

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Кафедра процесів, обладнання та енергетичного менеджменту



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА**

**на тему: Розробка конструкції енергоефективної мікрохвильової
стрічкової сушарки**

Здобувача(ки) Анцєфорова В.О.
(прізвище, ініціали)

II курсу СІ-20МН групи

Керівник доц. Яровий І.І.
(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти: _____
(посада, прізвище та ініціали)

(посада, прізвище та ініціали)

Кваліфікаційна робота допускається до захисту

Рішення кафедри від _____ 2026 р., протокол № _____.

Завідувач(ка) кафедри ПОтаЕМ _____ Олег БУРДО
(назва кафедри) (підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Одеса - 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут «Холоду, кріотехнологій та екоенергетики»

Кафедра: «Процесів, обладнання та енергетичного менеджменту»

Ступінь вищої освіти: «магістр»

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Освітньо-наукова програма «Системний інжиніринг промислових виробництв»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ПОтаЕМ

_____ О.Г. БУРДО

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Анцєфорова Володимира Олександровича

1. Тема роботи: «Розробка енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки».

Затверджена наказом ОНТУ від «11» листопада 2024 р. № 707-03.

2. Термін здачі здобувачем завершеної роботи: 10 червня 2026 р.

3. Вихідні дані роботи: дослідження науковців кафедри, дослідний стенд з комбінованим способом видалення вологи.

4. Перелік питань, які потрібно розробити: Анотація. Список скорочень.

Вступ. I. Актуальні проблеми в технологіях сушіння харчової сировини. 1.1.

Аналіз типових способів сушіння. 1.2. Класифікація способів сушіння сипучої

харчової сировини. 1.3. Аналіз технологічних та енергетичних проблем в

процесах сушіння харчової та переробної галузі. 1.4. Огляд сучасних

технологій сушіння та технічних рішень для вирішення проблем в процесах

сушіння сипучої сировини. 1.5. Патентний пошук та аналіз інформаційних

джерел за тематикою аналітичних та експериментальних досліджень процесів

мікрохвильового сушіння. 1.6. Обґрунтування вибору мікрохвильового

способу сушіння для реалізації мікрохвильової стрічкової сушарки. 1.7. Аналіз

енергетичної ефективності процесу сушіння мікрохвильовим способом. 1.8.

Висновки щодо вихідних параметрів та техніко – економічних обмежень при

розробці енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки.

II. Технічний проект мікрохвильової стрічкової сушарки. 2.1. Розрахунок

основних параметрів та вибір конструктивних вузлів мікрохвильової

стрічкової сушарки. 2.2. Розрахунок параметрів транспортного механізму

сушарки. 2.3. Розрахунок та вибір конструктивних рішень для енергетичної

складової мікрохвильової стрічкової сушарки. 2.4. Розробка загального виду

та основних конструктивних елементів мікрохвильової стрічкової сушарки.

2.5. Вибір та обґрунтування основних технологічних режимів роботи

розробленої конструкції стрічкової сушарки.

III. Заключна частина. 3. Охорона праці та техніка безпеки при використанні

мікрохвильових технологій. 4. Аналіз небезпечних для навколишнього

середовища факторів, що можуть виникати при експлуатації установки.

5.Рекомендації щодо безпечної експлуатації енергоефективної мікрохвильової стрічкової установки.

Заключення.

Інформаційні джерела.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 5.1. Технологічна лінія з мікрохвильовою стрічковою сушаркою та схема конверсії енергії (аркуш А1); 5.2. Загальний вид енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки (А1); 5.3. Схема кінематична приводу транспорту сушарки. (А1) 5.4. Деталювання основних конструктивних вузлів сушарки. (2 арк. А1) 5.5. Графічний матеріал, що відображає результати дослідної частини роботи. (А1); 5.6. Слайди демонстраційної частини роботи, що відображають основні етапи і результати роботи (від до 20 шт.) .

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що стосуються їх:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та техніка безпеки			

7. Дата видачі завдання: «__»_____ 2025 р.

Керівник _____ Ігор ЯРОВИЙ

Завдання прийняв до виконання _____ Володимир АНЦЕФОРОВ

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ		
2	Технологічна частина		
3	Технічний проект установки		
4	Результати дослідження		
5	Заклучна частина		
6	Графічна та презентаційна частина		
7	Перевірка та рецензування роботи		

Завдання прийняв до виконання _____ Володимир АНЦЕФОРОВ

Керівник _____ Ігор ЯРОВИЙ

Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.

Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчесності.

Здобувач-дипломник _____ Володимир АНЦЕФОРОВ

РЕФЕРАТ
КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА
(ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ)

Тема: Розробка конструкції енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки

Спеціальність: 133 «Галузеве машинобудування»

Освітньо - наукова програма «Системний інжиніринг промислових виробництв»

Випускника, за ОПС «магістр»: Анцєфорова Володимира Олександровича

Керівник роботи: доцент каф. ПОтаЕМ, к.т.н., Яровий Ігор Іванович

Ключові слова: мікрохвильове сушіння, енергетична ефективність, стрічкова сушарка.

Актуальність теми

Тема кваліфікаційної роботи пов'язана з розробкою конструкції енергоефективної мікрохвильової сушарки. Актуальність обраної теми визначається інноваційністю та обмеженою кількістю практичних реалізацій обладнання на основі технології мікрохвильового сушіння вологої сировини.

Мета і завдання роботи

Кваліфікаційна робота (дипломний проект) складається з графічної частини у вигляді семи аркушів креслень виконаних на аркушах формату А1, які містять: Креслення загального виду установки, креслення сушильної камери, кінематичну схему приводу установки, креслення деталювання та креслення з матеріалами результатів дослідження.

Текстова частина роботи (проекту) обсягом 94 сторінки складається з наступних частин та розділів. Анотація та вступ. Основна частина, в якій виконано актуальних проблем сушіння, надано аналіз існуючих способів сушіння та визначено основну проблематику актуальних сушильних технологій. Виконано патентний пошук за заданою тематикою, приведено аргументи на користь обраного способу сушіння. В другому розділі роботи приведено послідовний та логічний набір кроків з вибору конструкції стрічкової сушарки та розрахунків її конструктивних елементів. Деталізовано

основні вузли механічної частини мікрохвильової сушильної установки та її енергетичні характеристики.

В завершальній частині пояснювальної записки проекту приведено перелік основних вимог охорони праці і техніки безпеки, яких треба дотримуватись при експлуатації мікрохвильового обладнання а також розділ з техніко - економічним обґрунтуванням рішень запропонованих в проекті і розрахунками кошторисної вартості капітальних витрат проекту.

В цілому проект містить: вступ, три основних розділи, заключення, додаток та список використаних літературних джерел, що включає 37 найменувань. Всього текстова частина містить 94 сторінок, 28 рисунків, 3 таблиці.

Випускник

Володимир АНЦЕФОРОВ
(Ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

(Підпис)

ЗМІСТ

Анотація	4
Список скорочень	6
Вступ	7
I. Актуальні проблеми в технологіях сушіння харчової сировини	
1.1. Загальна характеристика процесів сушіння у харчовій промисловості	9
1.2. Класифікація та аналіз традиційних методів сушіння	10
1.3. Аналіз технологічних та енергетичних проблем в процесах сушіння харчової та переробної галузі	11
1.4. Огляд сучасних технологій сушіння та технічних рішень для вирішення проблем в процесах сушіння сипучої сировини	12
1.5. Патентний пошук та аналіз інформаційних джерел за тематикою аналітичних та експериментальних досліджень процесів мікрохвильового сушіння	16
1.6. Обґрунтування вибору мікрохвильового способу сушіння для реалізації мікрохвильової стрічкової сушарки	22
1.7. Аналіз енергетичної ефективності процесу сушіння мікрохвильовим способом	24
1.8. Висновки щодо вихідних параметрів та техніко – економічних обмежень при розробці енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки	26
II. Технічний проект мікрохвильової стрічкової сушарки	
2.1. Розрахунок основних параметрів та вибір конструктивних вузлів мікрохвильової стрічкової сушарки	32
2.2. Розрахунок параметрів транспортного механізму сушарки	37
2.3. Розрахунок та вибір конструктивних рішень для енергетичної складової мікрохвильової стрічкової сушарки	67
2.4. Розробка загального виду та основних конструктивних елементів мікрохвильової стрічкової сушарки	72
2.5. Вибір та обґрунтування основних технологічних режимів роботи розробленої конструкції стрічкової сушарки	78
III. Заключна частина	
3. Охорона праці та техніка безпеки при використанні мікрохвильових технологій	84
4. Аналіз небезпечних для навколишнього середовища факторів, що можуть виникати при експлуатації установки	86
5. Рекомендації щодо безпечної експлуатації енергоефективної мікрохвильової стрічкової установки	88
Заключення	91
Інформаційні джерела	93

					<i>КРМ.ПОтаЕМ.1.707-03.2.1</i>		
<i>Змін.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>		<i>Анцєфоров В.О.</i>			<i>Літ.</i>	<i>Аркуш</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевір.</i>		<i>Яровий І.І.</i>				3	
<i>Зав. каф.</i>		<i>Бурдо О.Г.</i>			<i>ПОтаЕМ, гр. СІ-20МН</i>		
<i>Рецензент</i>							
<i>Н.контр.</i>					<i>КМСА 00.00.00.ПЗ</i>		

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра присвячена розробці енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки для сипучої харчової сировини. Обсяг роботи становить 94 сторінки, 28 рисунків, 3 таблиць, 37 інформаційних джерел.

У першому розділі проведено комплексний аналіз існуючих способів і технологій сушіння харчової сировини. Виконано класифікацію методів сушіння сипучих продуктів, визначено їх технологічні та енергетичні недоліки. Проведено огляд сучасних технічних рішень та патентний пошук у сфері мікрохвильового сушіння. Обґрунтовано вибір мікрохвильового способу як основи для реалізації проектованої установки, виконано аналіз його енергетичної ефективності та сформульовано вихідні параметри й техніко-економічні обмеження для розробки.

У другому розділі представлено технічний проект мікрохвильової стрічкової сушарки. Виконано розрахунок основних конструктивних і технологічних параметрів установки, параметрів транспортного механізму та енергетичної складової. Розроблено загальний вигляд апарата і його ключових конструктивних елементів. Обґрунтовано раціональні режими роботи розробленої конструкції.

