок 3, огинаючи відбійник 4 (первинний сепаратор), який направляє потік газу для підсушування продукту. Переливний поріг 5 забезпечує заданий рівень киплячого шару.

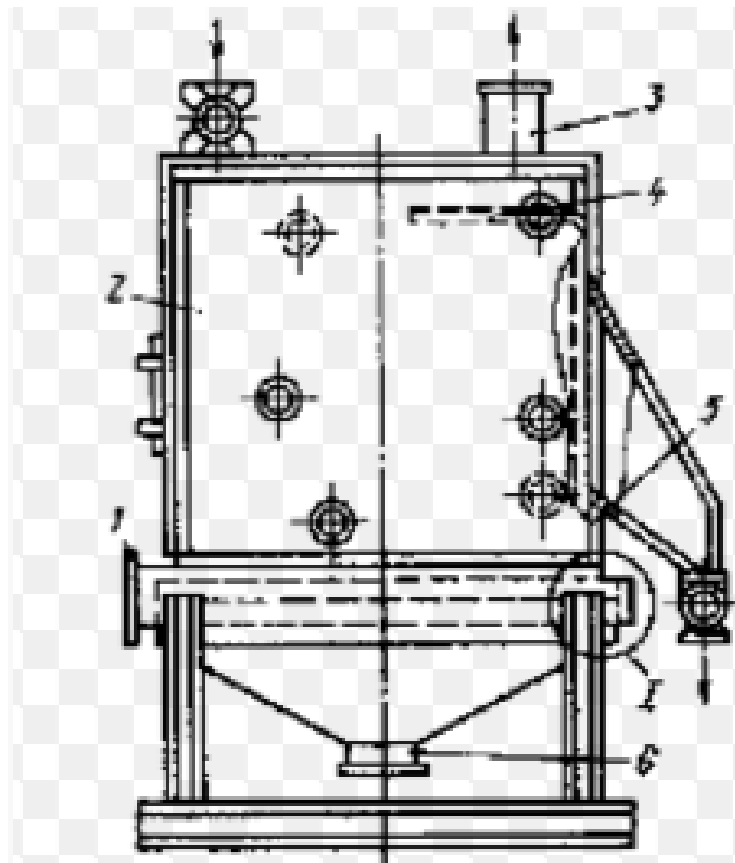


Рисунок 1.4. Схема сушарки з псевдозрідженим шаром:

1 - люк; 2 - корпус; 3 –патрубок; 4 - відбійник; 5 - переливний поріг;
6 – патрубок для подачі сушильного агента.

На рис. 1.5 представлено вібраційну сушарку компанії «Ангідрит» (Данія). Корпус агрегату, сформований у вигляді прямокутного жолоба 2 з газорозподільною решіткою 5, встановлено на опорній рамі 6 за допомогою амортизаторів 8 та пружин 7, що закріплена на фундаменті. Теплоносій

подається у простір під решітку 5 і, проходячи крізь матеріальний шар, відводиться у витяжний повітропровід. Приводна система сушарки включає маятниковий вібродвигун 3 спрямованої дії з можливістю регулювання дисбалансу та частоти коливань. Швидкість транспортування матеріалу від завантажувального патрубку до зливної перегородки 9 може змінюватися шляхом коригування кута нахилу газорозподільної решітки 5, а також амплітуди й частоти коливань. Висота шару матеріалу забезпечується регулюванням положення зливної перегородки 9.

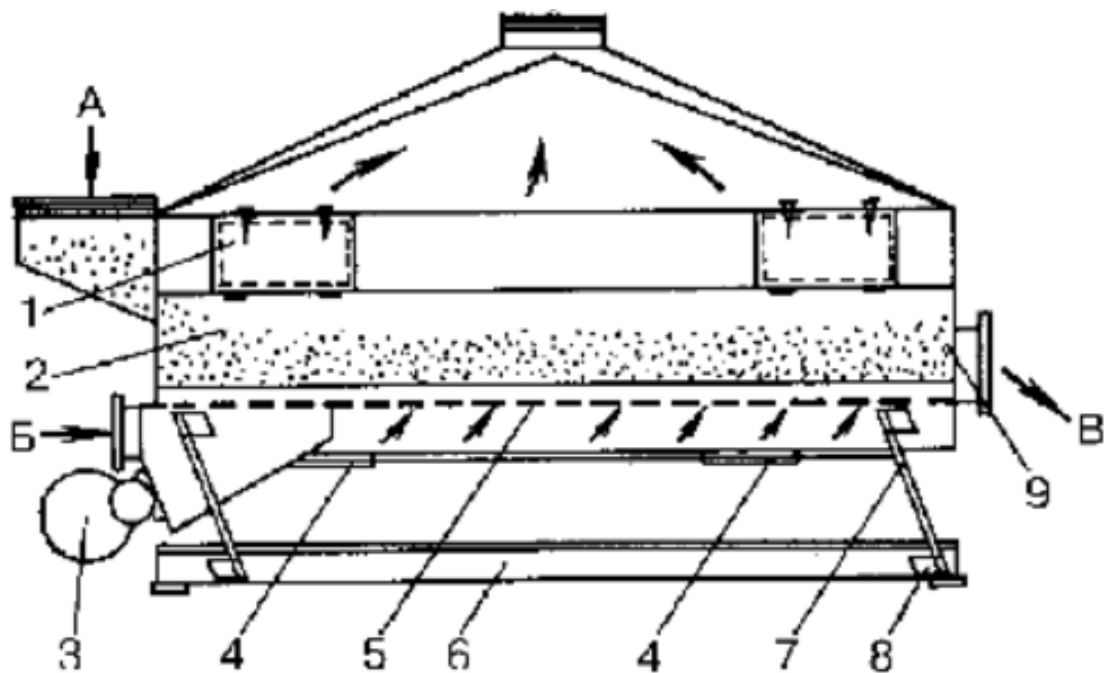


Рисунок 1.5. Схема вібраційної сушарки

1 - оглядові вікна; 2 - жолоб; 3 - вібратор ; 4 – вивантажувальні люки;
5 - газорозподільна решітка; 6 - рама; 7 - пружини; 8 - амортизатори;
9 - перегородка; А - вологий матеріал, Б, Г – свіжий та, відповідно,
відпрацьований сушильний агент; В - висушений матеріал

1.3. Особливості процесу сушіння у псевдозрідженому шарі

Сушіння в псевдозрідженому шарі є надзвичайно ефективним методом висушування твердих матеріалів, оскільки такий шар характеризується значною площею контакту частинок з газовим середовищем та інтенсивним їх перемішуванням. У процесі перемішування забезпечується вирівнювання

параметрів технологічного процесу по всьому об'єму шару, що особливо стосується температурного режиму. При правильній організації псевдозрідженого шару відсутні застійні зони, що сприяє ефективній взаємодії частинок з теплоносієм.

Для висушування матеріалу у періодичному режимі вологий вихідний продукт подається партіями у приймальну ємність сушильної установки. Там він утримується в підвішеному стані та перемішується у висхідному турбулентному потоці нагрітого газу. Завдяки цьому відбувається висушування продукту при високих коефіцієнтах тепло- та масопередачі до досягнення необхідного рівня залишкової вологості. Оптимальна швидкість газу визначається розміром та щільністю частинок матеріалу, а тепло надходить разом із технологічним повітрям.

У разі проведення процесу сушіння в безперервному режимі забезпечується постійне та рівномірне завантаження й вивантаження матеріалу. Напрями руху висушуваного продукту та сушильного агента визначаються властивостями матеріалу та вимогами до умов сушіння. Завдяки безперервному та повному перемішуванню досягається однорідна температура продукту та рівномірне висушування вихідного матеріалу, що неможливо забезпечити в установках контактного сушіння або в установках з сушінням випромінюванням, де можливе утворення локальних перегрівів. Типові криві зміни висоти зернистого шару та перепаду тисків у ньому (гідравлічного опору) залежно від фіктивної швидкості газу (швидкості, віднесеної до всього перерізу апарата) наведені на рис. 1.1.

Швидкість, при якій шар матеріалу втрачає стійкість і переходить у псевдозріджений стан, називають швидкістю псевдозрідження і позначають як $w_{пс}$. При підвищенні швидкості газу до величини, що дорівнює $w_{пс}$, гідравлічний опір зернистого шару, як показано на рис. 1.6, збільшується зі зростанням w_0 , тоді як висота шару практично залишається незмінною (лінія ABC на рис. 1.6, а).

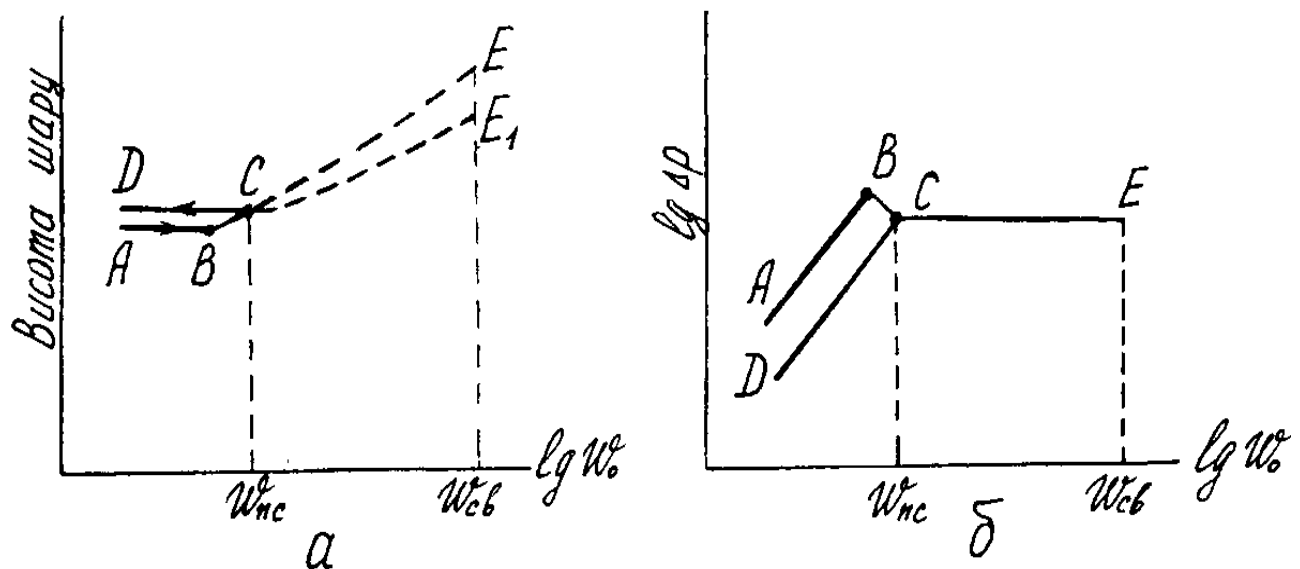


Рисунок 1.6. Залежності висоти шару (а) і його гідравлічного опору (б) від швидкості потоку повітря

1.4. Властивості казеїну як об'єкту сушіння

Казеїн є молочним білком, який відділяють із знежиреного молока шляхом осадження під впливом високої кислотності. Гранули казеїну, що надходять на сушіння, складаються з дуже дрібних частинок (міцел казеїну), між якими пори заповнені вологою.

Процес сушіння казеїну визначається двома основними чинниками: формою зв'язку води з білком та властивостями повітря як приймача води.

У процесі сушіння виділяють три основні періоди. Перший період характеризується зростанням швидкості сушіння, під час якого прогрівається весь шар казеїну, і відділяється переважно вода з макрокапілярів, що частково руйнуються при «кипінні». Цей етап процесу має конвективний характер масообміну. Другий період відбувається при постійній швидкості сушіння: вода з капілярів надходить до поверхні з такою інтенсивністю, яку може відвести повітря, тобто переміщення води всередині гранул має дифузійний характер, а її видалення з поверхні — конвективний [11]. У третьому періоді швидкість сушіння знижується і визначається виключно дифузійним

переміщенням води до поверхні гранул. При досягненні вологості близько 10 % відділення води майже припиняється, а подача сушильного агента супроводжується структурними змінами білка, що проявляються у зміні кольору зерен аж до коричневого.

Процес сушіння казеїну характеризується великою кількістю взаємопов'язаних параметрів, які визначають його перебіг. Зміни одного з параметрів призводять до нелінійних змін інших. Гідродинамічні властивості псевдозрідженого шару казеїну залежать від характеру розподілу частинок за фракціями, тому гранулометричний склад та вологість продукту є ключовими характеристиками під час сушіння. Зменшення вологості спричиняє зменшення маси та розмірів частинок казеїну, що, у свою чергу, змінює гідродинамічні властивості псевдозрідженого шару [13].

Вологість казеїну умовно поділяють на три форми фізичного зв'язку: вільну воду, яка заповнює порожнини між скупченнями частинок; капілярну воду, що міститься всередині волокнистої казеїнової структури, яку можна умовно розглядати як капіляри; та гідратаційну воду, що затримується білками.

Різні форми зв'язку води зумовлюють різні механізми її відділення. Вільна вода відділяється самостійно під дією самопресування, тоді як видалення капілярної води вимагає застосування тиску до згустку або його спеціальної обробки, наприклад, термічної. Гідратаційну воду видалити складно, проте під впливом певних технологічних факторів, таких як тиск або температура, вона може переходити у вільну або капілярну форму [15].

1.5. Будова та принцип роботи сушарки ВС-200

Процес сушіння казеїну здійснюється в апараті з псевдозрідженим шаром. Апарат містить сушильну камеру 1 (рис. 1.7), встановлену на основі, виготовленій із металевих прокатів. До нижньої частини апарату прикріплено дифузор 3, призначений для подачі теплоносія. Через люк 7 встановлено

газорозподільний пристрій, виконаний у вигляді паралельно розташованих призм, закріплених торцями до рами. Основи призм формують горизонтальні канали для проходу теплоносія всередину сушильної камери та перешкоджають потраплянню казеїну в дифузор. Рама газорозподільного пристрою закріплюється болтами до полиць швелера та ущільнюється по периметру прокладкою товщиною 10 мм, при цьому болти фіксуються контргайкою.

На передній стінці сушильної камери 1 розташований люк 6, призначений для внутрішнього огляду та очищення камери. У кришці люка вмонтовано вікно для візуального спостереження за процесом сушіння всередині камери. Аналогічні оглядові вікна 6 розміщені на бічних стінках камери та обладнані склоочисниками. У задній стінці камери встановлено штуцер 5 для вивантаження висушеного казеїну, а на вході в штуцер задня стінка формує поріг, який забезпечує підтримання необхідної висоти шару продукту.

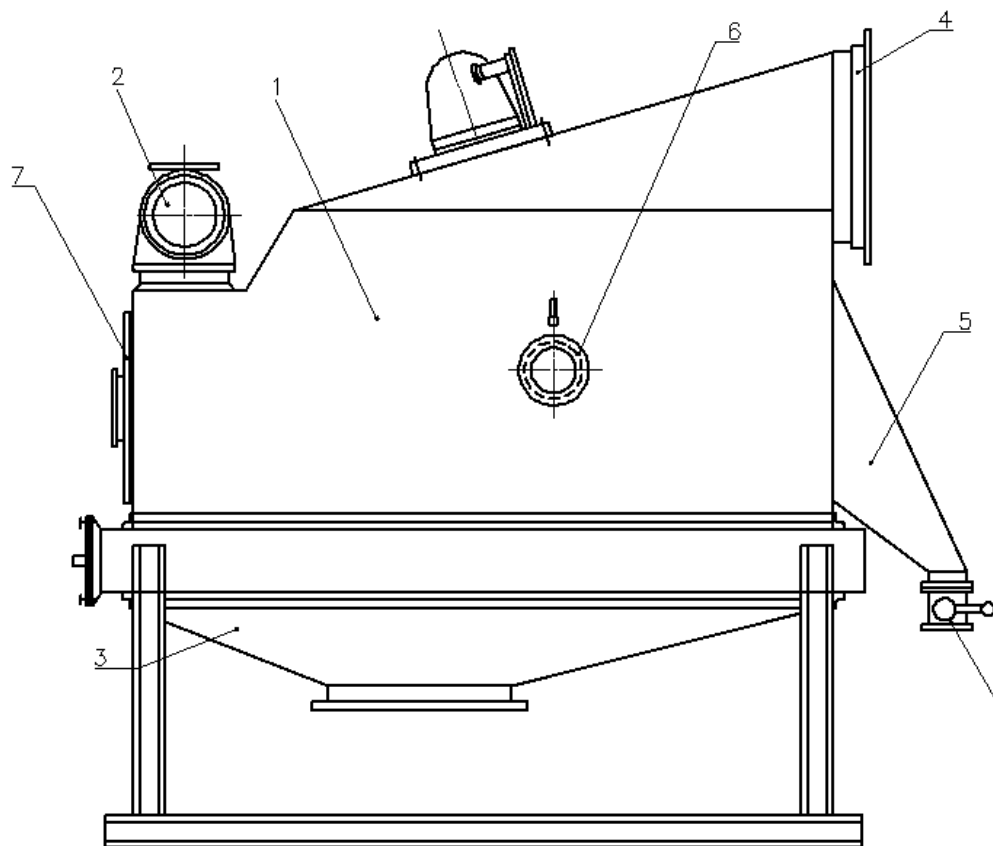


Рисунок 1.7. Сушарка марки ВС-200

1 – камера; 2 – завантажувальний пристрій; 3 – дифузор;

4 – патрубок для відведення відпрацьованого сушильного агента; 5 – патрубок для відведення висушеного казеїну; 6 – оглядове вікно; 7 – люк

До фланця штуцера закріплено поворотний шибер з механічним фіксатором. На кришці сушильної камери над оглядовим вікном розташовано світильник з електролампю потужністю 100 Вт, призначений для освітлення внутрішнього простору камери. У задній торцевій стінці та кришці камери встановлено штуцер 4 для відведення відпрацьованого теплоносія, а до фланця цього штуцера за допомогою конічної перехідної вставки приєднується прямоточний циклон.