У заключній частині розглянуто питання охорони праці та техніки безпеки при використанні мікрохвильових технологій, виявлено небезпечні для навколишнього середовища фактори, що можуть виникати під час експлуатації установки, та надано рекомендації щодо її безпечного використання.

Ключові слова: мікрохвильове сушіння, стрічкова сушарка, харчова сировина, енергоефективність, НВЧ-технології, конструктивний розрахунок, охорона праці.

ABSTRACT

The Master's qualification work is devoted to the development of an energy-efficient microwave belt dryer for bulk food raw materials. The work comprises 94 pages, 28 figures, 3 tables, and 37 references.

The first chapter provides a comprehensive analysis of existing drying methods and technologies for food raw materials. Drying methods for bulk products are classified, and their technological and energy-related shortcomings are identified. A review of modern technical solutions and a patent search in the field of microwave drying are conducted. The choice of the microwave method as the basis for the designed unit is substantiated, its energy efficiency is analysed, and the initial parameters and techno-economic constraints for the development are formulated.

The second chapter presents the technical design of the microwave belt dryer. Calculations of the main structural and technological parameters of the unit, the conveyor mechanism parameters, and the energy components are performed. The general layout of the apparatus and its key structural elements are developed. Rational operating modes for the designed construction are substantiated.

The concluding part addresses occupational health and safety issues related to the use of microwave technologies, identifies environmentally hazardous factors that may arise during operation of the unit, and provides recommendations for its safe use.

Keywords: microwave drying, belt dryer, food raw materials, energy efficiency, microwave technologies, structural calculation, occupational safety.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СКОРОЧЕНЬ ТА СИМВОЛІВ

НВЧ – надвисока частота

ЕМВ – електромагнітне випромінювання

ЕМП – електромагнітне поле

ККД – коефіцієнт корисної дії

ТЕП – техніко-економічні показники

ТЗ – технічне завдання

АСУ – автоматизована система управління

ПДД – припустима добова доза

ГДР – гранично допустимий рівень

ГДК – гранично допустима концентрація

ДБН – державні будівельні норми

ДСТУ – Державний стандарт України

НПАОП – нормативно-правовий акт з охорони праці

СВЧ – надвисокочастотне випромінювання (рос. відповідник НВЧ, може зустрічатись у джерелах)

ISM – Industrial, Scientific and Medical (промислові, наукові та медичні частоти)

МВ – мікрохвильовий (-а, -е)

ПЕК – паливно-енергетичний комплекс

ВСТУП

Харчова промисловість щодня стикається з необхідністю обробляти величезні обсяги сировини – сушити, розігрівати, пастеризувати. Ці, здавалося б, рутинні процеси насправді є одними з найбільш енергозатратних на будь-якому харчовому виробництві. Традиційні підходи до термічної обробки продуктів, що десятиліттями залишаються незмінними, вже не відповідають сучасним вимогам ні за ефективністю, ні за якістю кінцевого продукту.

Мікрохвильові технології нагрівання пропонують принципово інший погляд на цю проблему. На відміну від звичайного конвективного нагрівання, де тепло повільно проникає з поверхні всередину матеріалу, мікрохвилі діють інакше: вони нагрівають вологу безпосередньо всередині продукту, рівномірно і значно швидше, що змінює саму логіку процесу видалення вологи з матеріалу. Результат – коротший час обробки, компактніше обладнання, краща якість продукту та суттєво менші витрати енергії.

Сьогодні мікрохвильові технології успішно застосовуються в найрізноманітніших харчових виробництвах. Стерилізація напівфабрикатів безпосередньо в герметичній упаковці, м'яка обробка спецій без втрати аромату, сушіння фруктів зі збереженням поживних речовин, виробництво кормів для тварин і навіть випічка хліба – у кожному з цих випадків мікрохвильовий підхід дає відчутні переваги перед традиційними методами.

Практичним підтвердженням цього може бути досвід компанії Fricke and Mallah, яка розробила промислову тунельну мікрохвильову сушильну установку для корму. При потужності 40 кВт вона забезпечує продуктивність 80 кг сировини на годину, видаляючи при цьому до 40 кг вологи – це половина початкової ваги продукту. Рівномірність нагрівання, висока ефективність та можливість плавного регулювання режимів роботи роблять таке рішення зразком для наслідування.

Водночас слід визнати, що попри очевидні переваги, мікрохвильове обладнання залишається технічно складним і дорогим. Саме тому його промислове впровадження досі обмежене, для широкого впровадження

необхідні приклади успішного використання мікрохвильових технологій в стандартних технологічних процесах, а галузь в цілому потребує глибокого розуміння енергетики процесу та обґрунтованих інженерних рішень, здатних зробити технологію доступнішою.

Кафедра обладнання, процесів і апаратів ОНТУ вже тривалий час займається дослідженнями в цій сфері та має значні наукові напрацювання. Спираючись на цей досвід, у даній роботі ставиться мета дослідити енергетичні показники процесу мікрохвильового сушіння та розробити і обґрунтувати основні технічні рішення для конструкції енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки.

Для досягнення цілі роботи слід проаналізувати роботу та будову мікрохвильових сушарок та способи їх використання в технологічних процесах і режими обробки типових матеріалів з якими дані установки можуть працювати. В результаті дослідження енергетичних показників процесу видалення вологи в мікрохвильових сушильних апаратах слід надати висновок про ефективність та енергетичну доцільність впровадження технології мікрохвильового сушіння в технологічні процеси харчової промисловості на поточному етапі розвитку МХ мтехнологій.

Метою моєї кваліфікаційної роботи магістра є розробка конструкції енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки.

Предметом дослідження є енергетичні витрати в процесі мікрохвильового сушіння вологої сировини та конструкція мікрохвильової стрічкової сушарки, що відповідає вимогам енергоефективних технологій.

РОЗДІЛ 1

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ В ТЕХНОЛОГІЯХ СУШІННЯ ХАРЧОВОЇ СИРОВИНИ

1.1. Загальна характеристика процесів сушіння у харчовій промисловості

Сушіння є одним із найпоширеніших технологічних процесів у харчовій промисловості, що забезпечує консервування продуктів шляхом видалення вологи до рівня, за якого пригнічується розвиток мікроорганізмів та уповільнюються ферментативні реакції. Сучасне виробництво харчових продуктів – зернових культур, плодів і овочів, пряно-ароматичної сировини, молочних та м'ясних продуктів, рибопродуктів – нерозривно пов'язане із застосуванням сушильних технологій на різних етапах переробки.

Значення сушіння у харчовій галузі визначається кількома ключовими аспектами. По-перше, це забезпечення мікробіологічної стабільності продукту: зниження активності води (a_w) нижче 0,6–0,7 унеможливорює розмноження більшості бактерій, дріжджів і цвілевих грибів. По-друге, сушіння суттєво скорочує масу та об'єм продукту, що знижує витрати на транспортування та зберігання. По-третє, висушені харчові продукти за умови дотримання температурного режиму зберігання здатні зберігати споживчі властивості протягом кількох місяців або навіть років без застосування хімічних консервантів.

Водночас технологічна складність процесу сушіння обумовлена необхідністю поєднувати ефективно видалення вологи зі збереженням нутрієнтного складу, органолептичних характеристик і функціональних властивостей продукту. Теплочутлива харчова сировина – ягоди, трав'яні екстракти, вітамінізовані суміші – особливо вразлива до перегріву, що вимагає застосування м'яких, але водночас інтенсивних режимів сушіння.

У технологічному плані сушіння є складним нестационарним процесом тепломасообміну, що включає зовнішній і внутрішній масообмін. На першому етапі – у зоні постійної швидкості сушіння – видалення вологи відбувається з

поверхні матеріалу і визначається умовами зовнішнього середовища. На другому – у зоні падаючої швидкості – переважає внутрішня дифузія вологи крізь структуру матеріалу. Саме другий етап є вирішальним з точки зору якості кінцевого продукту та енергоефективності процесу.

1.2. Класифікація та аналіз традиційних методів сушіння

Традиційні конвективні сушарки залишаються найбільш розповсюдженими у харчовій промисловості завдяки своїй простоті та відносно низькій початковій вартості обладнання. Принцип їх дії ґрунтується на передачі теплоти від нагрітого повітря до поверхні матеріалу шляхом конвекції. Температура теплоносія коливається в межах 50–120 °С залежно від виду сировини та вимог до якості продукту.

Проте конвективне сушіння має ряд суттєвих недоліків, що стають дедалі відчутнішими в умовах зростання вимог до якості продукту та енергетичної ефективності виробництва. Найголовнішим із них є низький термічний ккд: значна частина підведеної теплоти витрачається на нагрівання несучого повітря та його втрати в навколишнє середовище. За різними оцінками, питомі витрати теплоти на видалення одного кілограма вологи при конвективному сушінні становлять 3500–6000 кДж/кг, тоді як теоретичний мінімум (теплота пароутворення) складає лише 2257 кДж/кг.

Контактне (кондуктивне) сушіння здійснюється за рахунок безпосереднього контакту матеріалу з нагрітою поверхнею. Цей метод використовується для рідких та пастоподібних продуктів – молока, томатної пасти, пюреподібних мас – у вальцьових і барабанних сушарках. Перевагою є вища інтенсивність теплопередачі порівняно з конвективними апаратами; однак нерівномірність нагрівання, можливість локальних перегрівів і складність регулювання режиму суттєво обмежують застосування.

Сублимаційне сушіння (ліофілізація) забезпечує найвищу якість кінцевого продукту, оскільки відбувається за низьких температур (від –40 до –20 °С) в умовах глибокого вакууму. Видалення вологи здійснюється

безпосередньо із замороженого стану у вигляді пари, минаючи рідку фазу. Це дозволяє зберегти структуру, колір, аромат і вітамінний склад продукту на рівні, недосяжному для інших методів. Разом із тим висока енергоємність (6000–9000 кДж/кг видаленої вологи), тривалість процесу (10–20 год) і значні капітальні витрати обмежують використання ліофілізації преміальним сегментом харчового ринку.

Розпилювальне сушіння широко застосовується у молочній, яєчній і харчовій промисловості для отримання порошкоподібних продуктів. Диспергування рідини на дрібні краплі різко збільшує питому поверхню контакту з теплоносієм, що забезпечує надзвичайно короткий час сушіння – від часток секунди до декількох секунд. Попри це, розпилювальне сушіння характеризується значними тепловими втратами та вимагає ретельного очищення відпрацьованого повітря від пилу.

1.3. Аналіз технологічних та енергетичних проблем в процесах сушіння харчової та переробної галузі

Харчова промисловість є одним із найбільших споживачів теплової енергії у промисловому секторі. За даними Міжнародного енергетичного агентства, процеси сушіння і випарювання в харчопереробці щорічно споживають близько 20–25 % від загального обсягу теплової енергії галузі. У зв'язку з постійним зростанням цін на енергоносії та посиленням вимог до скорочення викидів парникових газів питання підвищення енергоефективності сушильних установок набуває критичного значення.

Основні статті енергетичних втрат у традиційних сушарках можна систематизувати за такими напрямками:

- втрати з відхідними газами (повітрям): у конвективних сушарках вони становлять 25–40 % від підведеної теплоти;
- теплові втрати через огорожувальні конструкції апарата в навколишнє середовище (5–15 %);
- нераціональне нагрівання матеріалу понад необхідний рівень (перегрів);

- неефективне використання потужності нагрівачів при нестаціонарних режимах роботи.

Крім того, тривалість сушіння при невисоких температурах, вимушена наявністю теплочутливих компонентів у сировині, призводить до збільшення часу перебування продукту в апараті, а отже – до зростання поточних витрат. Пошук альтернативних методів підведення теплоти, здатних забезпечити вибіркове та рівномірне нагрівання матеріалу без надмірного розігрівання поверхневих шарів, став однією з провідних тенденцій розвитку сушильної техніки.

Особливої гостроти ця проблема набуває в контексті стратегії сталого розвитку та декарбонізації харчової промисловості. Перехід до більш ефективних джерел підведення енергії при сушінні – насамперед електромагнітного випромінювання НВЧ-діапазону – розглядається фахівцями як один із перспективних шляхів скорочення вуглецевого сліду виробництва.

1.4. Огляд сучасних технологій сушіння та технічних рішень для вирішення проблем в процесах сушіння сипучої сировини

Сушіння є одним із ключових технологічних процесів у переробці рослинної сировини — трав, плодів, овочів, коренеплодів та лікарських рослин. Правильно обраний метод дозволяє знизити вологість продукту до безпечного рівня, зберегти біологічно активні речовини та мінімізувати енерговитрати. У сучасній промисловості широко застосовуються конвективне, інфрачервоне, сублімаційне, вакуумне та мікрохвильове сушіння, а також їх комбінації.

1.4.1. Конвективне сушіння

Конвективне (повітряно-теплове) сушіння залишається найбільш поширеним промисловим методом. Конвективне сушіння дотепер є найуживанішим методом зневоднення рослинних матеріалів у традиційній переробці сировини [7]. Принцип методу ґрунтується на обдуванні матеріалу нагрітим повітрям, яке відводить вологу з поверхні та об'єму продукту. До переваг методу відносять відносну простоту конструкції обладнання та низьку

собівартість процесу. Проте контакт матеріалу з гарячим повітрям призводить до прискореної деградації ароматичних сполук і поживних речовин, а також до зміни кольору та усадки тканин [8]. Типовий температурний режим — 40–70 °С, тривалість процесу — від кількох годин до кількох діб залежно від виду сировини.

1.4.2. Інфрачервоне сушіння

Інфрачервоне (ІЧ) сушіння використовує електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі 0,78–1000 мкм, яке поглинається безпосередньо в шарах матеріалу. Порівняльні дослідження показали, що при однакових параметрах процесу ІЧ-сушіння скорочує тривалість обробки до 50% порівняно з конвективним методом [3]. Перевагами є висока швидкість теплопередачі та відносно м'який термічний вплив. Водночас ІЧ-сушіння у чистому вигляді може знижувати органолептичні показники [5], тому часто його застосовують у поєднанні з конвективним обдувом.

1.4.3. Сублімаційне сушіння (ліофілізація)

Ліофілізація — заморожування продукту з наступним видаленням льоду шляхом сублімації за зниженого тиску — забезпечує найвищу якість кінцевого продукту. Ліофілізоване рослиння вважається продуктом із характеристиками, максимально наближеними до свіжої сировини: метод забезпечує найкраще збереження кольору, зовнішнього вигляду, текстури та аромату, а також мінімальні втрати поживних речовин і високу здатність до регідратації [6]. Основний недолік — значна тривалість циклу (20–60 год) і висока енергоємність, що обмежує широке промислове застосування [8].

1.4.4. Вакуумне сушіння

Вакуумне сушіння реалізується за зниженого тиску, що дозволяє знижувати температуру кипіння води та сушити продукт при 30–50 °С. Це суттєво зменшує термічну деструкцію термолабільних сполук. Метод особливо ефективний для ефірноолійних культур і лікарських рослин. Дослідження рослинних листків показали, що вакуумно-мікрохвильове сушіння забезпечує

найнижчу питому витрату енергії, зберігаючи при цьому високий вміст поліфенолів та антиоксидантну активність [2].

1.4.5. Мікрохвильове сушіння

Мікрохвильове сушіння засноване на діелектричному нагріванні: молекули води поглинають мікрохвильову енергію по всьому об'єму матеріалу одночасно, що забезпечує швидку та рівномірну обробку. Мікрохвильове сушіння з допоміжними технологіями набуває дедалі більшого поширення у харчовій промисловості завдяки здатності підвищувати ефективність сушіння, зберігати поживні та функціональні властивості та покращувати якість продукту [1]. Основний недолік — нерівномірний розподіл температурного поля за великих завантажень, що потребує спеціальних конструктивних рішень [4].

1.4.6. Комбіновані технології

Поєднання декількох методів дозволяє нівелювати недоліки кожного окремого способу.

Конвективно-мікрохвильове сушіння. Дослідження показали, що конвективне сушіння з одночасним застосуванням мікрохвильового та інфрачервоного випромінювання значно скорочує тривалість процесу порівняно зі звичайним гарячим повітрям, покращує збереження вітаміну С та кольору при меншому споживанні енергії [4].

Вакуумно-мікрохвильове сушіння (МВВ). Поєднання мікрохвильового нагріву та вакууму прискорює швидкість сушіння навіть за відносно низьких температур, що робить цей метод особливо придатним для термолабільної рослинної сировини [2]. Технологія REV™ (Radiant Energy Vacuum) — один із запатентованих промислових варіантів цього підходу — за рахунок контролю тиску та щільності мікрохвильової потужності дозволяє точно регулювати температуру і кінцеву вологість продукту, забезпечуючи об'ємно-рівномірне зневоднення.

Конвективно-вакуумно-мікрохвильове сушіння. При комбінованому

підході основна частина вологи ефективно видаляється конвективним методом на першому етапі, а час завершального сушіння суттєво скорочується завдяки застосуванню вакуумно-мікрохвильового фінішу. Такий варіант найбільш придатний для промислового впровадження, оскільки забезпечує якість, наближену до суто вакуумно-мікрохвильового сушіння, при значно вищій продуктивності [2].

ІЧ-сублімаційне сушіння. Інфрачервоно-сублімаційне сушіння є одним із найперспективніших комбінованих підходів на основі ліофілізації: воно забезпечує кращу якість продукту порівняно з традиційною ліофілізацією та скорочує тривалість процесу за рахунок використання ІЧ-випромінювання для генерації енергії сублімації льоду, що підвищує інтенсивність теплопередачі [6].

Таким чином вибір методу сушіння визначається видом сировини, вимогами до якості кінцевого продукту та економічними показниками. Конвективне сушіння залишається базовим для масових виробництв; ІЧ-метод ефективний там, де важливе скорочення часу обробки; сублімаційне — для преміальної продукції з максимальним збереженням біологічної активності.

Мікрохвильові та вакуумні методи, особливо у комбінованих варіантах, становлять основу сучасних енергоефективних технологій, поєднуючи швидкість процесу зі збереженням якісних показників рослинної сировини.

Список використаних джерел

1. Dehghannya J. et al. Microwave Drying of Food Materials: Principles, Hybrid Techniques, Modeling Approaches, and Emerging Innovations // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. — 2025. — Wiley Online Library. DOI: 10.1111/1541-4337.70312
2. Figiel A., Michalska A. Overall Quality of Fruits and Vegetables Products Affected by the Drying Processes with the Assistance of Vacuum-Microwaves // International Journal of Molecular Sciences. — 2017. — Vol. 18(1). — P. 71. DOI: 10.3390/ijms18010071

3. Nowak D., Lewicki P.P. Infrared drying of apple slices // Innovative Food Science & Emerging Technologies. — 2004. — Vol. 5(3). — P. 353–360.
4. Li M. et al. Convective drying enhanced with microwave and infrared radiation for green pepper // Journal of Food Engineering. — 2019. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2019.01.014
5. Drying of vegetable and root crops by solar, infrared, microwave, and radio frequency as energy efficient methods: A review // International Journal of Food Science & Technology. — 2022. DOI: 10.1080/87559129.2022.2148688
6. Recent Developments in the Hybridization of the Freeze-Drying Technique in Food Dehydration: A Review on Chemical and Sensory Qualities // Foods. — 2023. — PMC10528370. DOI: 10.3390/foods12183451
7. Modeling and Optimization of Microwave Vacuum Drying for Pinelliae Rhizoma: Integrating Drying Kinetics, Artificial Neural Networks, and Quality Preservation // PMC. — 2025. — PMC12355724.
8. Jafari S., Malekjani N. Drying Technology

1.5. Патентний пошук та аналіз інформаційних джерел за тематикою аналітичних та експериментальних досліджень процесів мікрохвильового сушіння

Пошук проводився в базах патентних документів USPTO (США), Google Patents та Espacenet (ЄПВ) за ключовими запитамі: microwave drying plant material energy efficient, vacuum microwave drying herbs, combined microwave infrared drying agricultural, pulsed microwave vacuum drying food. Часовий діапазон — 1998–2024 рр. Для аналізу відібрано десять патентних документів, безпосередньо пов'язаних із тематикою енергоефективного МХ-сушіння рослинної сировини.

1.5.1. US 5 956 865 A — Process for drying herbs

Автори: Durance T., Wang J.H. (EnWave Corp., Канада) **Дата видачі:** 1999

Анотація. Патент стосується вакуумного мікрохвильового сушіння прямих трав. Для базиліку, орегано та подібних культур запропоновано режим потужності ~4 кВт/кг свіжої сировини при максимально низькому вакуумному

тиску, що дозволяє завершити процес якомога швидше при мінімальній температурі [1].