Внутрішні стінки рами формують прохід, який з'єднує завантажувальний пристрій із сушильною камерою. До верхнього фланця завантажувального пристрою кріпиться приймальний бункер для сирого казеїну. Крутий момент від привода до ротора живильника-гранулятора передається через пальцеву муфту. Прямоточний циклон забезпечує компактність агрегату та високий ступінь очищення відпрацьованого теплоносія. До корпусу циклона приєднано розвантажувальний бункер із люком для огляду.

Гаряче повітря подається в апарат і створює умови для кипіння сипучого матеріалу. Взаємодія гарячого повітря з частинками матеріалу спричиняє їх нагрів, а при досягненні температури 40 °С увімкнення живильника-гранулятора та шнекового преса з насосом забезпечує подачу казеїну-сирця разом із сироваткою.

У процесі сушіння частинки матеріалу безперервно переміщуються від місця завантаження до точки вивантаження готового продукту. Висушені частинки підхоплюються потоком повітря та транспортуються у бункер-нагромаджувач, до якого тангенціально підключено трубопровід пневмотранспортера. Під дією відцентрових сил частинки осідають у бункері, тоді як очищене повітря проходить крізь стінку в горловині бункера та по трубопроводу надходить у повітропровід, а потім видувається в атмосферу за допомогою вентилятора.

Відпрацьоване повітря, що містить пару та дрібні частинки матеріалу, проходить через прямоточний циклон, де відбувається його очищення. Бункер-нагромаджувач розраховано на обсяг матеріалу, який накопичується протягом однієї зміни, тому його розвантаження здійснюють наприкінці кожної зміни. Під час цього процесу відбувається вирівнювання вологості частинок матеріалу, а розвантаження проводиться через шлюзовий шибер.

Технічні характеристики сушарки ВС-200

1. Продуктивність по висушеному казеїну, кг/год	200	
2. Робоча температура процесу, °С		40
3. Габаритні розміри, мм		
Ширина	2850	
Глибина	1220	
Висота	2590	
4. Маса, кг	540	

1.6. Мета і основні задачі кваліфікаційної роботи

Необхідною умовою розвитку молочної промисловості є вдосконалення технологічного обладнання, спрямованого як на підвищення ефективності переробки сировини, так і на зменшення експлуатаційних витрат. Аналіз технологічного процесу виробництва технічного казеїну дозволяє зробити висновок, що найбільш енерговитратним етапом є процес сушіння.

Метою кваліфікаційної роботи є оптимізація енергоспоживання при виробництві казеїну.

Основні задачі:

- аналіз технологічного процесу виробництва казеїну;
- вивчення та оцінка обладнання, призначеного для його сушіння;
- розробка пропозицій щодо вдосконалення конструкціїсушарки;

- дослідження змін гранулометричного складу казеїну-сирцю під час сушіння;
- виконання розрахунків установки для сушіння казеїну;
- розробка заходів з охорони навколишнього середовища;

2. Модернізація сушарки ВС-200

2.1 Задачі модернізації сушарки

Енергоефективність процесів сушіння є одним із ключових чинників підвищення загальної продуктивності та економічної доцільності виробництва казеїну. Сушіння є найбільш енергомісткою операцією у технологічному ланцюзі переробки молока, оскільки воно потребує значних витрат тепла для випаровування вологи з матеріалу та підтримання оптимальних температурних режимів.

Рациональне використання енергії в процесі сушіння дозволяє не лише зменшити витрати на теплову енергію, а й підвищити продуктивність установки, знизити термічне навантаження на матеріал і запобігти його структурним змінам. Одним із ефективних шляхів підвищення енергоефективності є використання відпрацьованого теплоносія для попереднього нагрівання вологого казеїну, що значно зменшує втрати тепла в основній сушильній камері.

Крім того, енергоефективні рішення сприяють зменшенню негативного впливу виробництва на довкілля за рахунок скорочення споживання енергоресурсів і зниження викидів тепла та вологи в атмосферу. У сучасних виробничих умовах удосконалення систем рекуперації тепла та оптимізація режимів сушіння є необхідними заходами для забезпечення конкурентоспроможності продукції та сталого розвитку молочної галузі.

Для підвищення енергоефективності процесу сушіння казеїну можуть бути застосовані наступні технологічні та конструктивні заходи:

Рекуперація відпрацьованого теплоносія. Частина теплого повітря, що виводиться із сушильної камери, може використовуватися для попереднього підігрівання вологого казеїну у завантажувальному пристрої або у додаткових теплообмінниках. Це дозволяє зменшити потребу у додатковому енергоспоживанні для нагрівання матеріалу.

Оптимізація температурного режиму. Встановлення автоматизованих систем контролю температури теплоносія та продукту забезпечує рівномірне висушування без локальних перегрівів, зменшуючи втрати енергії та ризик термічного пошкодження білка.

Інтенсифікація масообміну. Використання псевдозрідженого шару, вихрових або стрічкових систем перемішування забезпечує максимальний контакт частинок матеріалу з теплоносієм, що підвищує швидкість сушіння та зменшує витрати енергії на одиницю готового продукту.

Попереднє подрібнення і рівномірне розподілення продукту. Зменшення розмірів частинок і рівномірний розподіл казеїну по поверхні сушильної стрічки або шару дозволяє зменшити час сушіння та підвищити ефективність використання тепла.

Модернізація конструкції сушильного обладнання. Впровадження додаткових вентиляторів, регулювальних заслінок, теплообмінників та патрубків для рекуперації повітря дозволяє здійснювати більш ефективний розподіл теплоносія і мінімізувати втрати енергії.

Автоматизація процесу. Використання датчиків вологості, температури та швидкості повітря з системами управління дозволяє підтримувати оптимальні режими сушіння, запобігати перевитраті енергії та забезпечувати стабільну якість продукту.

Реалізація цих заходів дозволяє істотно зменшити витрати енергоресурсів, скоротити експлуатаційні витрати на виробництво казеїну та підвищити ефективність молокопереробного виробництва.

У технологічному процесі сушіння казеїну в сушарці ВС-200 як теплоносієм використовується повітря, нагріте до температури 120 °С. Температура відпрацьованого теплоносія на виході з апарата становить близько 50 °С. Порівняно висока температура вихідного повітря свідчить про значні втрати енергії, тому модернізація сушильної установки має бути спрямована на зменшення енергетичних витрат процесу.

Ефективніше використання теплоти теплоносія може бути забезпечене двома основними шляхами:

- підвищення інтенсивності теплообміну між теплоносієм та казеїном у сушильній камері;
- регенерація тепла відпрацьованого теплоносія.

Перший напрямок у межах конструкції сушарки ВС-200 реалізувати складно, оскільки для інтенсифікації теплообміну необхідне збільшення тривалості перебування теплоносія в сушильній камері, що суперечить її конструктивним особливостям.

У зв'язку з цим для підвищення енергоефективності прийнято рішення здійснити модернізацію установки в напрямку регенерації теплоти відпрацьованого теплоносія.

2.2. Модернізація сушарки

З метою зменшення енергетичних витрат у процесі сушіння казеїну пропонується використовувати частину відпрацьованого теплоносія для попереднього підігрівання вологого казеїну перед його надходженням у сушильну камеру. Такий підхід забезпечує підвищення температури завантажувального матеріалу без додаткових витрат теплоти, оскільки використовується енергія, що в іншому випадку була б повністю втрачена з відпрацьованим повітрям.

Для реалізації цього рішення передбачається відбір частини теплоносія, що виводиться із сушильної камери 2 (рис. 2.1) через патрубок 5, та подача його трубопроводом 8 у зону завантажувального пристрою 4. Попередній підігрів казеїну у завантажувальному вузлі призводить до зменшення різниці температур між матеріалом і теплоносієм у сушильній камері, що, у свою чергу, знижує інтенсивність теплових потоків, необхідних для доведення продукту до температури початку ефективного сушіння.

Обґрунтування ефективності запропонованого рішення.

Температура відпрацьованого теплоносія становить близько 50 °С, що є достатньо високим показником для здійснення корисного теплообміну з вологим казеїном, температура якого після пресування зазвичай не перевищує 20–25 °С. Представлена різниця температур забезпечує можливість суттєвого зменшення теплових витрат у сушильній камері, оскільки частина теплоти, яка за традиційною схемою витрачається на підігрівання матеріалу, компенсується за рахунок рекуперованої енергії.

Очікуваний техніко-економічний ефект.

Використання відпрацьованого теплоносія для попереднього підігрівання дає змогу:

- зменшити витрати палива або електроенергії на нагрівання основного теплоносія;
- скоротити тривалість початкового періоду сушіння, що позитивно впливає на загальну продуктивність установки;
- знизити температуру сушильного агенту, необхідну для досягнення заданих параметрів процесу, а отже — підвищити енергоефективність установки;
- зменшити теплове навантаження на конструктивні елементи сушильної камери та продовжити їх ресурс.

Конструктивна схема регенерації теплоносія.

Запропонована модернізація передбачає встановлення відвідного трубопроводу, що забезпечує регульовану подачу частини відпрацьованого повітря у завантажувальний пристрій.

Для стабільності режимів роботи доцільно передбачити:

- шиберний або дросельний клапан для регулювання витрати регенованого теплоносія;
- теплоізоляцію трубопроводу для мінімізації теплових втрат;
- можливість відключення контуру регенерації у разі зміни технологічних умов.

Таким чином, використання відпрацьованого теплоносія для попереднього підігрівання казеїну є ефективним напрямом модернізації сушильної установки, який дозволяє зменшити енерговитрати, підвищити коефіцієнт корисного використання теплоти та покращити загальні техніко-економічні показники виробництва казеїну.

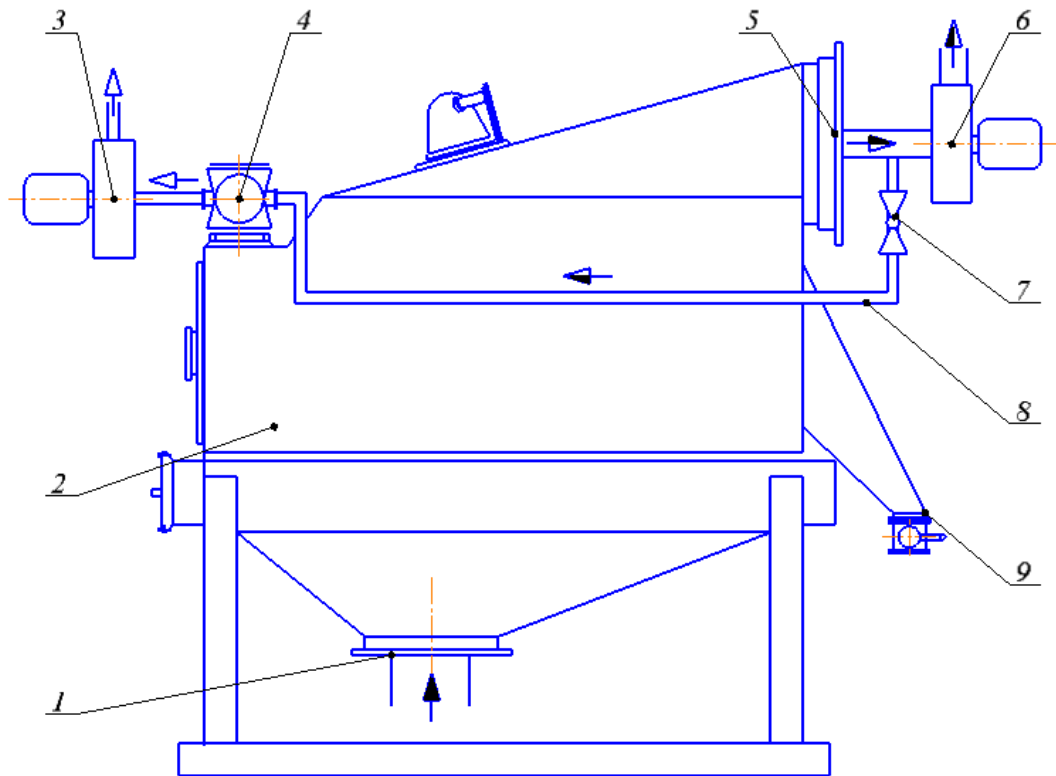


Рисунок 2.1. Модернізована сушарка ВС-200

1 – патрубок для подачі сушильного агенту; 2 – сушильна камера;
3 – додатковий вентилятор; 4 – завантажувальний пристрій сушарки;
5 – патрубок для відведення відпрацьованого сушильного агента; 6 –
вентилятор; 7 – вентиль; 8 – трубопровід; 9 – патрубок для відведення
висушеного продукту

Сушарку додатково оснащено вентилятором 3, який забезпечує відведення частини відпрацьованого повітря з патрубка 5 та його направлення через завантажувальний пристрій для ефективного попереднього підігрівання вологого казеїну. На трубопроводі 8 встановлено регулювальний вентиль 7, що дозволяє контролювати об'єм і швидкість подачі рекуперованого теплоносія.

Для реалізації процесу попереднього нагрівання в конструкцію завантажувального пристрою внесено відповідні зміни: на протилежних кінцях його корпусу встановлено патрубки для подачі та відведення теплоносія, що забезпечує рівномірний обдув казеїну і оптимальний теплообмін між матеріалом та відпрацьованим повітрям. Крім того, запропоноване розташування патрубків сприяє запобіганню локальних перегрівів та забезпечує стабільність температурного режиму у всьому об'ємі завантажувального матеріалу.

2.3. Конструкція модернізованого завантажувального пристрою сушарки

Модернізований завантажувальний пристрій призначений для подачі вологого казеїну до сушильної установки, а також для його попереднього нагрівання за рахунок використання енергії відпрацьованого теплоносія.