Висновок. Встановлено, що поєднання низького вакуумного тиску з оптимальною щільністю МХ-потужності дозволяє у 3–5 разів скоротити час сушіння порівняно з конвективним методом зі збереженням ефірних олій на рівні 85–95%.

1.5.2. US 6 128 831 A — Process for drying medicinal plants

Автори: Durance T. (University of British Columbia) **Дата видачі:** 2000

Анотація. Процес передбачає завантаження свіжих рослинних матеріалів у вакуумну мікрохвильову камеру, зниження тиску нижче 0,27 атм і застосування МХ-потужності 1–12 кВт/кг протягом 2–35 хв до досягнення вологості менше 20% без значного окислення нелетких активних компонентів великої молекулярної маси. Наприкінці сушіння рекомендується знижувати потужність до $\leq 50\%$ від початкової [2].

Висновок. Метод дозволяє зберегти до 95% гіперичину (Звіробій звичайний) та алкамідів (Ехінацея) на противагу звичайному повітряному сушінню, що знижує їх рівень до 20–30%. Ключовою перевагою є поетапне зниження потужності наприкінці процесу.

1.5.3. EP 2 568 830 A1 — Plant material drying methods

Патентовласник: EnWave Corporation (Канада) **Дата публікації:** 2013

Анотація. Вакуумно-мікрохвильове сушіння пропонується як альтернативний спосіб підвищення якості зневоднених продуктів. Винахід полягає в контрольованому використанні енергії для видалення води з рослинного матеріалу зі збереженням термолабільних компонентів. МХ-енергія прикладається до щойно зібраної сировини безпосередньо в полі з метою зменшення маси і об'єму для скорочення транспортних витрат [3].

Висновок. Запропоновано концепцію «польового» (in-field) сушіння, що усуває потребу в транспортуванні свіжої маси до переробного підприємства. Питомі енерговитрати у 2–4 рази нижчі порівняно з ліофілізацією.

1.5.4. US 9 267 734 B2 — Microwave vacuum-drying of organic materials

Патентовласник: EnWave Corporation **Дата видачі:** 2016

Анотація. Безперервна вакуумна мікрохвильова камера з вхідним і вихідним модулями та рядом люків вздовж осі, кожен з яких обладнано магнетроном з хвилеводом. Зниження тиску зменшує точку кипіння води та вміст кисню в атмосфері, що дозволяє зберігати компоненти, чутливі до окислення і термічної деградації, краще, ніж при повітряному сушінні, а сам процес є значно швидшим [4].

Висновок. Конструкція з множинними дверцятами-люками вирішує основну проблему попередніх апаратів — необхідність повного розбирання для очищення, одночасно знижуючи потужність окремих магнетронів і ризик іскріння в вакуумі.

1.5.5. US 9 958 203 B2 — Microwave vacuum-drying of organic materials (multi-generator)

Патентовласник: EnWave Corporation **Дата видачі:** 2018

Анотація. Апарат оснащений кількома МХ-генераторами, які вмикаються так, що між їхніми мікрохвильовими потоками виникає інтерференція, рівномірно розподіляючи МХ-енергію по всій вакуумній камері. МХ-прозоре вікно камери розташоване так, що матеріал на конвеєрній стрічці одразу потрапляє під випромінювання, послаблюючи його й зменшуючи ризик іскріння [5].

Висновок. Пульсовий режим генераторів (наприклад, 5 с увімкнено — 2 с вимкнено) із постійним зсувом фаз між сусідніми генераторами забезпечує рівномірне опромінення всіх ділянок матеріалу та підтримує мінімум два активні генератори в будь-який момент, уникаючи «холодних зон» [5].

1.5.6. US 11 384 980 B2 — System and method for reducing moisture using microwave and RF energy

Патентовласник: Drywave Technologies **Дата видачі:** 2022

Анотація. Розкриття стосується зменшення і/або видалення вологи з рослинних матеріалів шляхом подачі мікрохвильового випромінювання у поєднанні з радіочастотною (РЧ) енергією із застосуванням апарата з

вертикальним конвеєром — для видалення вологи з целюлозовмісних матеріалів, таких як деревина, рослини, листя, квіти, свіжа і волокниста сировина [6].

Висновок. Гібридна МХ+РЧ технологія дозволяє прецизійно регулювати глибину проникнення енергії в матеріал: МХ-випромінювання нагріває внутрішні шари, тоді як РЧ-енергія рівномірно охоплює всю масу продукту, скорочуючи загальне енергоспоживання на 20–35% порівняно з суто МХ-сушінням.

1.5.7. US 9 839 661 B2 — Plant material drying methods (mint / rosmarinic acid)

Патентовласник: Durance T. et al. **Дата видачі:** 2017

Анотація. Спосіб сушіння зібраного рослинного матеріалу для зменшення маси і об'єму шляхом видалення води з тканини м'яти, яка містить розмаринову кислоту, без деградації більшості цієї кислоти. Рослинна тканина рухається конвеєром через мікрохвильову камеру, інтенсивність енергії регулюється в діапазоні 0,001–1,0 Вт/см³ до досягнення залишкової вологості $\leq 10\%$ [7].

Висновок. Ключовою інновацією є можливість сушіння безпосередньо після збирання (протягом 24 год), що дозволяє цілорічний видобуток розмаринової кислоти. Конвеєрна схема забезпечує безперервність процесу та рівномірність обробки.

1.5.8. US 11 540 536 B2 — Method for preserving plant material

Патентовласник: McCormick & Company **Дата видачі:** 2023

Анотація. Спосіб збереження рослинного матеріалу, що передбачає нанесення на сировину розчину частково водорозчинної солі та/або олії, після чого сушіння з МХ-опроміненням 10–100 Вт/г протягом 1–3 хв для нагрівання до температури, достатньої для інактивації більшості ферментів побуріння [8].

Висновок. Використання МХ-атрактантів (солей) суттєво підвищує рівномірність нагрівання і дозволяє знизити загальну щільність потужності, зберігаючи колір та антиоксидантні властивості продукту. Запатентований підхід є енергоощадним завдяки скороченню часу обробки до 3 хв.

1.5.9. CN 202 501 728 U — Microwave vacuum drying machine (continuous)

Патентовласник: Jiangsu Megaplant Co. (Китай) **Дата публікації:** 2012

Анотація. Корисна модель розкриває мікрохвильову вакуумну сушарку, що складається з завантажувальної вакуумної камери, мікрохвильової вакуумної камери та охолоджувальної розвантажувальної вакуумної камери, з'єднаних вакуумними клапанами, з покровим конвеєром у кожній секції. Порівняно з однокамерною МХ-вакуумною сушаркою, пристрій економить час за рахунок виключення необхідності підкачування вакууму після завантаження [9].

Висновок. Трисекційна безперервна схема вирішує головну проблему переривчастих вакуумних апаратів — тривалий цикл вакуумування / наповнення, збільшуючи продуктивність лінії у 2,5–3 рази при незмінному питомому енергоспоживанні.

1.5.10. CN 100 562 700 C — Method and apparatus for drying under reduced pressure using microwave (pulsed mode)

Патентовласник: Fujita Ikuzo (Японія) **Дата видачі:** 2009

Анотація. Метод вакуумного сушіння з використанням мікрохвиль, при якому МХ-перемикання здійснюється з визначеним циклом: продукт у вакуумованій камері підтримується нижче граничної температури, а нагрівання відбувається пульсами. Такий підхід дозволяє швидко сушити харчові продукти (молюсків, овочі, фрукти, м'ясо, рибу) без погіршення їх якості [10].

Висновок. Пульсований режим подачі МХ-енергії забезпечує рівномірний розподіл температури та запобігає локальному перегріву, характерному для безперервного МХ-нагрівання. Питома витрата електроенергії знижується на 25–40% порівняно з безперервним режимом тієї ж потужності.

Загальні висновки патентного пошуку

Аналіз відібраних патентних документів дозволяє виявити такі ключові тенденції у галузі енергоефективного МХ-сушіння рослинної сировини.

1. Домінування вакуумно-мікрохвильової технології. Переважна більшість патентів (7 з 10) стосується саме поєднання МХ-нагрівання з

вакуумом [1–5, 9, 10]. Зниження тиску дозволяє одночасно вирішити два завдання: знизити робочу температуру (захист термолабільних речовин) та прискорити масоперенос вологи.

2. Пульсований режим як ключ до рівномірності та енергозаощадження. Патенти EnWave Corp. [5] та японський [10] незалежно прийшли до висновку, що переривчаста подача МХ-енергії ефективніша за безперервну: знижує ризик іскріння у вакуумі, усуває «холодні зони» та зменшує загальне споживання електроенергії на 25–40%.

3. Гібридизація з РЧ-діапазоном. Патент [6] (2022) відкриває перспективний напрям — поєднання МХ (2,45 ГГц) з радіочастотним нагріванням (27 МГц), яке глибше проникає в матеріал і рівномірніше розподіляє тепло у великих завантаженнях.

4. Безперервні конвеєрні схеми. Перехід від камерних (batch) до безперервних (continuous) апаратів — характерна риса патентів 2010-х років [4, 7, 9], що дозволяє інтегрувати МХ-сушіння в промислові потокові лінії без втрати вакуумного режиму.

5. Захист біологічно активних речовин. У всіх патентах, присвячених лікарській і пряно-ароматичній сировині [1, 2, 7, 8], критерієм оптимізації є не лише час і енергія, а й збереження цільових компонентів (ефірних олій, гіперіцину, розмаринової кислоти, поліфенолів) на рівні 85–95% від вихідного вмісту.