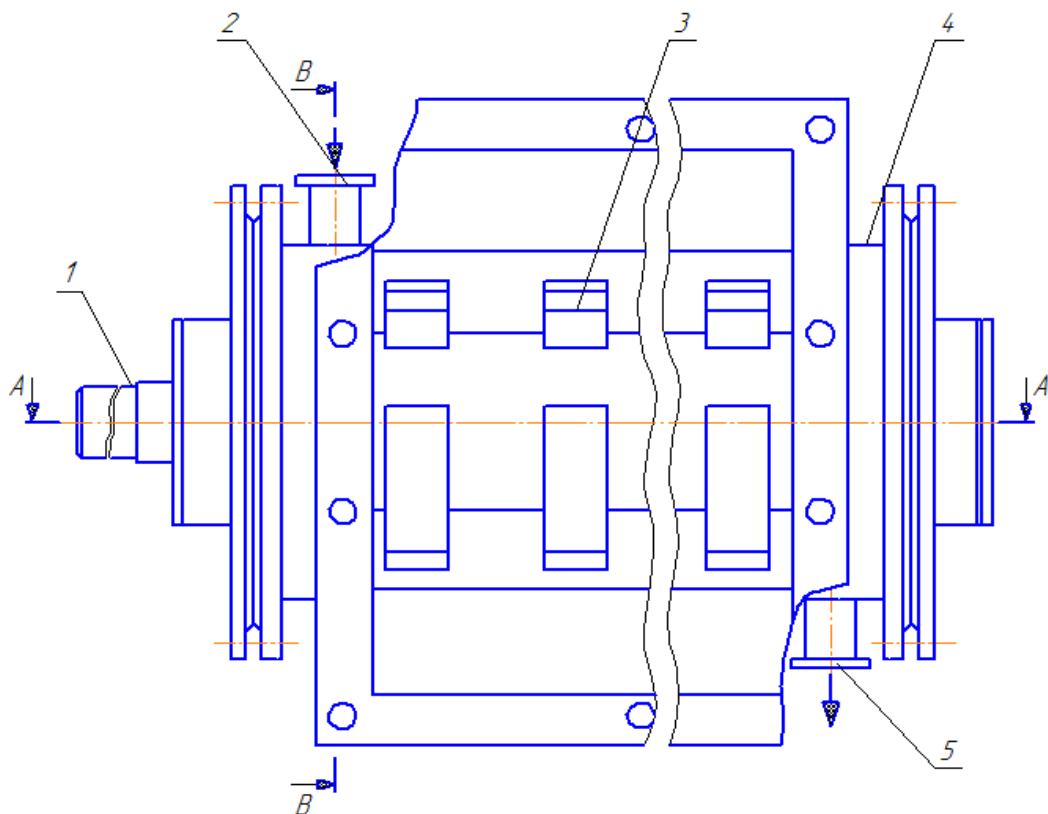


Рисунок 2.2. Модернізований завантажувальний пристрій сушарки

- 1 – вал; 2 – патрубок для подачі сушильного агента, 3 – завантажувальні лопаті;
4 – корпус вузла; 5 – патрубок для відведення сушильного агента

Конструктивно вузол включає вал 1 (рис. 2.2), розташований у корпусі 4, який забезпечує переміщення та рівномірний розподіл казеїну по всьому об'єму пристрою.

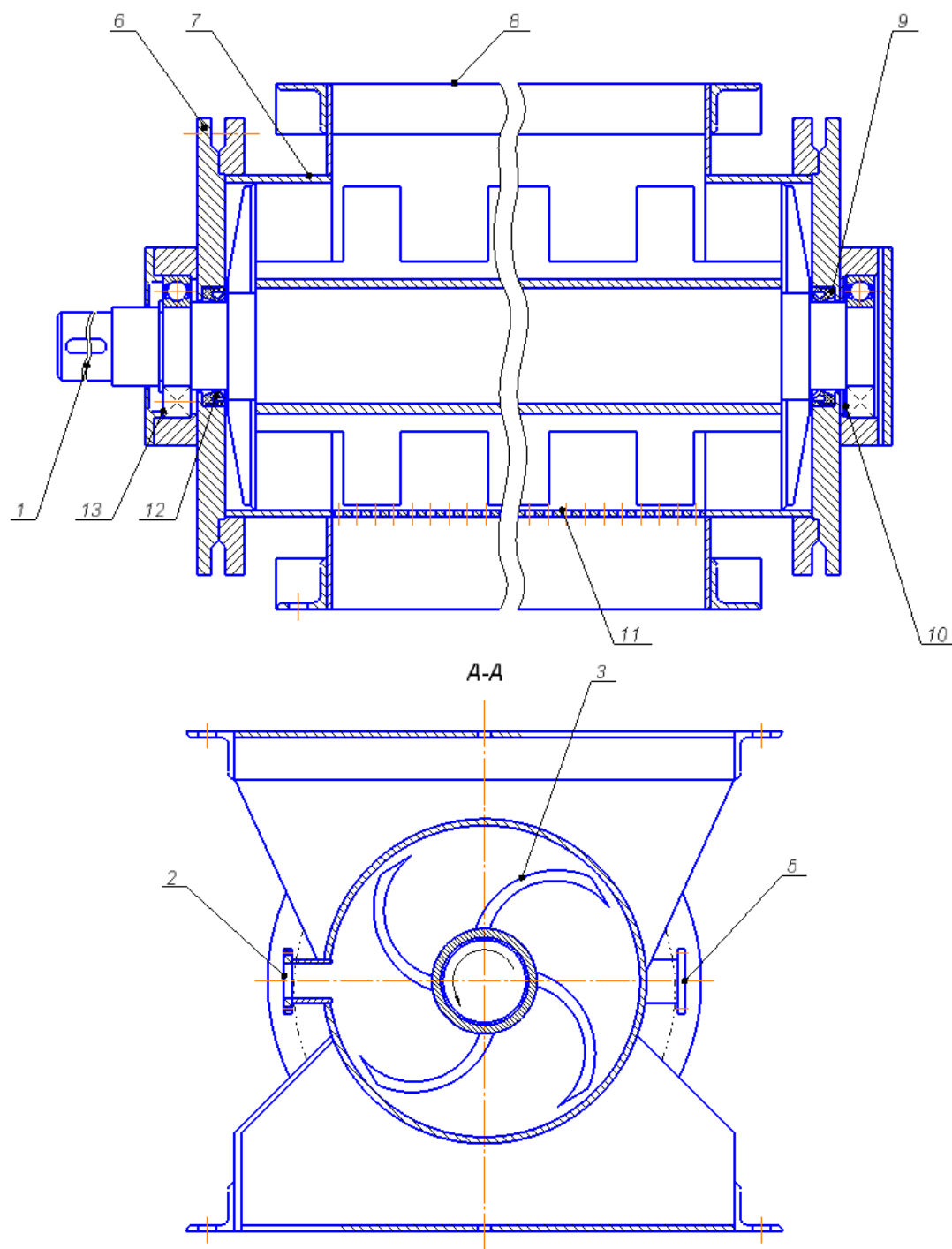


Рисунок 2.3. Модернізований завантажувальний пристрій сушарки

1 – завантажувальний вал; 2 – патрубок відведення сушильного агенту; 3 – завантажувальні лопаті; 5 – патрубок для відведення сушильного агенту з вузла завантаження; 6 – кришка; 7 – корпус вузла завантаження; 8 – лоток; 9, 12 – ущільнення; 10, 13 – підшипники; 11 – перфороване дно корпусу.

Завдяки модернізації до корпусу пристрою інтегровані патрубки для подачі і відведення рекуперованого теплоносія, що дозволяє оптимізувати процес теплообміну та підвищити енергоефективність сушіння.

Завантажувальний вал 1 встановлений на шарикових підшипниках 10 і 13 (рис. 2.3). Корпус 7 пристрою закривається з обох сторін кришками 6.

Під час подачі вологого казеїну в установку герметизація зазору між нерухомим корпусом завантажувального пристрою та обертовим валом забезпечується сальниковими ущільненнями 9 і 12. Основним призначенням цих ущільнень є запобігання витоку казеїну та сироватки за межі внутрішнього простору корпусу завантажувального вузла.

Вологий казеїн подається у завантажувальний пристрій із шнекового преса через лоток 8. Лопасті 3, жорстко закріплені на валу 1, при його обертанні забезпечують рівномірний просів і переміщення казеїну крізь перфоровану решітку 11 до сушильної установки.

Відпрацьований теплоносій з температурою близько 50 °С надходить із сушильної камери через патрубок 2 у завантажувальний пристрій і рухається вздовж корпусу 7, передаючи свою теплову енергію вологому казеїну для попереднього нагрівання. Після взаємодії з матеріалом теплоносій відводиться з корпусу пристрою через патрубок 5, забезпечуючи безперервний теплообмін і стабільність температурного режиму всередині завантажувального вузла.

2.4. Висновки до розділи

Розроблено заходи із модернізації сушарки ВС-200, що полягають у використанні частини відпрацьованого сушильного агенту для попереднього підігрівання вологого казеїну перед його надходженням у сушильну камеру.

Очікуваний ефект від модернізації:

- зниження енергозатрат на процес сушіння
- підвищення коефіцієнту корисного використання теплоти та покращити загальні техніко-економічні показники виробництва казеїну. -

- скорочення тривалості початкового періоду сушіння, що позитивно впливає на загальну продуктивність установки;
- зниження необхідну для досягнення заданих параметрів процесу температури сушильного агенту:
- зниження теплового навантаження на конструктивні елементи сушильної камери та продовження її ресурсу.

3. Конструювання сушарки марки ВС-200

3.1. Розробка конструкції сушарки ВС-200

Привід сушарки ВС-200 здійснюється від електродвигуна 1 (рис. 3.1) з використанням валу 2 та фрикційної муфти 3. Завантажувальний вал 5 розміщено горизонтально з можливістю обертання на шарикових підшипниках 4.

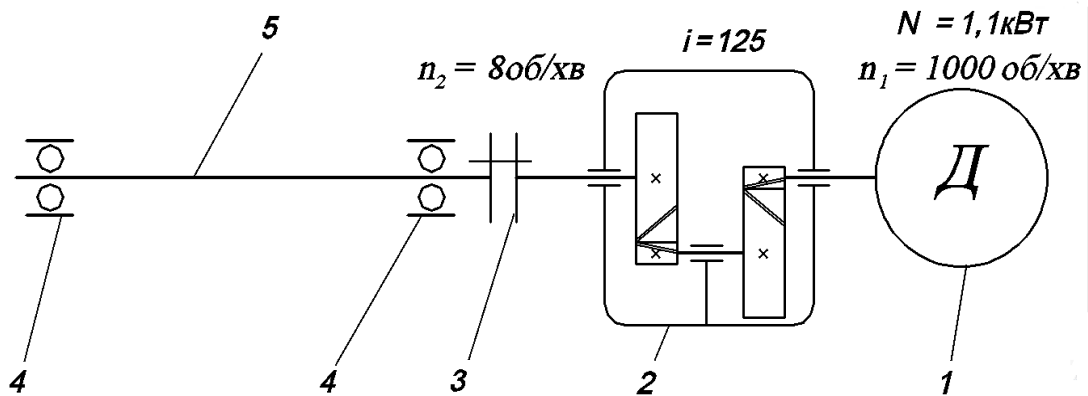


Рисунок 3.1. Кінематична схема сушарки ВС-200

1 – електродвигун; 2 – вал приводу; 3 – муфта; 4 – підшипники;
5 – завантажувальний вал.

Завантажувальний пристрій призначений для подачі вологого казеїну до сушильної установки. Цей вузол складається з вала 1, розташованого в корпусі 3 та встановленого на кулькових підшипниках 4. На валу 1 (рис. 3.2) жорстко змонтовані лопаті 2, які під час обертання забезпечують подачу вологого матеріалу в установку. Обертання вала приводиться в дію електродвигуном 7 через редуктор 6 і муфту 5.

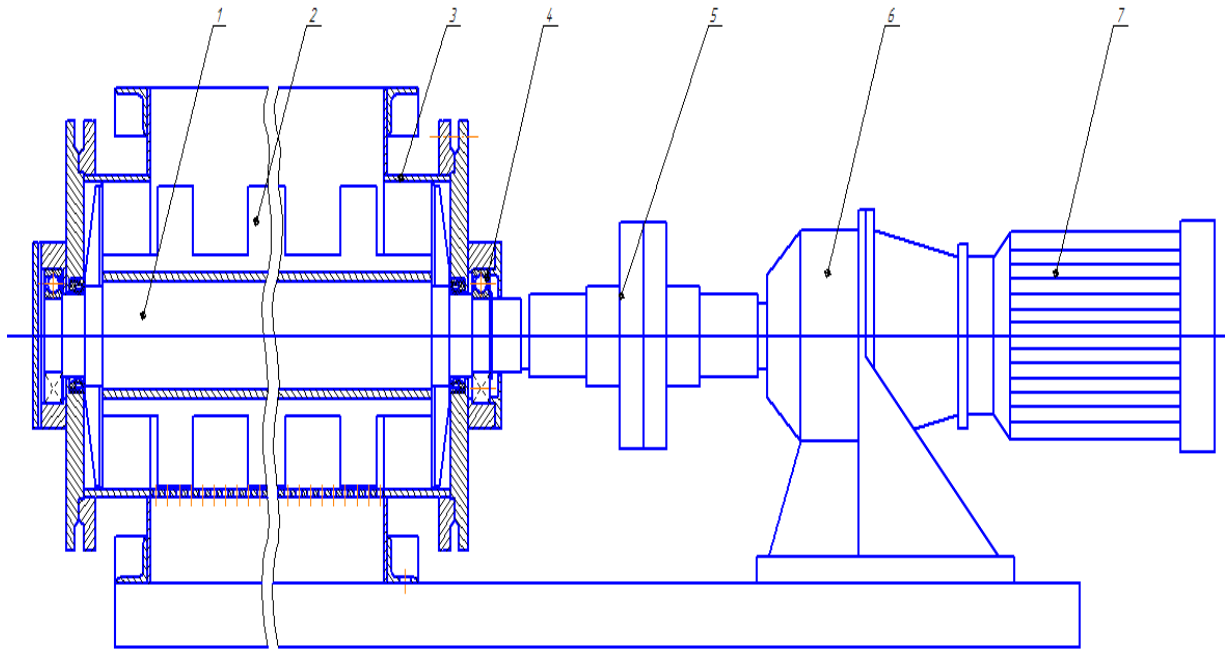


Рисунок 3.2. Вузол завантаження

1 – вал вузла завантаження; 2 – завантажувальні лопаті; 3 – корпус вузла завантаження; 4 – підшипники; 5-муфта; 6 редуктор; 7 –електродвигун

Вал, завантажувальні лопаті та підшипники є елементами, що сприймають основні експлуатаційні навантаження під час роботи сушарки. У процесі функціонування на вал діють кілька видів сил: дотичні сили, зумовлені сумарним впливом маси завантажуваного продукту та реакцією опор, а також відцентрові сили, що виникають унаслідок інерції обертових мас і тертя між елементами механізму під час їх руху.

3.2. Конструювання та розрахунок окремих вузлів сушарки

3.2.1. Розрахунок завантажувального валу сушарки

Завантажувальний вал сушарки ВС-200 забезпечує подачу вологого казеїну до робочої камери сушильної установки та опирається на два шарикові підшипники. Частота його обертання визначається вимогами технологічного процесу. Орієнтовні геометричні параметри валу встановлюються з урахуванням продуктивності обладнання та необхідних умов міцності. Оскільки

продуктивність сушарки за висушеним казеїном становить 200 кг/год, продуктивність на стадії подачі вологого продукту розраховується на основі різниці між початковою та кінцевою вологістю матеріалу.

$$G_3 = G_{c.k} + G_{c.k}(\rho_1 - \rho_2) = 200 + 200(0,8 - 0,6) = 240 \text{ кг.}$$

де G_3 – продуктивність за вологим казеїном., кг;

$G_{c.k}$ – продуктивність за висушеним казеїном, кг;

ρ_1 – початкова вологість, кг/м³;

ρ_2 – кінцева вологість, кг/м³.

Розрахуємо діаметр завантажувального валу виходячи з навантаження на окремі його ділянки.

Завантажувальний вал виконує 720 обертів за 1 годину або 12 об/хв. За один оберт він завантажує в сушарку $240/720 = 0,33$ кг вологого казеїну.

Розрахуємо діаметр вала відповідно до крутних моментів. Крутний момент на завантажувальному валі становить:

$$M_{кр} = \frac{N}{\omega} = \frac{3 \cdot 10^3}{0,2} = 1,5 \cdot 10^4 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

де N – потужність, Вт;

ω – кутова швидкість обертання завантажувального валу, с⁻¹.

Діаметр колін завантажувального вала:

$$d_v = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot M_{кр}}{\pi \cdot [\tau_{кр}]}} = \sqrt[3]{\frac{1,875 \cdot 1,5 \cdot 10^4}{3,14 \cdot 20 \cdot 10^6}} = 0,021 \text{ м},$$

де $[\tau_{кр}]$ – для сталі становить 40 МПа.

Прийmemo діаметр завантажувального валу 0,042 м або 42 мм.

При розрахунку будемо розглядати вал як балку, що розміщена на двох опорах (рис. 3.3.).