Список патентних джерел

1. US 5 956 865 A. Process for drying herbs / Durance T., Wang J.H. — EnWave Corp. — 1999. — URL: <https://patents.google.com/patent/US5956865>
2. US 6 128 831 A. Process for drying medicinal plants / Durance T. — University of British Columbia. — 2000. — URL: <https://patents.google.com/patent/US6128831>
3. EP 2 568 830 A1. Plant material drying methods / EnWave Corporation. — 2013. — URL: <https://patents.google.com/patent/EP2568830A1/en>
4. US 9 267 734 B2. Microwave vacuum-drying of organic materials / EnWave

- Corporation. — 2016. — URL: <https://patents.google.com/patent/US9267734B2/en>
5. US 9 958 203 B2. Microwave vacuum-drying of organic materials (multi-generator) / EnWave Corporation. — 2018. — URL: <https://patents.google.com/patent/US9958203B2/en>
6. US 11 384 980 B2. System and method for reducing moisture in materials or plants using microwave radiation and RF energy / Drywave Technologies. — 2022. — URL: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/11384980>
7. US 9 839 661 B2. Plant material drying methods (mint / rosmarinic acid) / Durance T. et al. — 2017. — URL: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/9839661>
8. US 11 540 536 B2. Method for preserving plant material / McCormick & Company. — 2023. — URL: <https://image-ppubs.uspto.gov/dirsearch-public/print/downloadPdf/11540536>
9. CN 202 501 728 U. Microwave vacuum drying machine / Jiangsu Megaplant Co. — 2012. — URL: <https://patents.google.com/patent/CN202501728U/en>
10. CN 100 562 700 C. Method and apparatus for drying under reduced pressure using microwave / Fujita Ikuzo. — 2009. — URL: <https://patents.google.com/patent/CN100562700C/en>

1.6. Обґрунтування вибору мікрохвильового способу сушіння для реалізації мікрохвильової стрічкової сушарки

Перехід від конвекційних методів до мікрохвильових систем є стратегічним вектором збереження біоактивних сполук. Технологічна диференціація дозволяє радикально стабілізувати лабільні компоненти в умовах обробки. Це зумовлює необхідність детального розгляду технічних рішень, що формують конструктивні характеристики МХ обладнання для переробної галузі.

Мікрохвильове (НВЧ) сушіння ґрунтується на нагріванні матеріалу електромагнітним випромінюванням у діапазоні частот 300 МГц – 300 ГГц. У харчовій промисловості найчастіше використовується частота 2450 МГц

(довжина хвилі 12,2 см), що відповідає міжнародно стандартизованим ISM-частотам. Деяке обладнання промислового призначення також функціонує на частоті 915 МГц, яка забезпечує глибшу проникність НВЧ-поля у матеріал з більшим питомим розміром.

Механізм нагрівання при НВЧ-опроміненні принципово відрізняється від конвективного та кондуктивного: теплота генерується безпосередньо всередині продукту за рахунок діелектричних втрат. Молекули дипольного характеру (насамперед вода) безперервно переорієнтуються під дією змінного електромагнітного поля з надзвичайно високою частотою. Дисипація електромагнітної енергії у теплову відбувається внаслідок тертя між молекулами та іонної провідності. Таким чином, НВЧ-нагрівання є об'ємним процесом, що забезпечує одночасне прогрівання всього поперечного перерізу матеріалу.

З точки зору фізики процесу сушіння НВЧ-метод демонструє низку принципівих переваг. По-перше, виникнення зворотного (від центру до периферії) температурного градієнта: оскільки внутрішні шари матеріалу нагріваються інтенсивніше, створюється тиск пари, що виштовхує вологу назовні. Це означає, що вектори градієнта температури та концентрації вологи збігаються за напрямком, що принципово прискорює масопередачу на другому етапі сушіння – у зоні падаючої швидкості.

По-друге, завдяки вибіркового поглинання НВЧ-енергії вологими ділянками матеріалу досягається своєрідний ефект самоузгодженого регулювання нагрівання: ділянки з меншою вологістю поглинають менше енергії, що автоматично запобігає їх перегріву. Ця властивість особливо важлива при досушуванні продукту до низьких значень вологості.

Третьою суттєвою перевагою є компактність і швидкодія НВЧ-систем. Практика показує, що час сушіння при використанні мікрохвильового підведення теплоти скорочується у 2–10 разів порівняно з чисто конвективними методами. Це дозволяє суттєво зменшити виробничі площі та підвищити

продуктивність технологічної лінії без збільшення кількості апаратів.

Використання потокових систем з частотами 915/2450 МГц (найкраще в поєднанні з вакуумом в діапазоні 0.08–0.095 МПа) створює «золоту зону» температур (40–45°C), що запобігає руйнуванню хлорофілу та інших біологічно – активних компонентів рослинної сировини. МХ нагрівання забезпечує інтенсивний градієнт тиску для прискореної міграції вологи. Впровадження потокових установок є оптимальним для збереження функціональних властивостей рослинних матеріалів у промислових масштабах.

1.7. Аналіз енергетичної ефективності процесу сушіння мікрохвильовим способом

Попри очевидні переваги мікрохвильового підведення теплоти, промислове застосування НВЧ-сушіння стикається з рядом технічних і технологічних труднощів, що потребують цілеспрямованого вирішення.

Найбільш критичною проблемою є нерівномірність розподілу електромагнітного поля у робочій камері та, як наслідок, нерівномірне нагрівання матеріалу. Стоячі хвилі, що утворюються всередині металевій камері, спричиняють чергування зон підвищеного та зниженого поглинання НВЧ-енергії (вузлів та пучностей). Це може призводити до локального перегріву окремих ділянок продукту та теплового пробою – явища, при якому різке підвищення температури в зоні перегріву додатково збільшує поглинання енергії через зростання діелектричних втрат, що призводить до некерованого розігрівання і деградації матеріалу.

Другою серйозною проблемою є обмежена глибина проникнення НВЧ-випромінювання у матеріал. На частоті 2450 МГц глибина проникнення у вологі харчові продукти становить лише 1–3 см. Для товстошарових та великогабаритних об'єктів це означає нерівномірний розподіл виділення теплоти за поперечним перерізом. Застосування нижчих частот (915 МГц) частково вирішує цю проблему, але вимагає більш масивного та дорогого генераторного обладнання.

Ще одним аспектом, що обмежує широке впровадження НВЧ-сушіння, є складність масштабування технології з лабораторного до промислового рівня. Дизайн промислових мікрохвильових сушарок потребує детального математичного моделювання розподілу електромагнітного поля та теплових потоків у камері, що є задачею значної складності та вимагає залучення спеціалізованих програмних засобів.

Для подолання зазначених обмежень чисто мікрохвильового сушіння наукова спільнота та промисловість усе частіше звертаються до комбінованих методів, що поєднують переваги кількох способів підведення теплоти. Найбільш перспективним та технологічно відпрацьованим є поєднання НВЧ-нагрівання з конвективним видаленням вологи – так зване мікрохвильово-конвективне (МВ-конвективне) сушіння.

У цьому підході НВЧ-поле відповідає за інтенсивне об'ємне нагрівання матеріалу та генерацію внутрішнього тиску пари, тоді як конвективний потік повітря ефективно відводить звільнену вологу з поверхні продукту та запобігає її конденсації в холодніших зонах камери. Синергетичний ефект двох механізмів дозволяє досягти швидкості сушіння, що в 3–8 разів перевищує можливості чисто конвективних апаратів, водночас знижуючи ризик перегріву порівняно з чисто НВЧ-режимом.

Дослідження, проведені в Україні (зокрема на кафедрі ПОЕМ ОНТУ) та за кордоном, підтвердили доцільність комбінованого підходу для різних видів харчової сировини. Встановлено, що при МВ-конвективному сушінні пряно-ароматичних рослин вміст ефірних олій зберігається на рівні 85–95 % від початкового, тоді як при чисто конвективному сушінні – лише 50–70 %. Дослідження на зерновій сировині показали скорочення часу сушіння на 40–60 % при збереженні хлібопекарської якості зерна.

1.8. Висновки щодо вихідних параметрів та техніко – економічних обмежень при розробці енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки

Проведений аналітичний огляд сучасного стану технологій сушіння харчової сировини дозволяє сформулювати такі узагальнення та напрями подальшого дослідження.

По-перше, традиційні конвективні та кондуктивні методи сушіння, попри свою широку розповсюдженість, не задовольняють сучасних вимог до енергоефективності та якості продукту. Питомі витрати теплоти в 1,5–2,5 рази перевищують теоретичний мінімум, а тривале термічне навантаження на сировину призводить до деградації нутрієнтного складу.

По-друге, мікрохвильове підведення теплоти є теоретично обґрунтованим і практично перспективним методом інтенсифікації сушіння, що забезпечує об'ємний характер нагрівання та прискорення внутрішнього масопереносу вологи. Разом із тим ізольоване застосування НВЧ-впливу супроводжується ризиком нерівномірного нагрівання та теплового пробою, що вимагає поєднання з конвективним відведенням вологи.

По-третє, комбіноване НВЧ-конвективне сушіння у стрічкових апаратах є перспективним напрямом, що поєднує технологічну гнучкість і безперервність процесу з перевагами мікрохвильового підведення теплоти. Реалізація цього підходу у вигляді енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки є актуальним науково-технічним завданням.

З огляду на викладене, метою подальшого дослідження є розробка та обґрунтування конструктивно-технологічних рішень енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки для харчової сировини, що передбачає: аналіз принципів розподілу НВЧ-поля у робочій камері; розрахунок і оптимізацію режимних параметрів сушіння; оцінку енергетичної ефективності запропонованого технічного рішення; визначення раціональних умов застосування для конкретних видів харчової сировини.

Особливий науковий і практичний інтерес становить реалізація

комбінованого НВЧ-конвективного сушіння у стрічковому апараті – конструкції, що традиційно застосовується у харчовій промисловості для безперервного сушіння кускових і сипких матеріалів. Стрічкова компоновка забезпечує рівномірний рух матеріалу крізь зону дії НВЧ-поля, що є однією з умов отримання однорідного продукту за вологістю.

II. ТЕХНІЧНИЙ ПРОЕКТ МІКРОХВИЛЬОВОЇ СТРІЧКОВОЇ СУШАРКИ

Використання інноваційних МХ технологій сушіння доцільно розглядати як процес заміни традиційних конвективних сушарок на мікрохвильові. Для прикладу розглянемо варіант удосконалення ділянки сушіння в лінії переробки сої, де заміна конвективної сушарки на мікрохвильову є доцільною завдяки інтенсивнішому внутрішньому прогріванню бобів, що істотно скорочує тривалість сушіння (потенціально можливе зменшення часу сушіння в десятки разів). Це знижує питомі енерговитрати та підвищує теплову ефективність процесу. Об'ємний характер нагріву сприяє більш рівномірному розподілу вологи й кращому збереженню поживних речовин і якості сої порівняно з традиційним нагрівом гарячим повітрям. Крім того, мікрохвильове сушіння дозволяє інтегрувати одночасну сушку й знезараження, що покращує мікробіологічні показники сировини.

Технологічна лінія переробки сої призначена для приймання, переміщення, очищення, сушіння, тимчасового зберігання та підготовки бобів сої до подальшої переробки або відвантаження. Схема відображає послідовність основних операцій і взаємозв'язок між транспортними, очисними, сушильними та складськими машинами [10].