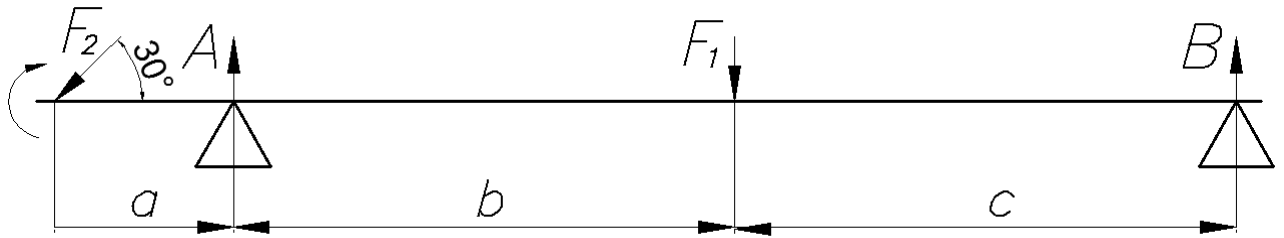


Рисунок 3.3. Схема дії сил на завантажувальний вал

F_1 – зусилля на вал від завантаження казеїну, $F_1 = 33\text{Н}$;

F_2 – зусилля на вал від приводу, яке передається за допомогою фрикційної муфти, $F_2 = 1,68\text{кН}$.

Відстані: $a=0,11\text{м}$, $b=0,47\text{м}$; $c=0,47\text{м}$.

При куті повороту завантажувального валу 0° визначимо реакції опор у площині YOZ:

$$\Sigma M_A = F_2 \cdot \sin 30^\circ \cdot -F_1 \cdot b - Y_B(b + c) = 0;$$

$$Y_b = \frac{F_1 c - F_2 \cdot \sin 30^\circ (a + b + c)}{b + c} =$$

$$= \frac{33 \cdot 0,47 - 1,68 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot (0,11 + 0,47 + 0,47)}{0,47 + 0,47} =$$

$$= 13,38 \cdot 10^3 \text{ Н};$$

$$\Sigma M_B = F_2 \cdot \sin 30^\circ (a + b + c) + Y_A(b + c) - F_1 \cdot c = 0 ;$$

$$Y_a = \frac{F_1 \cdot b - F_2 \cdot \sin 30^\circ \cdot a}{b + c} = \frac{33 \cdot 0,08 - 1,68 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 0,05}{0,47 + 0,47} = 5,22 \cdot 10^3 \text{ Н};$$

Далі визначимо реакції опор валу у площині XOZ.

Відповідно до точки А:

$$F_2 \cdot \cos 30^\circ \cdot a = X_B(b + c);$$

$$X_B = \frac{F_2 \cdot \cos 30^\circ \cdot a}{b + c} = \frac{1,68 \cdot 0,86 \cdot 0,05}{0,28} = 0,03 \cdot 10^3 \text{ Н};$$

Відповідно до точки В:

$$F_2 \cdot \cos 30^\circ (a + b + c) - X_A (b + c) = 0;$$

$$X_A = \frac{F_2 \cdot \cos 30^\circ (a + b + c)}{b + c} = \frac{1,68 \cdot 0,86 \cdot (0,11 + 0,47 + 0,47)}{0,47 + 0,47} = 1,7 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

На основі отриманих даних виконаємо епюри моментів на завантажувальному валі при куті повороту 0° (рис. 3.4.).

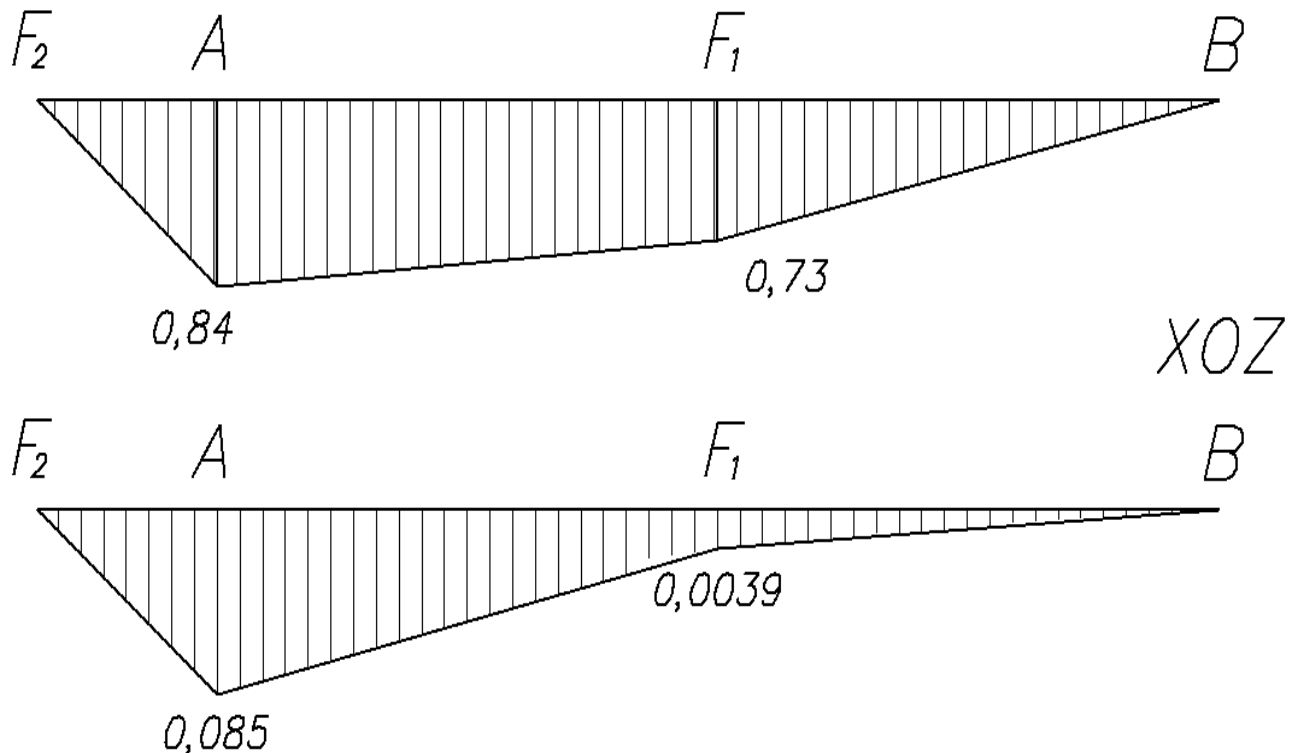


Рисунок 3.4. Епюри моментів на завантажувальному валу

Визначимо сумарний згинальний момент на валу:

$$\text{Мз. сум. (т. А)} = \sqrt{0,084^2 + 0,085^2} = 85 \text{ Н};$$

$$\text{Мз. сум. (т. 1)} = \sqrt{1,46^2 + 0,06^2} = 1500 \text{ Н};$$

$$\text{Мз. сум. (т. 2)} = \sqrt{0,73^2 + 0,0039^2} = 730 \text{ Н};$$

$$\sigma_3 = \frac{M_3 \cdot \text{сум.}}{W_x} = \frac{32 \cdot 1,5}{3,14(0,025 \cdot 10^{-3})^3} = 1,24 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

Напруження від кручення становить:

$$\tau_{кр.} = \frac{M_{кр}}{W_p} = \frac{16 \cdot M_{кр}}{\pi d^3} = \frac{16 \cdot 1,875}{3,14(0,025)^3} = 0,611 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

Визначимо еквівалентне напруження $\sigma_{ек}$ і порівняємо його з допустимим σ_u . Так само зробимо і для кутів 120° і 240° .

$$\sigma_{ек} = \sqrt{\sigma_3^2 + 4(\tau_{кр.})^2} = \sqrt{(1,24 \cdot 10^6)^2 + 4 \cdot (0,611 \cdot 10^6)^2} = 3,048 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

Отже ми встановили, що еквівалентне напруження не перевищує значення допустимого напруження, що становить:

$$\sigma_u = \frac{\sigma_{u-1}}{n \cdot K_\sigma} K_p = \frac{3,14 \cdot 10^8}{2 \cdot 2,2} 1,5 = 1,07 \cdot 10^8 \text{ Па},$$

де σ_{u-1} —границя виносливості, $\sigma_{u-1}=3,14 \cdot 10^8 \text{ Па}$;

n —запас міцності, $n=2$;

K_σ —коефіцієнт концентрації напружень, $K_\sigma=2,2$;

K_p —коефіцієнт режиму навантаження валу, $K_p=1,5$.

Кінцевий вигляд розрахованого вала показано на рисунку 3.5.

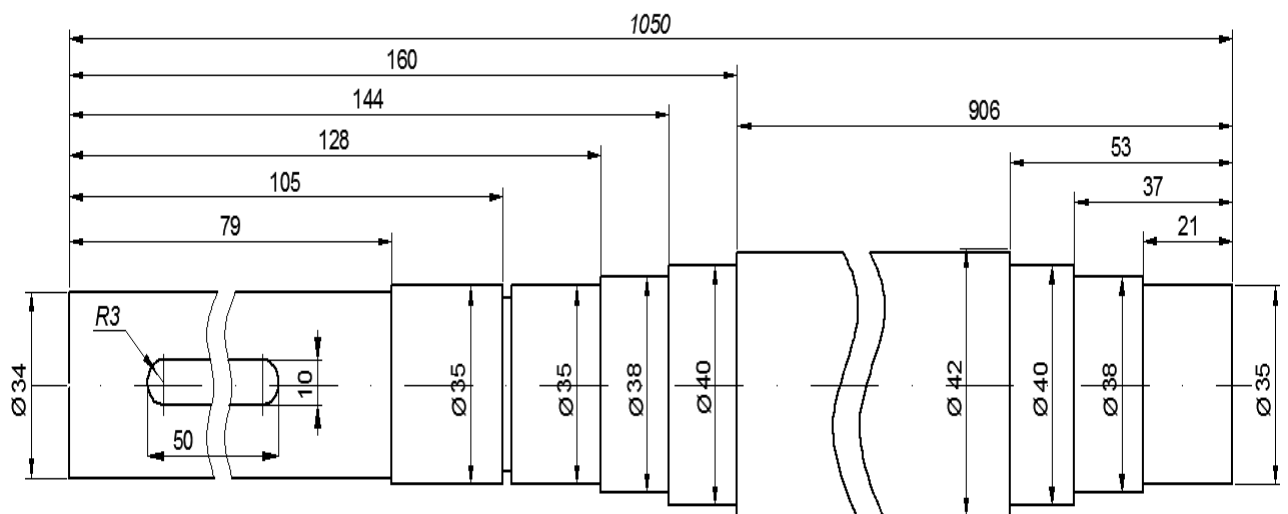


Рисунок 3.5. Вал вузла навантаження

3.2.2. Розрахунок муфти

Фрикційні муфти передають крутний момент за рахунок тертя, що виникає в зоні контакту між їх робочими елементами. Величину тертя можна регулювати шляхом зміни сили притиснення поверхонь, які взаємодіють, тому такі муфти забезпечують плавне з'єднання при будь-якій швидкості обертання, що широко застосовується, зокрема, в автомобільних зчепленнях. Крім того, фрикційна муфта не здатна передавати момент, що перевищує граничний момент тертя, оскільки при цьому відбувається ковзання між фрикційними деталями, що робить її ефективним захистом обладнання від перевантажень динамічного характеру.

Відповідно до заданих параметрів вибирається втулково-пальцева муфта, яку підбирають з урахуванням діаметрів валів, що з'єднуються. Півмуфти виготовляють зі сталі 35, пальці — з нормалізованої сталі 45, а втулки — зі спеціальної гуми, для якої встановлено допустиму напругу зминання.

Перевірку втулок здійснюють за умовою напруження зминання на поверхнях, що контактують із пальцями.

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{2T}{D_1 \cdot Z \cdot d_n \cdot \ell_B} \leq [\sigma]_{\text{см}},$$

Де ℓ_B - довжина втулки муфти, $\ell_B = 110$ мм ;

d_n - діаметр пальців, $d_n = 18$ мм ;

Z - к-ть пальців муфти, $Z = 6$ мм ;

D_1 - діаметр кола розміщення пальців у муфті;

T – розрахунковий момент.

Розрахунковий момент:

$$T = K_p \cdot T_1,$$

де K_p - коефіцієнт режиму роботи, $K_p = 1,25$;

T_1 - номінальний момент, $T_1 = 105$ Н · м

Отримаємо:

$$T = 1,25 \cdot 105 = 131$$

Визначаємо розміщення пальців становитиме:

$$D_1 = (0,7 \div 0,8) \cdot D,$$

де D – зовнішній діаметр муфти, $D = 170$ мм.

$$D_1 = (0,7 \div 0,8) \cdot 170 = 119 \div 136 \text{ мм, прийmemo } D_1 = 120 \text{ мм.}$$

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{2 \cdot 1,25 \cdot 105 \cdot 10^3}{120 \cdot 6 \cdot 18 \cdot 110} = 1,3 \leq [\sigma]_{\text{см}}.$$

Перевірка пальців на згин:

$$\sigma_{\text{виг}} = \frac{10T_3 \cdot \ell_p}{D_1 \cdot Z \cdot d_n^3} \leq [\sigma]_{\text{виг}},$$

$$\sigma_{\text{виг}} = \frac{10 \cdot 105 \cdot 10^3 \cdot 42}{120 \cdot 6 \cdot 18^3} = 1.5 \text{ МПа.}$$

Допустиме напруження на згин:

$$[\sigma]_{\text{виг}} = 0,25 \cdot \sigma_T,$$

де σ_T – текучість для сталі 35.

$$[\sigma]_{\text{виг}} = 0,25 \cdot 220 = 55 \text{ МПа.}$$

Отримали, що $\sigma_{\text{виг}} < [\sigma]_{\text{виг}}$, тому можна вважати, що умова міцності для пальців муфти виконана.

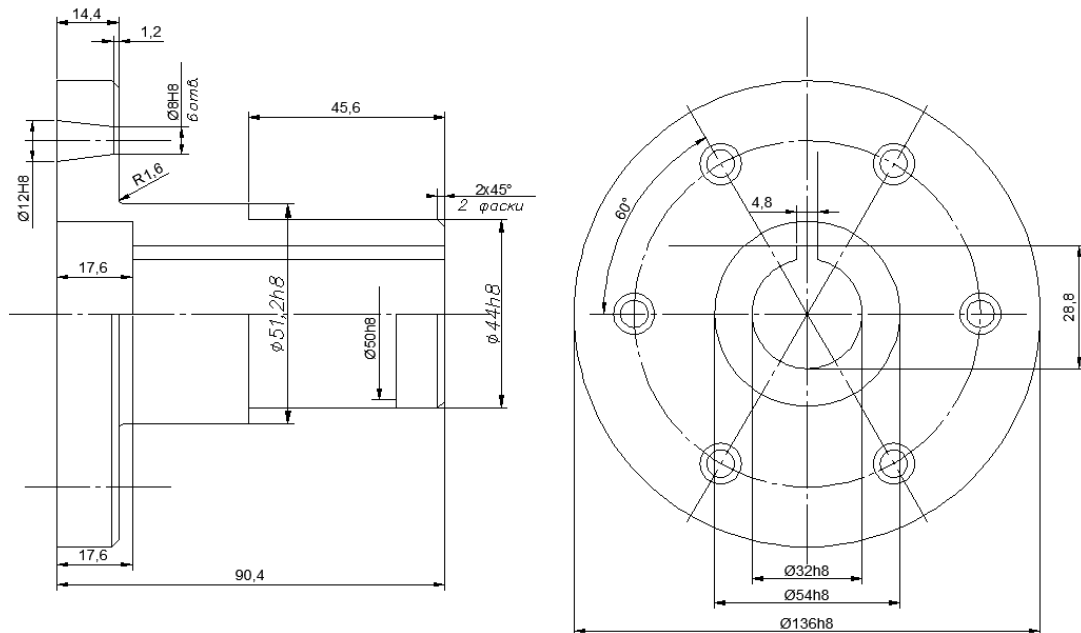


Рисунок 3.6. Муфта вузла завантаження

3.2.3. Підбір підшипників

Вихідні дані для підбору підшипників наступні. Радіальне навантаження $F_p = 1,8 \cdot 10^4 \text{ Н}$. Діаметр валу у місці посадки підшипників становить 0,035 м. Кутова швидкість обертання валу $\omega = 0,2 \text{ с}^{-1}$.

Оскільки навантаження на підшипник є рівномірним і не супроводжується ударами чи різкими змінами, обираємо однорядні радіальні кулькові підшипники.

коефіцієнт безпечності навантаження на підшипник $K_\sigma = 1,1$;

коефіцієнт температурного розширення $K_T = 1,0$;

ресурс підшипника $L_n = 1,5 \cdot 10^5 \text{ год}$.

Динамічну вантажопідйомність розрахуємо за формулою, при значенні коефіцієнту осьового навантаження $x = 1$, так як осьова сила у даному випадку рівна нулю. Для роликового типу підшипника $\alpha = 3$.

Отримаємо:

$$C_{тр} = (XVF_p + YF_a)K_\sigma \cdot K_T(6 \cdot 10^5 \cdot n \cdot L_n)^{0,33} = \\ = (1 \cdot 1 \cdot 1,8 \cdot 10^4 + 0)1,1 \cdot 1(6 \cdot 10^5 \cdot 1,5 \cdot 10^5)^{0,33} = 9,92 \cdot 10^4 \text{ Н},$$

Відповідно до отриманих даних обираємо шариковий підшипник 6307 N. Параметри підбраного підшипника представлено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2. Параметри підбраного підшипника

Марка підшипника	Внутрішній діаметр d, мм	Зовнішній діаметр D, мм	Ширина B, мм
6307 N	35	80	21

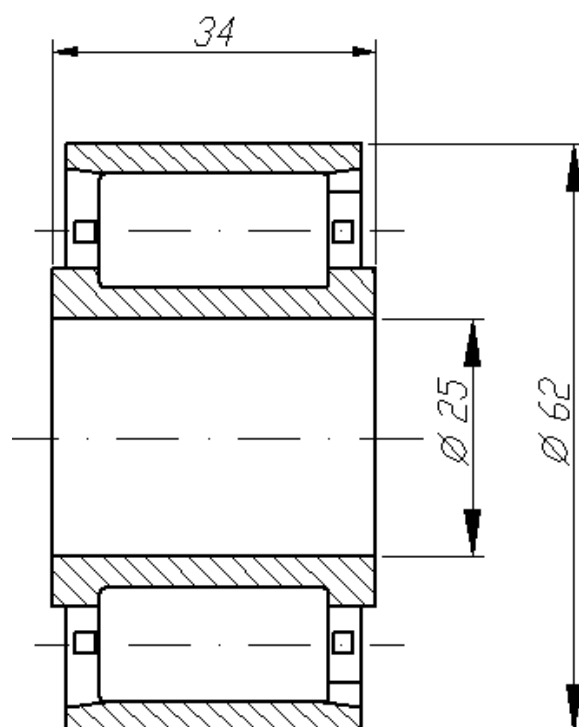


Рисунок 3.7. Підшипник 6307 N

4. Дослідження гідродинамічних властивостей псевдокиплячого шару казеїну у процесі сушіння

4.1. Методики досліджень

4.1.1 Методика дослідження гідродинаміки псевдокиплячого шару казеїну

З метою дослідження гідродинамічних характеристик псевдокиплячого шару казеїну використовували дослідну установку, яку показано на рисунку 4.1.

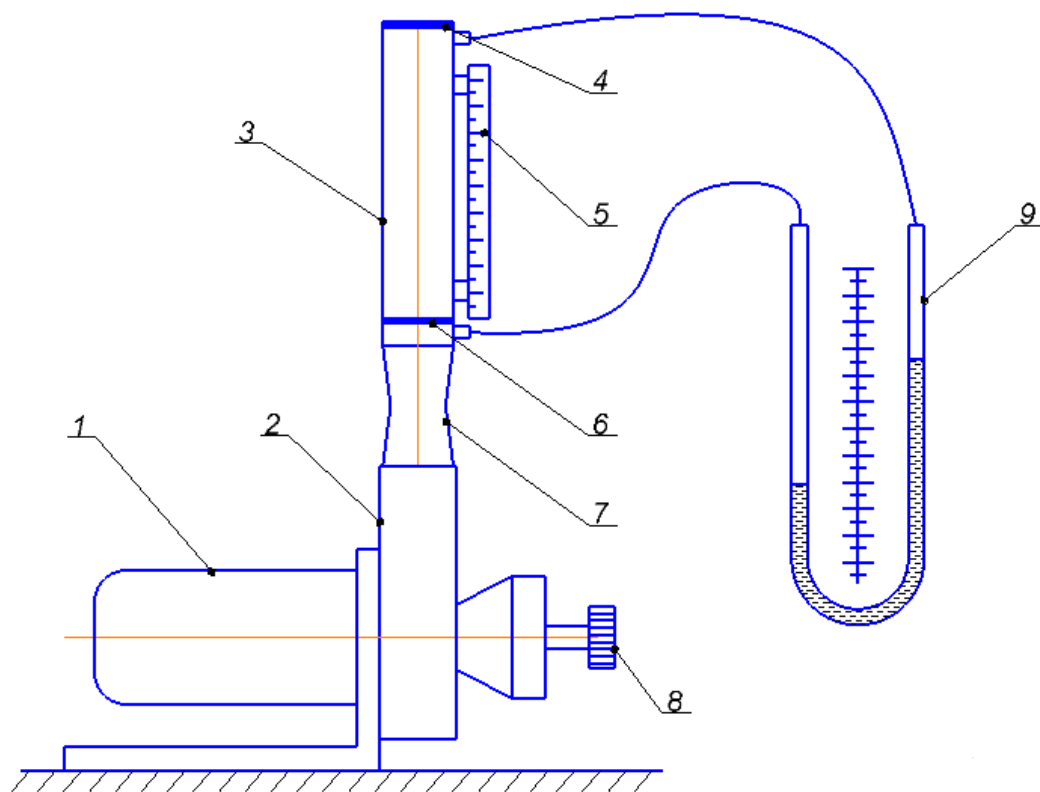


Рисунок 4.1. Схема дослідної установки

- 1 – електродвигун; 2 – відцентровий вентилятор; 3 – прозора труба;
4, 6 – решітки; 5 – мірна шкала; 7 – труба Вентурі; 8 – заслінка;
9 – дифманометр

Основним елементом установки є вентилятор 2, оснащений електродвигуном постійного струму 1, який забезпечує подачу повітря у скляну трубу 3 з внутрішнім діаметром 56 мм. У середині труби встановлено решітки 4 та 6 з розміром отворів 1,0 мм і коефіцієнтом живого перерізу 25 %, на яких розміщується шар зернистого матеріалу. До складу трубопроводу входить також

труба Вентурі 7. Для вимірювання перепаду тиску над та під решіткою застосовувався диференційний манометр 9. Регулювання витрати повітря, що подається вентилятором, здійснювалося за допомогою кільцевогошибера 8.

Перед початком експерименту казеїн завантажували в трубу на решітку 6. Після повного закриттяшибера вмикали вентилятор, фіксували покази диференційного манометра та визначали висоту шару матеріалу на решітці за шкалою 5. Подальше збільшення подачі повітря здійснювали шляхом плавного відкриванняшибера, при цьому через задані інтервали реєстрували значення перепаду тиску та висоту шару. У момент руйнування нерухомого шару фіксували відповідні покази приладів. Подальшим підвищенням витрати повітря досягали руйнування псевдокипачого шару та початку виносу частинок повітряним потоком, що також супроводжувалося реєстрацією показів дифманометра і висоти шару. Вимірювання перепаду тиску та висоти шару виконували щонайменше три рази до настання псевдозрідження і не менше трьох разів до моменту початку виносу частинок.

Обробку експериментальних даних проводили у такій послідовності.

Визначали з наступного виразу середню швидкість повітряного потоку в трубопроводі:

$$w = (d_0 / d_1 \cdot \sqrt{(2 \cdot g \cdot h \cdot \rho_p / \rho) / (1 - (d_0 / d_1)^4)})^4$$

де d_0, d_1 – відповідні діаметри труби Вентурі (рис. 4), м;

h - різниця рівнів води в диференційному манометрі, що під'єднаний до труби Вентурі, м;

ρ_p - густина води в диференційному манометрі, кг/м³;

ρ - густина повітря, кг/м³.

При протіканні газу крізь дисперні шари дану швидкість називають фіктивною (такою, що ділиться на переріз трубопроводу). Її позначають w_0 .

Із вказаного виразу визначають експериментальні значення швидкостей псевдозрідження $w_{0,nc}^e$ та витання $w_{0,cv}^e$ за відомих значень h .

Теоретична швидкість процесу псевдозрідження $w_{0,nc}$ для часток округлої форми, що є близькою до сферичної, визначають із виразу для критичного значення модифікованого числа Рейнольдса $Re_{0,nc}$, який є характерним для початку процесу псевдокипіння:

$$Re_{0,nc} = w_{0,nc} \cdot d \cdot \rho / \mu$$

Таким чином:

$$w_{0,nc} = Re_{0,nc} \cdot \mu / d \cdot \rho$$

де d - діаметр частинки казеїну, м;

μ - коефіцієнт дин.в'язкості повітря, Па·с.

Значення числа $Re_{0,nc}$ знаходять так:

$$Re_{0,nc} = Ar / (1400 + 5/22 \cdot \sqrt{Ar}),$$

де Ar - критерій Архімеда:

$$Ar = (d^3 \cdot \rho^2 \cdot g / \mu^2) \cdot (\rho_T - \rho) / \rho$$

де ρ_T - густина частинок казеїну, кг/м³.

Визначення швидкості процесу витання частинок казеїну $w_{0,cb}$, яка супроводжується руйнуванням шару казеїну та масовим винесенням частинок, здійснюється аналогічно як при розрахунку швидкості вільного осадження частинок w_{oc} , наприклад із використанням формули:

$$Re_{0,cb} = Ar / (18 + 0.575 / \sqrt{Ar})$$

Після визначення числа Рейнольдса $Re_{0,cb}$ визначимо значення швидкості $w_{0,cb}$:

$$w_{0,cb} = Re_{0,cb} \cdot \mu / d \cdot \rho$$

Залежність висоти шару казеїну H від значення фіктивної швидкості потоку повітря w_0 будували на основі визначення швидкості w_0 для декількох положень заслінки та замірів у ці моменти часу висоти шару частинок казеїну H .

Порозність псевдокип'ячого шару ϵ_{nc} :

$$H_{\text{пс}}(1-\varepsilon_{\text{пс}}) = H_{\text{н}}(1-\varepsilon_{\text{н}})$$

де $H_{\text{пс}}$ - висота псевдокипячого шару казеїну, м;

$H_{\text{н}}$ - висота нерухомого шару казеїну, м;

$\varepsilon_{\text{н}}$ - порозність нерухомого шару казеїну.

$$\varepsilon_{\text{пс}} = [(18\text{Re}_0 + 36 \text{Re}_0^2)/\text{Ar}]^{0.21}$$

для відповідних значень Re_0 .

4.1.2. Методика дослідження гранулометричного складу зерен казеїну

Найбільш уживаними способами визначення гранулометричного складу дисперсних матеріалів є ситовий аналіз, седиментометричний аналіз у рідкому середовищі з відбором вагових проб, а також метод відцентрової сепарації в повітряному середовищі.

У даному дослідженні гранулометричний склад визначали методом ситового аналізу. Для цього застосовували набір із дев'яти сит з діаметрами отворів D : 1,5; 2,5; 3,5; 4,5; 5,5; 6,5; 7,5; 8,5 та 9,5 мм. Дослідну пробу розміщували на ситі з найбільшими отворами, після чого матеріал, що пройшов крізь нього (прохід), послідовно просіювали через сита з меншими розмірами отворів аж до найдрібнішого.

Масову частку кожної фракції казеїну визначали так:

$$g_i = \frac{G_i}{\sum_{i=1}^n G_i} = \frac{G_i}{G_{\text{пр}}},$$

де n – число фракцій;

G_i – маса казеїну в конкретній фракції;

$\sum_{i=1}^n G_i = G_{\text{пр}}$ - сумарна маса казеїну.

Середньоарифметичний розмір кожної фракції визначали як:

$$d_i = \frac{D_i + D_{i+1}}{2}.$$

З огляду на те, що розмір зерен змінюється в процесі сушіння, визначення гранулометричного складу здійснювали у трьох контрольних зонах: на вході до сушарки, у її центральній частині та на виході із сушарки.

4.2. Результати дослідження гідродинамічних властивостей псевдокиплячого шару казеїну у процесі сушіння

Гідродинамічні характеристики киплячого шару значною мірою визначаються властивостями твердого сипучого матеріалу, зокрема його дисперсністю, розмірами та формою частинок, гранулометричним складом, густиною і внутрішньою структурою. Результати проведених досліджень свідчать про те, що в процесі сушіння в установці з псевдозрідженим шаром гранулометричний склад частинок казеїну зазнає змін. Зокрема, одразу після завантаження матеріалу в установку найбільша масова частка припадає на фракцію із середнім еквівалентним діаметром частинок 7 мм (рис. 4.2).



Рисунок 4.2. Масові частки фракцій казеїну на вході у сушарку

У результаті отримали функцію, що описує гранулометричний склад частинок казеїну на вході у сушарку:

$$g = -d_e^2 + 15d_e - 31$$

де g – масова частка, %;

d_e – середній еквівалентний діаметр казеїну, мм.

У процесі сушіння казеїну спостерігається зміна розмірів його частинок. За тривалості сушіння 5 хв найбільша масова частка казеїну дорівнює 25 % і характеризується діаметром 6, мм (рис. 4.3).



Рисунок 4.3. Частки фракцій казеїну на 5 хв процесу сушіння

Рівняння, яка описує залежність масових часток фракцій частинок казеїну від середнього еквівалентного діаметру цих частинок на 5 хв процесу сушіння, наступні:

$$g = -d_e^2 + 15d_e - 28$$

Після процесу сушіння найбільша маса казеїну міститься у частинках, розмір яких від 4 до 7 мм (рис 4.4).

Оцінку гранулометричного складу казеїну після процесу сушіння можна здійснювати за допомогою отриманого рівняння:

$$g = -d_e^2 + 15d_e - 25$$

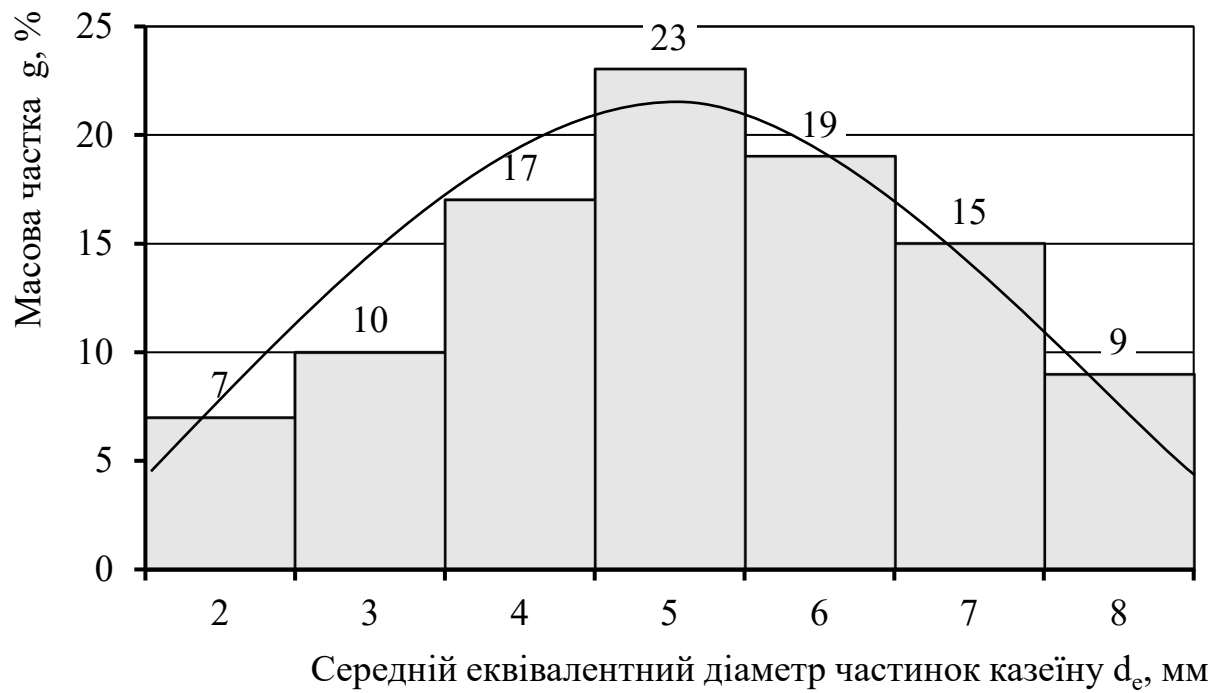


Рисунок 4.4. Частки фракцій казеїну після сушіння

Інтенсивна зміна розмірів казеїну відбувається на початку сушіння (рис. 4.5)

Зміну гранулометричного складу казеїну на різних етапах процесу сушіння описує наступне рівняння:

$$g = -d_e^2 + 15d_e - c;$$

де c – коеф., який залежить від етапу сушіння (для початку процесу $c = 31$, в середини $c = 28$, завершення $c = 25$).