Головним завданням лінії є забезпечення стабільної якості сировини, зниження вологості до безпечного рівня, видалення домішок та зменшення втрат продукції під час проходження через усі стадії технологічного процесу.

Технологічний процес переробки сої будується за принципом послідовного проходження сировини через вузли приймання, очищення, сушіння, охолодження та накопичення. Така побудова дає змогу забезпечити безперервність виробництва, рівномірне завантаження машин і контроль якості на кожному етапі. Соя як сировина вимагає делікатного механічного поводження, оскільки насіння легко травмується при ударах, терті та надмірному нагріванні. Саме тому у технологічних лініях важливе значення мають м'які режими транспортування, ефективне очищення без пошкодження

оболонки та контрольоване сушіння з обмеженням температурного впливу.



Рис. 1. Технологічна лінія переробки сої.

На рисунку:

BDP-1000 – стрічкова сушарка використовується у виробничих лініях приготування соєвих текстуратів, кормів для домашніх тварин, гранульованих рибних кормів або у лініях із виробництва сухофруктів. Температура процесу сушіння: 60 ... 110 °С / температура продукту, що вивантажується: макс. 40 °С

LSG4 – Луцилка сої для зменшення вмісту клітковини у продуктах, отримання соєвого ядраз бобів та видалення насінневої оболонки.

E1000 – екструдер для термомеханічної обробки бобів сої з метою отримання повножирового продукту та інактивації антипоживних речовин

SF250 – гвинтовий живильник-транспортёр для подачі та охолодження продукту (сої/екструдату) між апаратами технологічної лінії.

OP-1000 – олійний прес для віджиму олії за один прохід для зниження вмісту олії в макусі з 15 ... 25% до 7 ... 9%.

OC-1000 – подрібнювач жмиху для подрібнення великих частин.

OE1000 – охолоджувач для охолодження сипучих продуктів відразу після екструдування або віджиму олії охолодження сипучих продуктів перед складуванням

SG-1 - вальцьова дробарка для подрібнення зерна, бобових і олійних культур між парою валків, продукт після переробки має фракцію приблизно 3–8 мм.

Особливості технологічного процесу.

Сушіння є одним із найвідповідальніших етапів переробки сої, оскільки саме на цій стадії формується придатність сировини до тривалого зберігання та подальшої технологічної переробки. Метою сушіння є зниження вологості бобів до рівня, за якого сповільнюються мікробіологічні, біохімічні та самозігрівальні процеси.

Для сої особливо важливо уникати надмірного теплового навантаження. Підвищена температура може викликати розтріскування оболонки, появу мікротріщин у сім'ядолях, погіршення товарних властивостей і зниження якості сировини для подальшого отримання олії або білкових продуктів.

Етап сушіння призначений для доведення вологості сої до стану, безпечного для зберігання, транспортування та подальшої переробки. Практичне значення цієї операції полягає в тому, що зменшення вологості підвищує стійкість продукту до псування, знижує інтенсивність дихання зерна і попереджає розвиток мікрофлори.

Сушіння сої є процесом тепломасообміну, під час якого до зерна підводиться теплота від сушильного агента, а надлишкова волога переходить із внутрішніх шарів насінини на поверхню і видаляється в навколишній потік повітря. Ефективність цього процесу визначається температурою сушильного агента, швидкістю його руху, початковою вологістю продукту, товщиною шару зерна та тривалістю перебування матеріалу в сушарці.

Соя відрізняється від багатьох зернових культур підвищеною чутливістю до температурного впливу та механічного пошкодження. Через це процес сушіння необхідно вести у м'якому режимі, не допускаючи різкого перегріву зерна та великих перепадів температури між ядром і поверхнею насінини. Надто інтенсивне сушіння може спричинити утворення тріщин, підвищення дробимості, погіршення сипкості та втрату якості під час наступного очищення, транспортування або зберігання. Тому для сої особливо важливими є рівномірність подачі, стабільний режим теплоносія та контроль кінцевої вологості.

У складі технологічної лінії для сої зазвичай застосовують шахтні, колонкові або інші сушарки безперервної дії. Їх конструкція має забезпечувати рівномірний рух продукту, однаковий контакт зерна з агентом сушіння, можливість регулювання температури та контроль тривалості перебування бобів у робочій зоні.

Вимоги до якості сушіння. Якісно висушена соя повинна мати рівномірну вологість по всій масі, не містити ознак термічного пошкодження та зберігати цілісність насіння. Важливо, щоб після сушіння і охолодження продукт був придатний до безпечного зберігання без розвитку самозігрівання, пліснявіння або злежування.

Можливі технологічні ризики

На етапі сушіння можуть виникати такі небажані явища:

- перегрівання зерна;
- розтріскування оболонки і підвищення дробимості;
- нерівномірне висушування маси;
- повторне зволоження при недостатньому охолодженні;
- зниження якості сої при порушенні режимів подачі та відведення повітря.

Для мінімізації цих ризиків необхідно забезпечити стабільну роботу сушарки, контроль температурних датчиків, рівномірне завантаження та своєчасне технічне обслуговування обладнання.

Висновок

Технологічна лінія переробки сої є сукупністю взаємопов'язаних машин і апаратів, що забезпечують послідовне доведення сировини до потрібного стану. Найбільш критичним етапом є сушіння, оскільки саме воно визначає придатність бобів до зберігання, ступінь збереження їхньої якості та ефективність подальшої переробки.

Раціональна організація сушильного процесу, правильний вибір режимів і узгоджена робота транспортного, очисного та складського обладнання забезпечують високу якість готової сировини та надійність функціонування всієї лінії.

2.1. Розрахунок основних параметрів та вибір конструктивних вузлів мікрохвильової стрічкової сушарки

Типова система мікрохвильового сушіння складається з мікрохвильового генератора (блок магнетронів) камери сушіння, вхідного та вихідного каналів подачі і виводу матеріалу з камери сушіння. В якості зразка для оцінки можливостей установки що розробляється можна обрати наступну модель: *Hybrid Microwave Tunnel 12 kW / 2450 MHz & 60 kW / 915 MHz* від компанії «Loyal Microwave Drying Machine Manufacturer». Це гібридний мікрохвильовий тунель потужністю 12 кВт на 2450 МГц та 60 кВт на 915 МГц є спеціалізованим обладнанням для досліджень у мікрохвильовій сушки рослинної сировини та харчових продуктів. Такі системи поєднують частоти для оптимального проникнення енергії: 915 МГц забезпечує глибше нагрівання товстих матеріалів, а 2450 МГц - поверхневе та швидке.

Основні характеристики:

Частоти та потужність: 12 кВт / 2450 МГц для поверхневого нагріву; 60 кВт / 915 МГц для глибокого проникнення в щільні продукти, як-от рослинна сировина чи зерно.

Гібридний дизайн: комбінує мікрохвилі з гарячим повітрям для ефективності 46-58%, скорочуючи час сушки до 35 хв і енерговитрати на 26%.

Продуктивність: в діапазоні 100-2000 кг/год залежно від моделі, з конвеєрною стрічкою та контролем вологості.

Застосовується в харчовій промисловості для мікрохвильової сушки макаронів, зерна, мигдалю чи рослинної сировини, де 915 МГц проникає глибше в щільні форми. Ідеально для досліджень мікрохвильової сушки рослинної сировини, автоматизації процесів та тестування параметрів. Такі тунелі мають на 90% меншу площу порівняно з традиційними сушарками.

Опис установки. Мікрохвильова камера у вигляді тунелю з конвеєрною стрічкою покритою тефлоном, що витримує температуру до 200 °С. Режим коливань обирається і регулюється, конструкція камери дозволяє практично

визначати необхідну та оптимальну довжину мікрохвильової зони. Система витяжки та нагрівання повітрям виготовлена з труби Ø 100 мм, і має підключення для вимірювання потоку викидів. Установка забезпечує безконтактне вимірювання температури поверхні матеріалу, що обробляється за допомогою чотирьох ІЧ-пірометрів.

Керування процесом – програмне, за допомогою ПЛК із сенсорною панеллю 12". Програма керування забезпечує просте програмування рецептів для автоматичного режиму роботи установки. Глибину проникнення мікрохвиль і розподіл температури в продукті можна визначити експериментально за допомогою оптоволоконного 8-канального приладу для вимірювання температури.

Технічні дані:

Діапазон частот магнетронів: 2445...2470 МГц / 900...930 МГц

Мікрохвильова потужність: 12 x 1 кВт 1 x 60 кВт (плавно регульована)

Напруга живлення: 3 ф x 400 В змінного струму, 50 Гц

Загальне підключене навантаження: макс. 54 кВА

Швидкість стрічки: 0,1 - 3,0 м/хв.. (регулюється)

Нагрівання гарячим повітрям: макс. 3000 м³/год, нагрів ≤80°C

Конвеєрна стрічка покрита тефлоном і термостійка до 200°C.



Рис. 2. МХ сушарка Hybrid Microwave – загальний вид

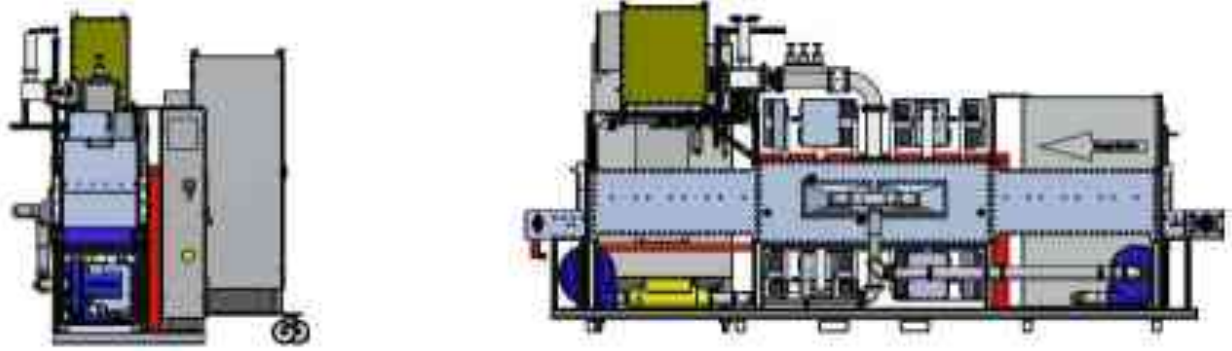


Рис. 3. МХ сушарка Hybrid Microwave Tunnel 12 kW / 2450 MHz & 60 kW / 915 MHz від компанії «Loyal Microwave Drying Machine Manufacturer»..

Елементи конструкції тунелю: каркас з алюмінієвих профілів, симетрична установка НВЧ-генераторів нижче (6) і вище (6) конвеєрної стрічки

Розміри:

Корисна довжина 2000 мм

Корисна ширина 600 мм

Корисна висота 117 мм

Загальна довжина 6017 мм

Загальна ширина 2500 мм

Загальна висота 2840 мм

Вага при бл. 3500 кг

Перед прийняттям конструктивних рішень, щодо розробляємої енергоефективної мікрохвильової сушарки, підсумуємо **основні технічні та процесові особливості мікрохвильових сушарок.**

Процес мікрохвильового нагрівання чистий, без викидів будь-яких газів чи залишків. Мікрохвильове тепло проникає як у поверхню, так і всередину предмета, поміщеного для обробки. Висока швидкість нагрівання скорочує загальний час обробки. Процес нагрівання в мікрохвильовій установці легко контролюється. За рахунок нагрівання матеріалу зсередини досягається найкращий результат сушіння. Вартість виробництва за допомогою мікрохвильових сушарок нижча, ніж у конвективних сушарок з повітряним потоком або прямою теплопередачею.

МХ установки дуже компактні. В якості генераторів МХ випромінювання використовуються магнетрони виробництва Panasonic (Японія)/IBF (Німеччина)/Hitachi (Японія). Для керування процесом використовують програмовані логічні контролери, що забезпечує високу керованість та точність. Елементи безпеки (електричної та теплової) для мікрохвильового генератора та персоналу є невід'ємною частиною системи керування. Продуктивність МХ установки регулюється в широких межах зміною швидкістю стрічки та товщиною шару продукту, що обробляється. Потужність МХ впливу на матеріал можна легко змінювати від 0 до 100% від максимальної. Контроль температури продукту можливий як на виході так і в проміжних точках процесу сушіння. Мікрохвильовий нагрів можна використовувати в будь-якому типі сушіння, якщо він спроектований правильно.

Завданням на проектування є розробка технічного проекту енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки з декількома магнетронами, що здійснюють сумісне та циклічне нагрівання рухомого плоского потоку сировини, розміщеної тонким шаром на конвеєрній стрічці. За результатами досліджень [1, 2] більш ефективними є однооб'ємні (однокамерні) конструкції, які за рахунок інтерференції хвиль різних магнетронів більш ефективно розподіляють енергетичний вплив на матеріал в камері. На відміну від багатокамерних конструкцій, де кожна сушильна камера є окремим герметичним модулем, у такій конструкції весь робочий простір є єдиною суцільною камерою-резонатором, а рівномірність обробки забезпечується просторовим розподілом декількох магнетронів вздовж її довжини та алгоритмічним циклічним управлінням їхньою роботою.

Вихідними даними для розрахунків сушарки є параметри потоку вологої сировини, що обробляється в безперервному режимі. Як основна сировина розглядаються зернові та бобові культури з розміщенням на стрічці тонким шаром висотою близько 20 мм та питомим навантаженням на стрічку до 4,0 кг/м². Фізичні параметри сушарки оберемо з умови її зручного фізичного інтегрування в промислове середовище: ширину стрічки оберемо 500 мм а

загальну довжину конвеєра – 6000 мм. В разі необхідності отримання високої продуктивності, конструкція сушарки може бути масштабованою як по ширині стрічки так і по довжині камери.

Принципова відмінність однокамерної конструкції від модульної (багатокамерної) полягає в тому, що єдиний прямокутний металевий корпус слугує водночас і резонатором, і сушильним простором. Магнетрони в кількості 8–10 одиниць рівномірно розміщуються по верхній стінці корпусу вздовж всієї його довжини (крок розміщення – 600 мм). Кожен магнетрон живиться через власний силовий трансформатор і підключається до системи управління, що забезпечує циклічне (почергове або групове) вмикання генераторів [3, 4].

Основними конструктивними перевагами однокамерної схеми є:

- спрощення механічної конструкції – відсутність тунелів-з'єднувачів між камерами, менша кількість зварних швів та фланцевих з'єднань;
- краще використання об'єму резонатора – мікрохвильове поле заповнює весь робочий простір, що підвищує рівномірність нагрівання сировини по довжині стрічки;
- зниження технологічного ризику перегріву – циклічне вмикання магнетронів забезпечує рівномірний теплообмін та запобігає локальному перегріву продукту;
- масштабована продуктивність – кількість одночасно активних магнетронів регулюється програмно без механічних змін конструкції;
- гнучке налаштування профілю сушіння – шляхом завдання різної інтенсивності та тривалості імпульсів для кожного магнетрона можна формувати необхідний градієнт потужності вздовж стрічки (наприклад, підвищена потужність на вході, знижена – на виході).

2.2. Розрахунок параметрів транспортного механізму сушарки

Як визначено в попередньому розділі, основою мікрохвильової сушильної установки є стрічковий конвеєр. Основним елементом конвеєра є транспортерна стрічка. У харчовій промисловості широко використовують пластикові модульні стрічки та сітчасті синтетичні стрічки. Сучасні матеріали та конструкції стрічок дозволили більшою мірою відповідати експлуатаційним вимогам за рахунок захоплень, шевронів, гофробортів, спеціальних покриттів та інших розробок.

Стрічковий конвеєр - транспортуючий пристрій безперервної дії. Стрічкові конвеєри є найпоширенішим типом машин конвеєрного транспорту. Перевага стрічкових конвеєрів перед іншими способами транспортування полягає в тому, що завдяки значній швидкості руху стрічки забезпечується висока ефективність та продуктивність технологічних процесів, у малому споживанні енергії, простоті, надійності та довговічності конструкції пристрою.

Транспортуючі машини відрізняються високою надійністю, зручністю експлуатації та обслуговування, працюють в комплексі з технологічним обладнанням, забезпечують високу продуктивність завдяки безперервності процесу. Одночасно з транспортуванням вантажів на стрічкових конвеєрах можуть виконуватись технологічні операції. Стрічковий конвеєр часто є однією з частин транспортуючого пристрою машини або системи.

Конвеєри та конвеєрні системи для харчової галузі є надійним технічним обладнанням, яке підвищує ефективність виробництва.

2.2.1. Вибір конструкції стрічкового конвеєра установки

Конвеєр та елементи, що входять до його конструкції, представлені на рис.3. Безперервний рух вантажу здійснюється за допомогою нескінченної транспортерної стрічки 6. Стрічка, як правило, приводиться в рух приводним барабаном 8 на одному кінці і проходить навколо барабана 7, що вільно обертається, на іншому кінці, який часто буває натяжним, так як

встановлюється в натяжний пристрій 4 і представляє загальну конструкцію.

При обертанні приводного барабана 8 стрічка 6 приводиться в рух. Для запобігання провисанню стрічки встановлюються верхні 7 та нижні 10,11 роликоопори. Ведучий барабан обертається від двигуна 14 через редуктор 13. Для збільшення кута охоплення призначений відхиляючий барабан 9. Для попередження самовільного зворотного руху стрічки після зупинки привод конвеєра обладнують гальмом 15. Усі складові одиниці конвеєра монтуються на рамі 12.

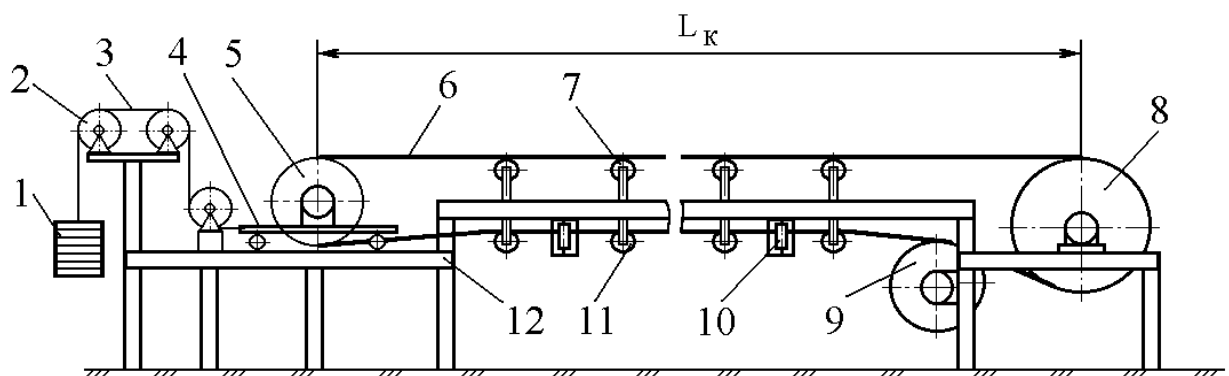


Рис. 3. Стрічковий конвеєр - конструктивна схема

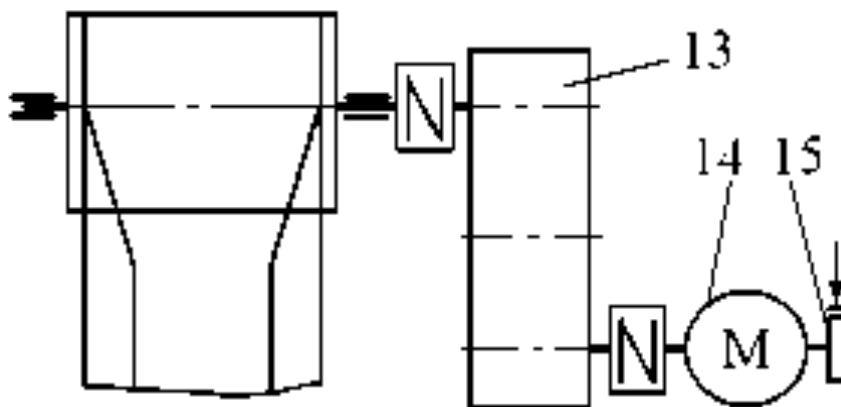


Рис. 4. Стрічковий конвеєр - кінематична схема привода.

Щоб уникнути провисання стрічки між роликооперами, а також збільшити тягове зусилля, стрічка попередньо натягується за допомогою гвинтового (при незначній довжині) або вантажного (при значній довжині) натяжного пристрою. Вантажний натяжний пристрій складається з візка 4, на якому встановлено натяжний барабан 5, вантажу 1, каната 3 та відхиляючих блоків 2. Зовнішня поверхня стрічки може підтримуватися за допомогою

роликів, що вільно обертаються, або відповідного настилу.