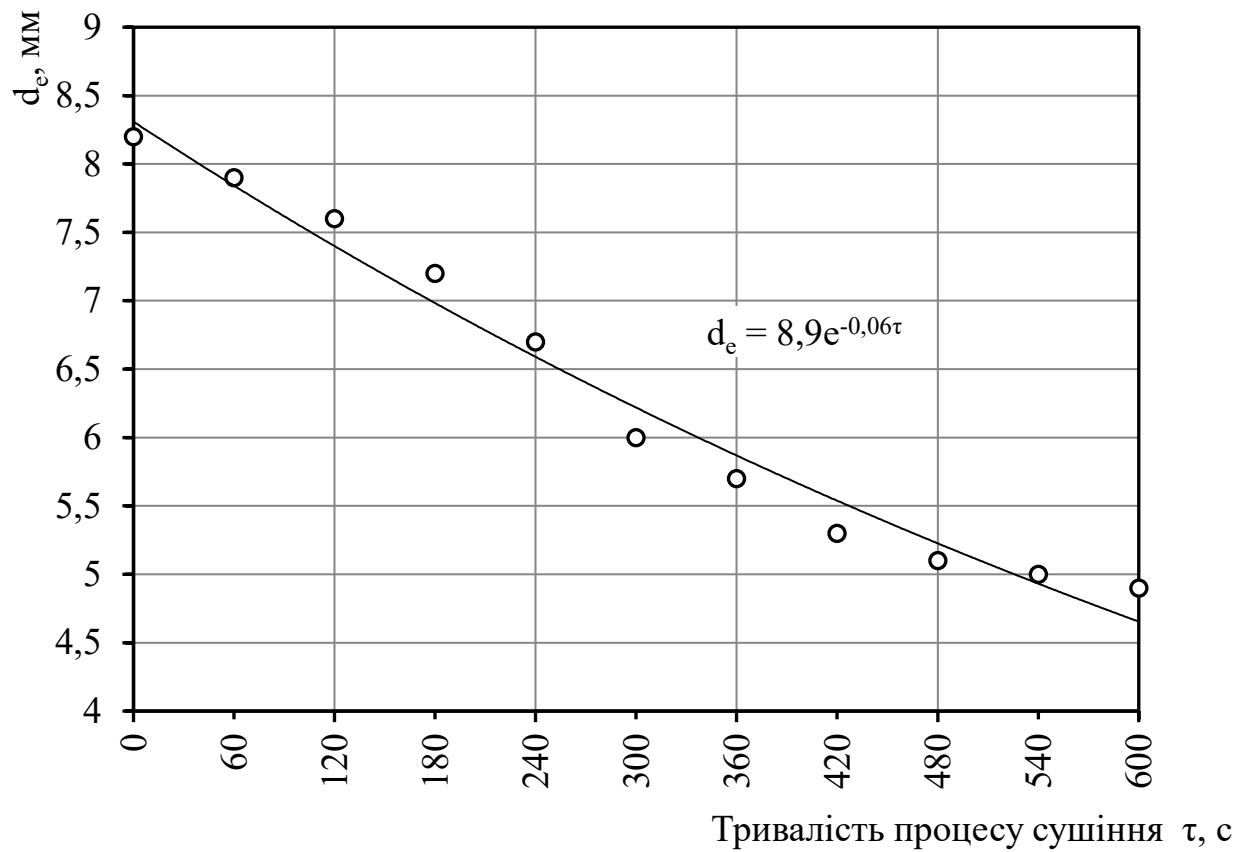


Рисунок 4.5. Зміна розмірів частинок казеїну в процесі сушіння

Зменшення лінійних параметрів частинок зумовлюється як поступовим зниженням їх вологості з 80 % на початковій стадії процесу до 12 % на його завершальному етапі (рис. 4.6), так і механічним дробленням більших агрегатів під дією гідродинамічних сил у киплячому шарі.

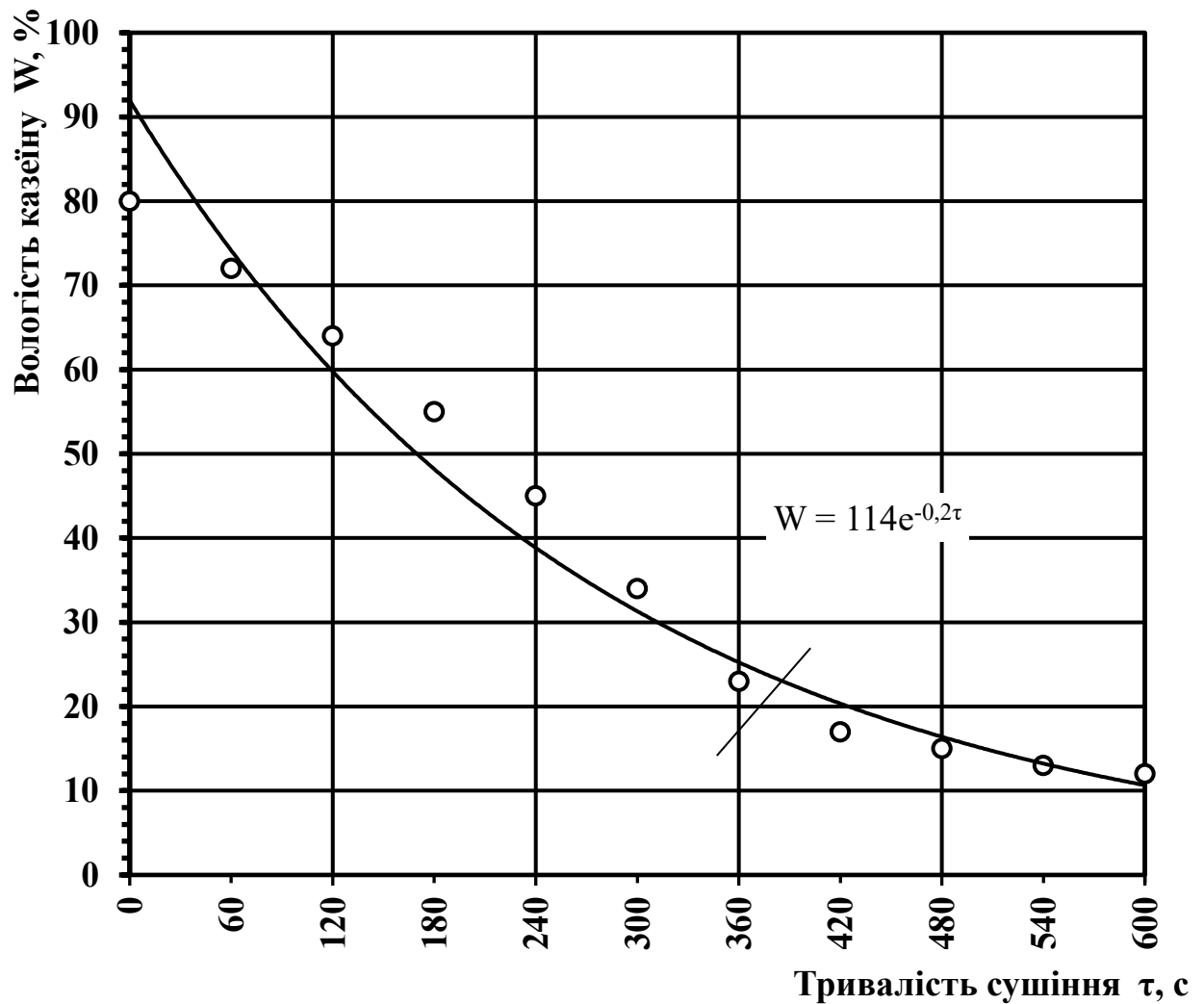


Рисунок 4.6. Зміна вологості казеїну впродовж його

Залежності, які характеризують еволюцію геометричних параметрів частинок казеїну та зміну вмісту води в них, мають експоненційну форму і можуть бути подані такими аналітичними співвідношеннями відповідно:

$$d_e = 8,9e^{-0,06\tau};$$

$$W = 114e^{-0,2\tau}$$

При проходженні газу або рідини через шар зернистого матеріалу відзначають три основних стани шару:

щільний шар, частинки якого майже не змінюють відносно положення, відстань між частинками та об'єм шару лишають незмінними;

зважений шар, окремим випадком якого є псевдозріджений (киплячий) шар, частинки знаходяться в русі, а відстань між ними і об'єм шару залежать від швидкості газового потоку;

пневмотранспорт, відбувається при підвищених швидкостях.

На рисунку 4.7. представлено отриману дослідним шляхом криву псевдозрідження казеїну.

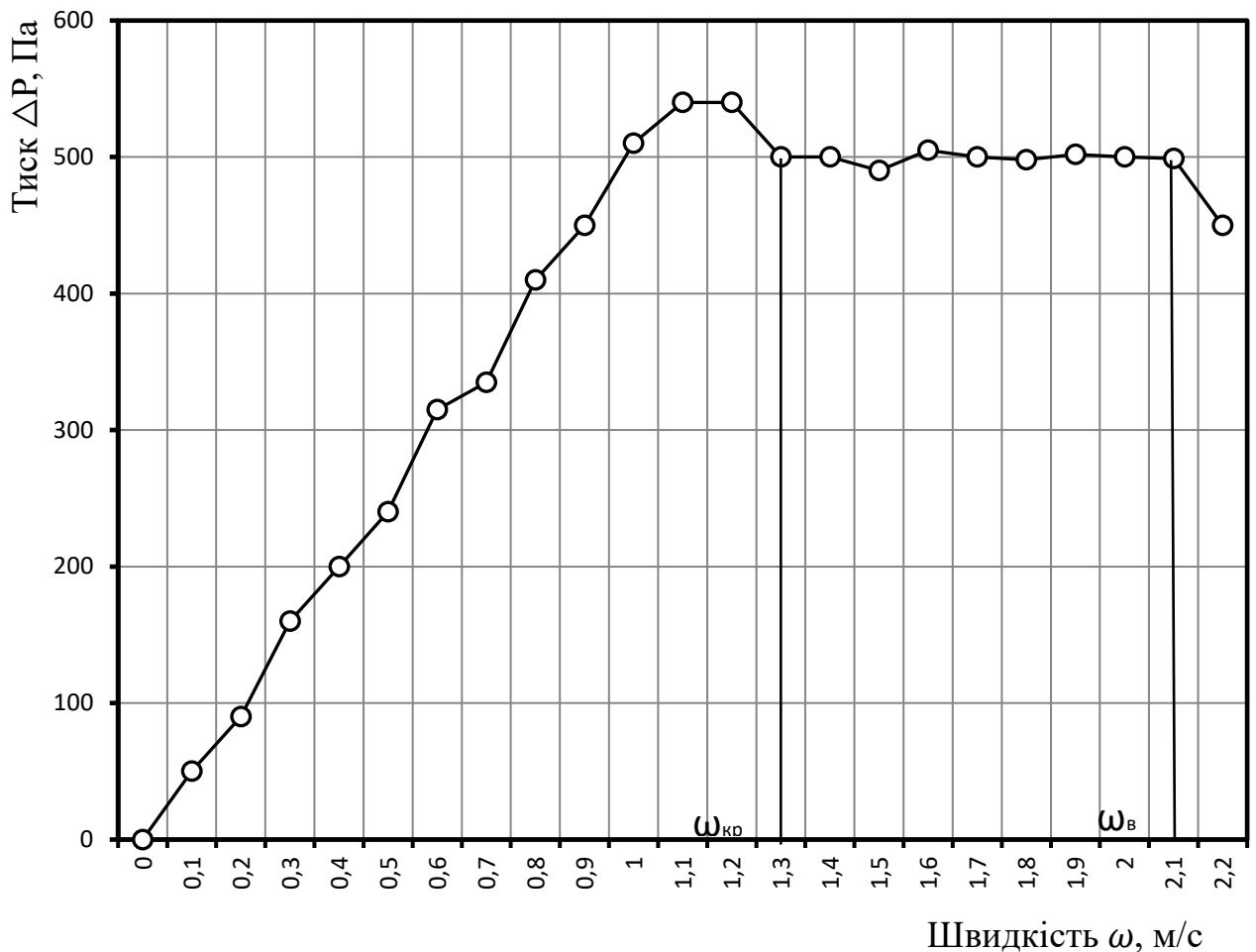


Рисунок 4.7. Крива псевдозрідження шару казеїну

Аналіз наведеної залежності свідчить, що граничне значення швидкості, за якого для казеїну настає режим псевдозрідження, дорівнює 1,35 м/с. У діапазоні швидкостей від 0 до 1,35 м/с має місце проходження повітряного потоку крізь нерухомо сформований шар частинок казеїну. За подальшого зростання швидкості — в інтервалі 1,35–2,15 м/с — матеріал переходить у стан псевдозрідження. Досягнення швидкості 2,15 м/с супроводжується початком винесення частинок газовим потоком.

Гідродинамічний аналіз псевдокиплячого шару, який розглядається як дисперсна система з двох фаз, базується на фундаментальних законах механіки, а також на співвідношеннях збереження імпульсу та енергії. Переміщення газового середовища крізь шар зернистої речовини належить до класу змішаних задач гідродинаміки.

Умовою переходу матеріалу в псевдокиплячий шар є функція:

$$\Delta P = \frac{mg}{S},$$

Отже, перепад тиску ΔP визначається повною вагою матеріалу шару, приведеною до площі його поперечного перерізу S , і не залежить від значення швидкості потоку. Вказана закономірність наочно простежується на експериментально побудованій кривій псевдозрідження шару казеїну (рис. 4.6).

Під час математичного опису гідродинамічних процесів у зрідженому шарі зазвичай виділяють два основні підходи. Перший підхід передбачає виведення співвідношень, що характеризують поведінку шару, на основі умов силової рівноваги, прикладених до окремої твердої частинки. Другий підхід ґрунтується на використанні рівнянь руху потоку крізь фіксований зернистий шар (рівняння фільтрації) у поєднанні з залежностями, які описують гідравлічний опір зрідженого середовища.

Умова рівноваги частинок:

$$mg - \frac{mg}{\rho_T}(\rho_T - \rho_d) = F,$$

де F - опір середовища.

Для сферичних частинок справедливе рівняння:

$$F = \xi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_T \omega^2}{2},$$

де ξ - коефіцієнт опору.

Формула для визначення швидкості:

$$W = \sqrt{\frac{\pi d}{6} \cdot \frac{g(\rho_T - \rho_\partial)}{\psi \rho_T}},$$

Оскільки величина коефіцієнта опору визначається числом Рейнольдса Re , розв'язання задачі потребує застосування методу послідовних наближень.

У рамках першого підходу були отримані теоретико-експериментальні залежності для визначення оптимальної швидкості газового потоку, яка забезпечує ефективне формування інтенсивного псевдозрідженого шару, і представлена відповідною формулою.

$$Re_{opt} = 0,19 Ki^{1.56},$$

де Ki - число Кірпичова

$$Ki = d \sqrt[3]{\frac{4}{3} \cdot \frac{(\rho_T - \rho_\partial)}{\nu \rho_\partial}} = \sqrt[3]{\frac{4}{3} A_\partial}$$

Другий напрям опирається на рівняння фільтрування:

$$\Delta P = \lambda \frac{h}{d_k} \cdot \frac{W_k^2 \rho}{2}$$

де λ - коефіцієнт тертя;

h - висота каналу уматеріалі;

d - діаметр каналу;

W_k – швидкість руху середовища в каналі.

Маса шару частинок казеїну, що відповідає одиниці площі поверхні решітки:

$$\Delta P = h_0 (1 - \varepsilon_0) \rho_T g$$

Отримаємо значення критичної швидкості повітря:

$$W_{кр} = \sqrt{\frac{2 d \rho_n \varepsilon_0^3 g}{f \cdot \lambda \rho_\partial (1 - \varepsilon_0)}}$$

Коефіцієнт тертя, залежить від числа Рейнольда та від режиму руху

поток. Ламінарний режим має місце значенні $Re \leq 35$, турбулентний $Re \geq 70$.

Перхідний режим: $Re = 35-70$.

$$Re_{kp} = \frac{A_r}{150 \cdot \frac{1 - \varepsilon_{kp}}{\varepsilon_{kp}^3} + \left(\frac{1.75}{\varepsilon_{kp}^3} A_r \right)^{0.5}}$$

На величину розрахункової швидкості псевдозрідження істотно впливає порізність матеріалу в процесі псевдозрідження, хоча вона перевищує порізність нерухомого шару лише приблизно на 10 %.

Для оцінки швидкості W_{kr} , що відповідає псевдозрідженню несферичних частинок казеїну, можуть бути застосовані наближені співвідношення:

$$\frac{f}{\varepsilon_{kp}^3} \approx 14 \quad \text{та} \quad \frac{f^2 (1 - \varepsilon_{kp})}{\varepsilon_{kp}^3} \approx 11$$

де f – коефіцієнт форми частинки.

У випадках, коли відбувається псевдозрідження матеріалу з частинками, що мають між собою зчеплення, спостерігається різке зростання перепаду тиску. Для звичайних сипких речовин це збільшення зазвичай не перевищує 1,5–5 %.

В апаратах зі змінним перерізом по висоті величина ΔP^* може перевищувати тиск ΔP у стані псевдозрідження у 2–3 рази, що іноді призводить до формування фонтануючого шару.

Початок псевдозрідження полідисперсного матеріалу характеризується поступовим переходом від режиму фільтрації до псевдозрідженого стану, що зумовлено різними критичними швидкостями для частинок різного розміру. У апаратах із змінним по висоті перерізом швидкість псевдозрідження досягається в різних перерізах не одночасно. Під швидкістю псевдозрідження розуміють таку її величину, за якої частинки зріджуються по всьому об'єму апарату.

Огляд літературних джерел показує, що перехід матеріалу до псевдозрідженого стану не має чітко визначеної межі. На цей процес впливають неправильна форма частинок, неоднорідність вологості, полідисперсність та

інші фактори. Верхня межа існування псевдокиплячого шару визначається початком винесення матеріалу з апарату.

Сучасні підходи до опису цієї межі ґрунтуються на понятті швидкості винесення частинок. Для розрахунку швидкості руху газу можуть застосовуватися залежності, запропоновані Тодесом.

$$\begin{aligned} \text{Re} &= A_r / 18 ; L_y = 1.71 \cdot 10^{-4} A_r^2 \text{ при } 0 \leq A_r \leq 36 \\ \text{Re} &= 0.153 A_r^{0.714} ; L_y = 0.00357 A_r^{1.14} \quad 36 < A_r \leq 8.33 \cdot 10^4 \\ \text{Re} &= 1.74 \sqrt{A_r} ; L_y = 5.28 \sqrt{A_r} \text{ при } A_r > 8.25 \cdot 10^4 \end{aligned}$$

Критерії Re та A_r застосовуються для визначення швидкості винесення W, тоді як критерії A_r і L_y дозволяють оцінити розмір частинок, що піддаються винесенню при заданій швидкості газового потоку. Через нерівномірний розподіл швидкості по перерізу апарату та вплив бульбашок газу винесення частинок може починатися при швидкостях, менших за ті, що обчислені за аналітичними формулами.

Раніше наведені співвідношення дозволяють оцінити кількість матеріалу, який залишає апарат разом із газовою фазою. Припускаючи, що частинки здатні подолати висоту надшарового простору зі своєю початковою швидкістю винесення, можна визначити частку частинок, що піддається винесенню.

$$Q_b = \sum_{i=1}^n q_{bi}$$

де q_{bi} - вміст фракції у суміші.

Вказані співвідношення можна застосовувати за умови відомого розподілу початкових швидкостей виходу частинок та гранулометричного складу матеріалу.

4.3 Висновки до розділу

Досліджено гідродинамічні властивості псевдокиплячого шару казеїну у процесі його сушіння.

Встановили, що зміну гранулометричного складу казеїну у процесі його сушіння можна визначити із отриманого виразу:

$$g = -d_e^2 + 15d_e - c;$$

де g – частка фракції, %;

d_e – середній діаметр зерен казеїну, мм;

c – коефіцієнт етапу сушіння.

Отримано рівняння, які відображають зміну розмірів частинок казеїну та їх вологості у процесі сушіння, відповідно:

$$d_e = 8,9e^{-0,06\tau};$$

$$W = 114e^{-0,2\tau}.$$

5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

5.1. Охорона праці

5.1.1. Основні причини травматизму в харчовій галузі та його динаміка

Харчова промисловість України характеризується широкою різноманітністю умов виробництва і праці у зв'язку з чим характер травм і професійних захворювань на різних підприємствах неоднаковий. За період з 2005 по 2015 травми отримали понад 10 тис. працівників галузі, з яких близько 600 – із летальними наслідками.

До найбільш травмонебезпечних виробництв харчової галузі відносяться хлібопекарські та цукрові заводи, на яких стається більше 50% травм із смертельними наслідками. За даними Державного комітету статистики на підприємствах харчової промисловості біля 14% нещасних випадків обумовлено технічними причинами, до 35% організаційно-технічними і більше 50% – організаційними.

В свою чергу до основних організаційних причин нещасних випадків відносяться: незадовільна організація, відсутність нагляду за проведенням робіт, незадовільне утримання і недоліки в організації робочих місць, допуск до роботи ненавчених або не проінструктованих працівників, невикористання засобів індивідуального захисту у зв'язку з їх відсутності або невідповідності умов праці, порушення трудової та виробничої дисципліни, експлуатація несправного технологічного обладнання, порушення правил руху внутрішньо цехового або внутрішньо заводського транспорту, недостатня оперативність надходження даних, відсутність комплексної системи обліку, аналізу та прогнозування випадків травматизму.

Наведені дані свідчать, що значна частина нещасних випадків є наслідком недбалого ставлення до вимог охорони праці як самих працівників, так і керівників різних рівнів.

В цьому контексті представляють інтерес дані українських дослідників, відповідно до яких, серед осіб які допустили порушення законодавства про охорону праці на підприємствах харчової галузі, що привело до нещасного випадку, 52% складають керівники.

За таких обставин досягти належного рівня безпеки праці можливо лише при умові, що кожен учасник трудового процесу усвідомить важливість виконання вимог охорони праці.

В продовж останніх десятиліть спостерігається поступове зниження кількості нещасних випадків як в промисловості України загалом так і в харчовій галузі зокрема (рис. 5.1).

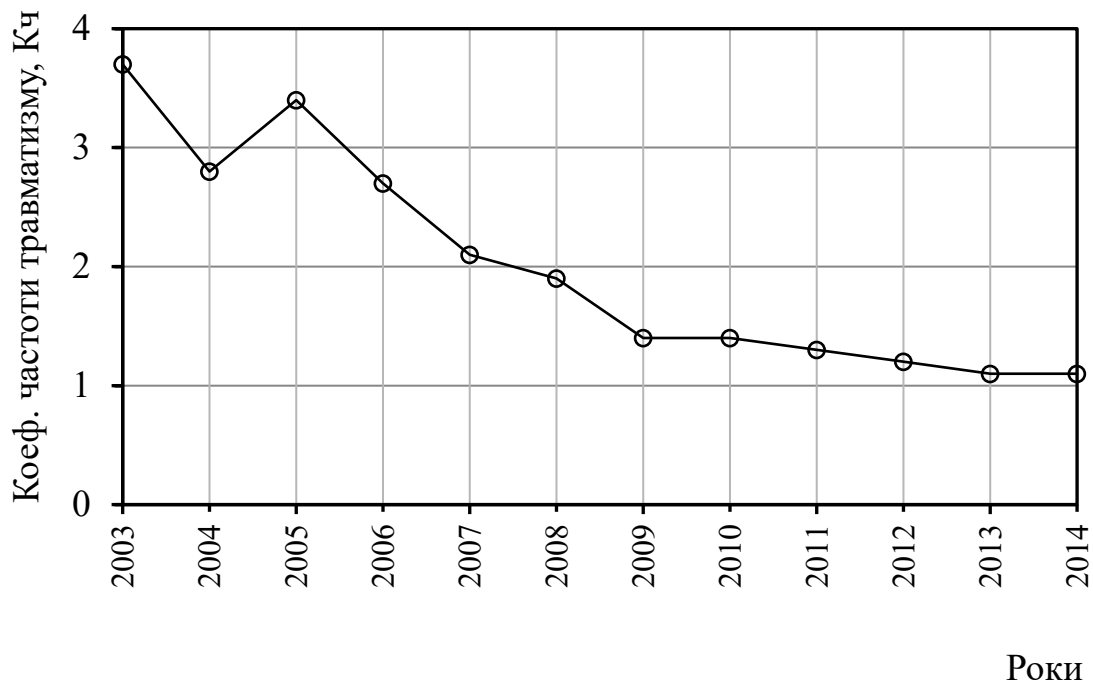


Рис. 5.1. Динаміка коефіцієнта частоти травматизму в харчовій галузі

Проте одночасно із даним зниженням кількості нещасних випадків спостерігається поступове зростання тяжкості травматизму (рис. 5.2) – збільшується кількість людино-днів непрацездатності з розрахунку на 1000 працівників.

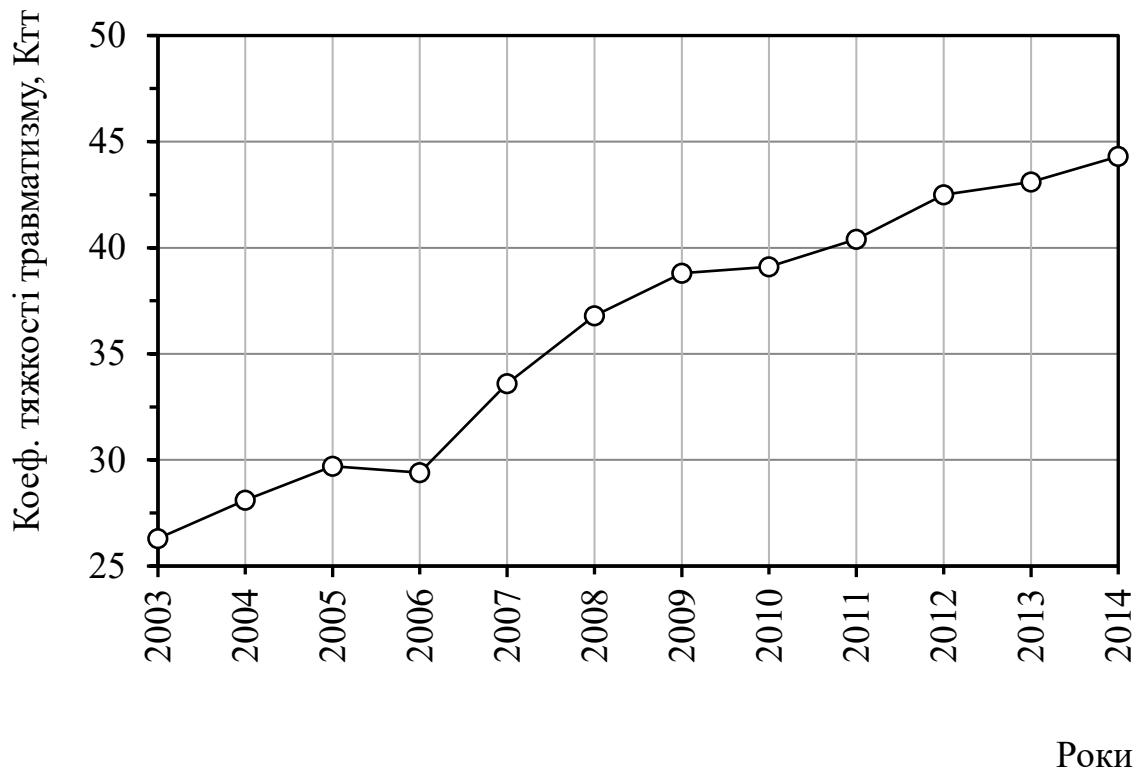


Рис. 5.2. Динаміка коефіцієнту тяжкості травматизму в харчовій галузі

Одним із основних напрямків покращення стану охорони праці є заміна застарілого обладнання, застосування сучасних та безпечних для працівників технологічних процесів.

5.1.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів підприємств харчової промисловості

Вплив шкідливих факторів на працюючих в певних умовах приводить до травми або іншого різкого погіршення здоров'я, а небезпечних до захворювання або зниження працездатності.

Фактори відрізняються не тільки кінцевими, несприятливими для людини результатами, що залежать від рівня виробничого фактора, але і тривалістю дії. Для небезпечного фактора характерна миттєва, а для шкідливого – довготривала дія, але в ряді випадків шкідливі наслідки, викликані короткотривалою дією шкідливого фактора розглядаються на рівні з травмами, розслідуються і обліковуються як небезпечні випадки на виробництві. До них відносяться: гострі

отруєння, теплові удари, обмороження а також ураження блискавкою на виробництві.

Вплив на людину шкідливого фактора може привести до травми, наприклад: одноманітна праця, через одноманітні операції настає втома, що приводить до зниження працездатності і уваги. Останнє в травмонебезпечних ситуаціях може привести до невчасно прийнятого правильного або прийняттю неправильного рішення і закінчитись травмою.

За природою дії шкідливі і небезпечні фактори поділяють на фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні.

Фізичні фактори:

- 1) рухомі машини і механізми, незахищені рухомі елементи обладнання, рухомі вироби, заготовки і матеріали;
- 2) підвищена або знижена температура поверхні обладнання, матеріалів повітря робочої зони;
- 3) вологість і рухомість повітря;
- 4) небезпечний рівень напруги в електричному ланцюзі;
- 5) підвищений рівень шуму, вібрації, інфрачервоного і ультразвуку;
- 6) підвищення або нестача природного освітлення, відсутність світла, недостатнє освітлення робочої зони, підвищена яскравість світла, блиск, підвищена пульсація світлового потоку;
- 7) гострі краї, шорсткості на поверхні обладнання, інструмента заготовок;
- 8) розміщення робочих місць на значній висоті від підлоги;
- 9) підвищений рівень УФ і ІЧ радіації;
- 10) електромагнітні випромінювання, статична електрика;
- 11) підвищена напруга електромагнітних полів;
- 12) підвищена або знижена іонізація повітря;
- 13) підвищений рівень іонізуючого випромінювання в робочій зоні;
- 14) підвищений або знижений барометричний тиску в робочій зоні і його різка зміна.

Для хлібопекарних, макаронних, кондитерських, цукрових, бродильних виробництв найбільш характерні шкідливі і небезпечні фактори 1-12. Наприклад: на хлібо заводах в багатьох випадках зовнішня поверхня печей перевищує температуру допустиму за санітарну норму 45°C , а температура газовідвідних каналів і труб через відсутність ізоляції становить $55-245^{\circ}$. В приміщеннях багатьох підприємств виділяється пара. Температура повітря в літній час в ряді випадків на робочому місці складає $30 - 38^{\circ}$. Печі є джерелом ІЧ радіації.

Хімічні фактори. Речовини, які проникають в організм людини через дихальні шляхи, шкіру чи травну систему можуть виявляти: загально токсичну; подразнюючу слизові носа, рота, очей; алергічну; мутагенну дію; впливати на репродуктивну функцію людини.

На виробництвах харчової промисловості фактори цієї групи мають достатньо широке розповсюдження при технічних процесах: видалення сірчаного газу, оксидів азоту з печей, диму і шкідливих речовин при підгорянні масла або продукції, CO_2 при обмороженні та інші.

Біологічні фактори. Поділяються на хвороботворні мікроорганізми і макроорганізми перші проникають в вигляді бактерій, вірусів, риккетсій, бактеріоподібні нерухомі організми що викликають інфекційні захворювання, спірохет, грибів і найпростіших.

Мікроорганізми поділяють на організми рослинного, і тваринного походження. Ці фактори зустрічаються в цукрових, хлібопекарських і бродильних виробництвах.

Психофізіологічні фактори. Поділяють на фізичні і нервово-психологічні перевантаження; перші включають статичні, динамічні, навантаження гіподинамію. М'язові статичні навантаження особливо погано впливають на працездатність. Вони поділяються на легкі (людина у вільній позі), середні (якщо вимушена поза складає 10-25% часу зміни), тяжкі (вимушена поза 50%) і дуже тяжкі $> 50\%$. Психоневрологічні перевантаження поділяють на розумове

перенапруження , перенапруження аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження.

5.2. Безпека в надзвичайних ситуаціях

5.2.1. Організація та проведення дослідження стійкості роботи підприємств харчової та переробної промисловості в умовах надзвичайних ситуацій

Під стійкістю роботи промислового підприємства розуміють здатність його у надзвичайних ситуаціях випускати продукцію в запланованому об'ємі та номенклатурі, а при отриманні пошкоджень, руйнувань або порушенні зв'язків по кооперації, відновлювати виробництво в мінімальні терміни. Це розуміння стійкості поширюється у тому числі на підприємства харчової та переробної промисловості.

Стійкість підприємств харчової промисловості в умовах НС є особливо важливою, оскільки забезпечення населення продуктами харчування має здійснюватися навіть після виникнення масштабних надзвичайних ситуацій. У той же час як сировина так і готова продукція харчових підприємств має властивість швидко псуватися, що значно ускладнює забезпечення стійкості, зокрема технологічної.

Дослідження стійкості роботи підприємства – це всебічне вивчення обстановки, яка може скластися під час надзвичайної ситуації та визначення її впливу на виробничу діяльність підприємства. Мета дослідження полягає в тому, щоб виявити слабкі місця в роботі об'єкта та виробити найбільш ефективні пропозиції, спрямовані на підвищення його стійкості.

Дослідження стійкості роботи підприємства проводиться силами інженерно-технічного персоналу із залученням спеціалістів науково-дослідних

та проектних організацій. Організатором та керівником досліджень є керівник підприємства.

Увесь процес планування і проведення досліджень поділяється на три етапи:

I етап — підготовчий;

II етап — оцінка стійкості роботи об'єкта;

III етап — розроблення заходів, які підвищують стійкість роботи підприємства в умовах надзвичайної ситуації.

На першому етапі розробляються керівні документи, які визначають склад учасників досліджень та організовується їх підготовка.

Основними документами для організації досліджень стійкості роботи об'єкта є: наказ керівника підприємства, щодо проведення дослідження; календарний план основних заходів з підготовки до проведення досліджень; план проведення досліджень.

Наказ керівника підприємства розробляється на підставі вказівок старшого начальника з урахуванням умов пов'язаних з виробничою діяльністю об'єкта. В наказі вказується: мета і завдання дослідження; терміни проведення робіт; склад учасників досліджень; склад і завдання дослідницьких груп; строки готовності облікової документації.

Календарний план основних заходів з підготовки до проведення досліджень визначає: основні заходи; терміни їх виконання; відповідних виконавців; сили та засоби, які залучаються для виконання завдань.

План проведення досліджень є основним документом, який визначає зміст роботи керівника дослідження і груп головних спеціалістів. В плані вказується: тема дослідження; мета дослідження; тривалість дослідження; склад дослідницьких груп та зміст їх роботи; порядок проведення дослідження. Термін дослідження встановлюється залежно від обсягу роботи та підготовки учасників і може тривати 2 – 3 місяці. Залежно від складу основних виробничо-технічних служб на об'єкті створюються дослідницькі групи. Їх кількість і чисельність залежить від обсягу вирішуваних завдань та специфіки виробництва.

На підготовчому етапі з керівниками груп проводиться спеціальне заняття, на якому керівник підприємства доводить до виконавців план роботи, завдання кожної групи та визначає терміни дослідження.

На другому етапі проводиться безпосереднє дослідження стійкості роботи об'єкта. В ході дослідження визначаються умови захисту робітників та службовців від уражаючих факторів, проводиться оцінка уразливості виробничого комплексу від різних уражаючих факторів, оцінюється характер можливих пошкоджень від вторинних уражаючих факторів, вивчається стійкість роботи системи забезпечення та кооперативних зв'язків з іншими об'єктами, з'ясовуються вразливі місця в системі управління, виробництвом.

Кожна група оцінює стійкість відповідних елементів виробничого комплексу та робить необхідні розрахунки.

Штаб Цивільної оборони ОГД в цей період оцінює загальний стан ІДО і визначає заходи для забезпечення захисту робітників і службовців. Для цієї роботи притягається ряд начальників служб, які виконують відповідні функції. Служба оповіщення і зв'язку вивчає і оцінює стійкість зв'язку з органами ЦО, виробничими підрозділами і формуваннями ЦО. Оцінює надійність системи зв'язку і оповіщення, повноту обладнання пунктів управління. Служба сховищ і укриттів оцінює інженерний захист робітників і службовців, правильність експлуатації сховищ і укриттів, готовність їх до використання за прямим призначенням. Розраховує час на оповіщення робітників і службовців, збір і укриття їх в захисних спорудах.

Служба радіаційного та хімічного захисту оцінює можливості роботи об'єкта в умовах радіації і дає пропозиції щодо захисту робітників і службовців від радіоактивного зараження, визначає типові режими радіаційного захисту людей, розробляє графік робочих змін для проведення РіНР. Аналізує забезпеченість робітників і службовців засобами індивідуального захисту, умови зберігання і порядок їх видачі. Готує пропозиції щодо організації і ведення радіаційної і хімічної розвідки, організації санітарної обробки людей, знезараження одягу, транспорту, техніки і споруд.

Медична служба розробляє заходи щодо організації медичного обслуговування робітників та службовців на об'єкті і в заміській зоні, а також при проведенні РіНР. Визначає сили і засоби для надання першої медичної допомоги потерпілим. Виробляє рекомендації з організації дозиметричного контролю при перебуванні людей у зоні радіоактивного зараження і рекомендації з захисту продуктів харчування і джерел водопостачання.

Служба охорони громадського порядку розробляє заходи з підсилення пропускового режиму, охороні матеріальних цінностей, забезпечення громадського порядку.

На третьому етапі підводяться підсумки проведених досліджень. Групи спеціалістів за підсумками досліджень готують підсумки і пропозиції з захисту робітників та службовців і підвищенню стійкості елементів виробництва, які досліджуються.

Група комплексних досліджень на основі доповідей інших груп складає загальний план, в якому визначаються: можливості щодо захисту робітників і службовців в ЗС; загальна оцінка стійкості об'єкта, найбільш слабкі (вразливі) ділянки виробництва; практичні заходи, терміни та обсяги робіт, які виконуються при повсякденній діяльності та при загрозі АС; порядок та приблизні строки відновлюваних робіт при різних ступенях руйнування. За результатами досліджень розробляються плани, в яких визначаються відповідні заходи, необхідні кошти на їх проведення, терміни і відповідальні особи за їх виконання.

Правильність проведених розрахунків та реальність пропозицій і рекомендацій перевіряються на спеціальних навчаннях під керівництвом начальника ЦО об'єкта.

Завчасно плануються і проводяться, в основному, заходи які потребують значних матеріальних витрат та часу на їх виконання. Економічна ефективність цих заходів може бути досягнута при їх коригуванні з завданнями щодо безаварійної-роботи об'єкта, поліпшення умов праці, удосконаленню виробничого процесу, реконструкції виробництва і таке інше.

5.2.2. Радіоактивне забруднення місцевості та його вплив на виробничу діяльність підприємств харчової та переробної промисловості

Серед уражаючих факторів ядерної аварії і ядерного вибуху особливе місце займає радіоактивне забруднення. Воно поширюється на сотні кілометрів. При цьому на великих площах може створюватися забруднення, яке буде небезпечним протягом тривалого часу.

В умовах радіоактивного забруднення місцевості виробнича діяльність харчових та переробних підприємств значно ускладнюється.

Для визначення конкретних параметрів впливу радіоактивного забруднення місцевості на виробничу діяльність підприємств харчової та переробної промисловості виявляють і оцінюють радіаційну обстановку.

Радіаційна обстановка — це масштаб і ступінь радіоактивного забруднення місцевості, які впливають на дії формувань рятувальних служб, населення і роботу об'єктів народного господарства.

Радіаційна обстановка може бути виявлена й оцінена за даними прогнозу і розвідки.

Прогнозування радіоактивного забруднення проводиться на основі гіпотетичних розрахунків можливих аварій на атомних електростанціях, на основі встановлених закономірностей залежно від масштабів і характеру радіоактивного забруднення місцевості від потужності й виду ядерного вибуху та метеорологічних умов.

Для прогнозування радіоактивного забруднення місцевості необхідні такі вихідні дані: розміщення атомної станції, вид і потужність реактора, координати, потужність і вид ядерного вибуху, час аварії чи вибуху, напрямок і швидкість середнього вітру.

Середнім вітром називається вітер, який є середнім за швидкістю і напрямком для всіх шарів атмосфери від поверхні землі до висоти піднімання

верхньої кромки хмари вибуху. Напрямок середнього вітру вказується азимутом у градусах.

Азимут середнього вітру – це кут у горизонтальній площині між напрямком, звідки дме вітер, і відрахованим за ходом годинникової стрілки.

Методом прогнозу можна встановити напрямок і швидкість руху радіоактивної хмари, час її підходу до населеного пункту, час випадання радіоактивних речовин, визначити розміри зон радіоактивного забруднення і найбільш імовірне їх розміщення на місцевості.

У зв'язку з тим, що процес випадання радіоактивних речовин може тривати кілька годин або днів, ця обставина дає можливість використати дані прогнозування завчасно, тобто до надходження радіоактивних речовин до населеного пункту і проведення низки особливо важливих заходів для захисту населення й особового складу рятувальних служб.

До таких заходів належать: оповіщення про загрозу радіоактивного забруднення, підготовка об'єктів до переходу на режим роботи в умовах радіоактивного забруднення, завершення робіт підготовки протирадіаційних укриттів для розміщення в них людей, підготовка індивідуальних засобів захисту органів дихання, підготовка тваринницьких приміщень для укриття сільськогосподарських тварин, заготівля кормів, укриття урожаю, захист джерел питної води, продуктів харчування, сировини та ін.

За результатами прогнозування проводиться оцінка можливих наслідків впливу радіоактивного забруднення на населення, на ведення рослинництва, тваринництва, лісового господарства та промислової діяльності.

Проте прогноз радіоактивного забруднення має відносний характер, тому його обов'язково уточнюють радіаційною розвідкою з метою своєчасного забезпечення штабів, командирів рятувальних формувань, керівників, власників і спеціалістів даними про фактичну радіаційну обстановку.

Конкретні дії особового складу рятувальних формувань, керівників, власників, спеціалістів і населення, встановлення режиму роботи об'єктів в умовах радіоактивного забруднення проводиться тільки на основі оцінки

радіаційної обстановки за даними радіаційної розвідки. Тому збір і обробка необхідних даних, виявлення й оцінка радіаційної обстановки є одним із важливих завдань штабів, командирів формувань, органів управління цивільного захисту.

Загальні висновки

Аналіз технологічного процесу виробництва технічного казеїну дозволяє зробити висновок, що найбільш енерговитратним етапом є процес сушіння.

Розроблено заходи із модернізації сушарки ВС-200, що полягають у використанні частини відпрацьованого сушильного агенту для попереднього підігрівання вологого казеїну перед його надходженням у сушильну камеру.

Очікуваний ефект від модернізації:

- зниження енергозатрат на процес сушіння
- підвищення коефіцієнту корисного використання теплоти та покращити загальні техніко-економічні показники виробництва казеїну. -
- скорочення тривалості початкового періоду сушіння, що позитивно впливає на загальну продуктивність установки;
- зниження необхідну для досягнення заданих параметрів процесу температури сушильного агенту:
- зниження теплового навантаження на конструктивні елементи сушильної камери та продовження її ресурсу.

Досліджено гідродинамічні властивості псевдокип'ячого шару казеїну у процесі його сушіння.

Встановили, що зміну гранулометричного складу казеїну у процесі його сушіння можна визначити із отриманого виразу:

$$g = -d_c^2 + 15d_c - c;$$

де g – частка фракції, %;

d_c – середній діаметр зерен казеїну, мм;

c – коефіцієнт етапу сушіння.

Розроблено заходи з охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Перелік посилань

1. Крупа В.В. Кваліфікаційна робота магістра: структура, вимоги до виконання та захист: Методичні рекомендації для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Галузеве машинобудування» зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування галузі знань 13 Механічна інженерія для здобувачів всіх форм здобуття освіти. Крупа В.В. та ін. Тернопіль, ТНТУ, 2023р. 66с.

2. T. M. Afzal, T. Abe, Y. Hikida. Energy and quality aspects during combined FIR-convection drying of barley. *Journal of Food Engineering*. 1999 Dec; 42(4):177-182.

3. A. Sumorek, W. Pietrzyk. Influence of corona wind on the convective drying course. *International Agrophysics*. 2001 Jan; 15:125-129.

4. D.Wray, H.S. Ramaswamy Novel Concepts in Microwave Drying of Foods. *Drying Technology*. 2015 Apr; 7(33):769-783.

5. M. Zhanga, J. Tangb, A. S. Mujumdar, S. Wangb. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. *Trends in Food Science and Technology*. 2006 Oct; 10(17):524-534.

6. Малезик І.Ф. Дослідження процесу НВЧ-сушіння морквяних вичавок при одержанні каротиновмісного збагачувача / І.Ф. Малезик, О.С. Бессараб, Г.М. Бандуренко, Т.М. Левківська // Наукові праці ОНАХТ. – 2014. – №45. – С.51-55.

7. Кравець О.І. Особливості фільтраційно-компресійного сушіння харчових мас / О.І. Кравець, М.М. Шинкарик // матеріали Міжн. наук.-техн. конф. «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», 14-15 трав. 2020 р. Тернопіль : ТНТУ, 2020. С. 223.

8. Improvement of environmental sustainability of milk processing enterprises / Oleh Kravets, Mariia Shynkaryk, Viktor Kravets // *Scientific Journal of TNTU*. — Tern.: TNTU, 2024. — Vol 114. — No 2. — P. 111–118.

9. Лобур Д.Ю. Шляхи зниження енергоємності процесів сушіння дисперсних матеріалів / Д.Ю. Лобур, О.І. Кравець // зб. тез доп. XIII Міжн. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-12 грудня 2024 р. Тернопіль : ТНТУ, 2024. С. 335-336.

10. Кравець О.І. Компресійно-фільтраційне сушіння пружно-пластичних харчових мас / О.І. Кравець, М.М. Шинкарик // Збірник тез Міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток технічних наук: проблеми та рішення» – Брно, Чеська Республіка, – 2018. – С. 56-59.

11. Савич, І. А., Кравчук, А. С., Стадницький, М. А., Шинкарик, М. М., & Кравець, О. І. (2025). Підвищення ефективності процесів відтиску та сушіння казеїну. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції „Стан і перспективи харчової науки та промисловості “присвяченої 30-річчю заснування кафедри харчової біотехнології і хімії ТНТУ імені Івана Пулюя, 125-126.

12. В.І. Кравець. Конструкція шнекової фільтраційної сушарки / Кравець В.І., Стадницький М.А., Кравець О.І., Шинкарик М.М. // зб. тез доп. XIV Міжн. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-12 грудня 2025 р. Тернопіль : ТНТУ, 2025. С. 427.

13. М.А. Стадницький. Сучасні тенденції підвищення ефективності сушіння / Стадницький М.А., Кравець В.І., Савич І.А., Кравець О.І. // зб. тез доп. XIV Міжн. наук.-практ. конф. молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», 11-12 грудня 2025 р. Тернопіль : ТНТУ, 2025. С. 431.

14. Стадницький М.А. Зміна вологості казеїну у процесі його сушіння / М.А. Стадницький, В.І. Кравець, М.М. Шинкарик, О.І. Кравець // мат. Міжнародної науково-практичної конференції: «БІОТЕХНОЛОГІЇ ПРОДОВОЛЬЧИХ ПРОДУКТІВ: ПРОБЛЕМИ І ПЕРСПЕКТИВИ» з нагоди 80 – річниці ДНУ «УкрНДІспиртбіопрод» 25 листопада 2025 р. м. Київ : ДНУ «УкрНДІспиртбіопрод». 2025. С.125-126.

15. Кравець В.І. Вплив пористості казеїну на процес його компресійно-фільтраційного сушіння / В.І. Кравець, М.А. Стадницький, М.М. Шинкарик, О.І. Кравець // мат. Міжнародної науково-практичної конференції: «Біотехнології

продовольчих продуктів: проблеми і перспективи» 10 грудня 2024 р. м. Київ : ДНУ «УкрНДІспиртбіопрод». 2024. С.41-44.

16. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. — Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

17. Solidworks у завданнях 3D моделювання та інжинірингу технічних систем. Навч. посібник / В.Я. Ворощук, Т.М. Вітенько. Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2021. 164 с.

Додатки

Специфікації