Продуктивність стрічкового конвеєра залежить від ширини й швидкості стрічки, форми траси, виду матеріалу, що транспортується, та лежить у широких межах – від декількох десятків до тисяч тонн за годину.

Стрічкові конвеєри, які випускаються серійно, мають ширину стрічки до 2 м та швидкість руху від 1 до 3 м/с.

Стрічкові безроликові конвеєри застосовуються для переміщення насипного або штучного вантажу по горизонталі або під кутом трохи більше 15°. Робоча гілка стрічки, що несе на собі вантаж по всій довжині, спирається на суцільний металевий настил, холоста гілка - на напівкруглі ребра або суцільний настил.



Рис. 5. Загальний вид без роликового конвеєра типу ТБ.

Рух на привідний барабан передається від приводу, який складається з редуктора та електродвигуна з'єднаних муфтами. Всі вузли, у тому числі завантажувальний і розвантажувальний очищаються, та мають направляючі елементи. Пристрої закріплюються на зварній рамі, конвеєр призначений для горизонтального або похилого переміщення сипучого матеріалу, шматкових або штучних вантажів.

Горизонтальний стрічковий конвеєр є одним із найпоширеніших видів

транспортерів, які мають широку сферу застосування. Вони використовуються як у промисловому виробництві, так і на базах та складах.

Конвеєри з модульною стрічкою. Переваги конвеєрів із модульною стрічкою: високий рівень зносостійкості, отже, великий експлуатаційний ресурс; стійкість до впливу кислот, жирів та маслянистих субстанцій; легка заміна окремих модулів, що суттєво знижує витрати на ремонт; обладнання придатне для експлуатації у найважчих умовах.



Рис. 6. Конвеєр із модульною стрічкою

Такий вид конвеєрів широко застосовується у харчовій промисловості. Завдяки модульній системі складання вони дозволяють створювати гнучкі лінії довжиною до 400 метрів, змінювати напрямок вантажу та переміщувати вантаж з однієї лінії на іншу.

Зважаючи на всі позитивні сторони різних типів стрічкових конвеєрів, для реалізації конструкції стрічкової МХ сушарки слід обрати конвеєр безроликового типу, так як розміщення роликів всередині сушильних камер буде недоцільним, і стрічка конвеєра має рухатись безпосередньо по внутрішній поверхні нижньої металевої стінки сушильної камери.

Як більш універсальний варіант можна розглянути модульну систему, тоді групи сушарок можна розміщати паралельними групами з поворотом стрічки на 180.

Вибір конвеєрної стрічки. Стрічка є одночасно вантажонесучим та

тяговим органом стрічкового конвеєра. Її міцний матеріал допомагає транспортувати найрізноманітніші сипкі, шматкові та штучні вантажі. Конвеєрна стрічка дозволяє переміщувати матеріали на великі відстані. Її застосування робить виробничий процес економічним і практично безперебійним. Матеріали та конструктивні особливості стрічок залежать від типу продукції, що транспортується.

Конвеєрні стрічки повинні мати високу міцність для забезпечення передачі тягового зусилля, поперечну гнучкість, що сприяє утворенню жолоба, обмеженим подовженням для забезпечення мінімального ходу натяжних пристроїв конвеєра, зносостійкістю обкладки, стійкістю до ударних навантажень, порізів і поривів, розшарування, комах, навколишнього середовища. Стрічки повинні мати мінімальну товщину для зменшення можливості розшарування при обгинанні барабанів, зберігати міцнісні та геометричні характеристики в процесі експлуатації. Оптимальною вважається конвеєрна стрічка, що має мінімальну вартість та достатню довговічність. Спеціальні типи стрічок повинні мати також негорючість, зберігати працездатність при низьких температурах, мати низьке набухання в різних середовищах, забезпечувати, можливо, більш тривалий опір тепловим навантаженням, дозволяти транспортування непакованих харчових продуктів. Експлуатаційні вимоги до конвеєрних стрічок обумовлюють застосування відповідних гум та армуючих матеріалів у тяговому шарі.

Основні вимоги до конвеєрних стрічок:

- 1) висока міцність у напрямі дії тягового зусилля;
- 2) висока поздовжня жорсткість під час розтягування для забезпечення малого пружного подовження при робочих навантаженнях і, отже, невеликого ходу натяжного пристрою;
- 3) еластичність стрічки в поздовжньому та поперечному напрямку;
- 4) мале залишкове подовження у процесі експлуатації;
- 5) висока міцність втоми;
- 6) опірність ударним навантаженням у зоні завантаження конвеєра та при

проходженні роликоопор;

- 7) стійкість обкладок стрічки проти абразивного зношування;
- 8) малі гістерезисні втрати при деформуванні стрічки на трасі конвеєра;
- 9) збереження геометричних та міцнісних властивостей у процесі тривалої експлуатації.

У деяких випадках до стрічки пред'являються особливі вимоги, наприклад теплостійкість як у варіанті з МХ сушаркою.

Найважливішими розрахунковими параметрами стрічки є: ширина, прокладки каркасу, міцність при розриві, відносне подовження і товщина обкладок. Ширина стрічки визначається природою та фракцією матеріалу, який може транспортуватися даною стрічкою та приймається розрахунковим шляхом залежно від швидкості транспортування вантажу, продуктивності конвеєра. Міцність на розрив (максимальне зусилля, яке можна довго допустити у даній стрічці) визначає максимальну можливу довжину конвеєра, встановлену потужність, конструкцію приводу, а з урахуванням відносного подовження стрічки - конструкцію натяжного пристрою. Міцність стрічки на розрив визначається типом основи та числом прокладок чи тросів у ній. Удосконалення стрічок відбувається шляхом підвищення їхньої номінальної міцності при розриві, зносостійкості, зменшення відносного подовження та спеціальних промислових вимог.

Залежно від методики виробництва конвеєрна стрічка буває кількох видів: гумотканинна, резинотросова, модульна, сітчаста. За типом несучої поверхні: з прямою гладкою поверхнею стрічки, з рифленою поверхнею стрічки, з шевронною поверхнею стрічки, з перегородками (захопленнями), з гофробортом (бортиками). Залежно від методики виробництва конвеєрна стрічка буває кількох видів: гумотканинна, резинотросова, модульна, сітчаста.

За типом несучої поверхні: з прямою гладкою поверхнею стрічки, з рифленою поверхнею стрічки, з шевронною поверхнею стрічки, з перегородками (захопленнями), з гофробортом (бортиками). Залежно від методики виробництва конвеєрна стрічка буває кількох видів: гумотканинна,

резинотросова, модульна, сітчаста. За типом несучої поверхні: з прямою гладкою поверхнею стрічки, з рифленою поверхнею стрічки, з шевронною поверхнею стрічки, з перегородками (захопленнями), з гофробортом (бортиками).

Спеціальні стрічки для харчової промисловості, які мають допуск для прямого контакту з продуктом:

Butyl – робоче покриття з бутилової гуми; застосовуються у виробництві молочних виробів для заморозки: морозиво, фрукти, овочі, пельмені і т.д.;

Silam HVS стрічки із силіконовим покриттям; ці стрічки незамінні: при виробництві карамельних виробів, жувальної гуми, транспортуванні гарячої випічки у хімічній промисловості;

Nitrile - робоче покриття на основі карбоксилатних нітрільних каучуків з високою зносостійкістю застосовується у цукровій промисловості;

Fabric – тканинне покриття; використовується у харчовому виконанні при хлібопеченні.

Для конструкції стрічкового сушильного мікрохвильового апарату з комбінованим способом видалення вологи до стрічки конвеєра, окрім загальних вимог до конвеєрних стрічок пред'являються наступні специфічні вимоги:

- стрічка має бути неметалева (радіопрозора) так як металеві елементи спричинять її нагрівання мікрохвильовим випромінюванням в сушильних камерах.
- довжина конвеєра сушильної установки відносно невелика – 6 м, що означає невисокі вимоги до міцності стрічки;
- навантаження стрічки буде складати тонкий шар сипучої рослинної сировини (наприклад бобів) товщиною в 20-30 мм., що також зменшує вимоги до міцності так як питоме навантаження на стрічку має складати в межах $4,0 \text{ кг/м}^2$, тобто в загальне навантаження на стрічку конвеєра установки довжиною 6000 мм та шириною 500 мм складатиме близько 12 кг.

Для конвеєра стрічкової МХ сушарки оптимально обрати поліуретанову

(TPU) або ПВХ стрічку з PTFE-просоченням. Це оптимальний вибір для конвеєрної стрічки МХ-сушарки шириною 500 мм і довжиною 6000 мм: витримує температури до 120–150°C, низьке поглинання МХ-енергії (<0.01), антипригарна для сировини.

Характеристики матеріалів:

TPU (термопластичний поліуретан): Харчовий, стійкий до олій/жирів, товщина 1.5–3 мм, корд EP (поліестер+поліамід). Приклади: Siegling Transilon, Ammeraal Beltech.

ПВХ з тефлоном (PTFE): Дешевий матеріал, гладка поверхня, ширина 500 мм стандартна.

Слід уникати гумової (розтріскується від МХ) та металевої (нагрівається).

Таблиця 1. Параметри матеріалів конвеєрних стрічок

Матеріал	Макс. Т (°C)	Поглинання МХ	Ціна (грн/м)	Приклад
TPU	150	Низьке	800–1200	Siegling 1.5 мм
ПВХ/PTFE	120	Дуже низьке	500–800	Nabasit PVC
Силікон	200	Середнє	1500	Для високих Т

Стрічка безшовна або з вулканізацією стиків, натяг 2–5%.

2.2.3. Вибір барабанів стрічкового конвеєра

Барабани є одним із основних елементів стрічкового конвеєра. Залежно від виконуваної функції у роботі конвеєра, вони можуть бути: приводні та натяжні. У свою чергу, натяжні барабани бувають хвостовими, головними, оборотними, обвідними, притискними, відхиляючими. У зв'язку з цим барабани мають різні конструкції. Виробники комплектуючих стрічкових конвеєрів пропонують широку лінійку конструкцій барабанів. Барабан приводний встановлюється на вал, так як він передає рух конвеєрній стрічці за рахунок крутного моменту, що передається, і певної швидкості (рис. 7).

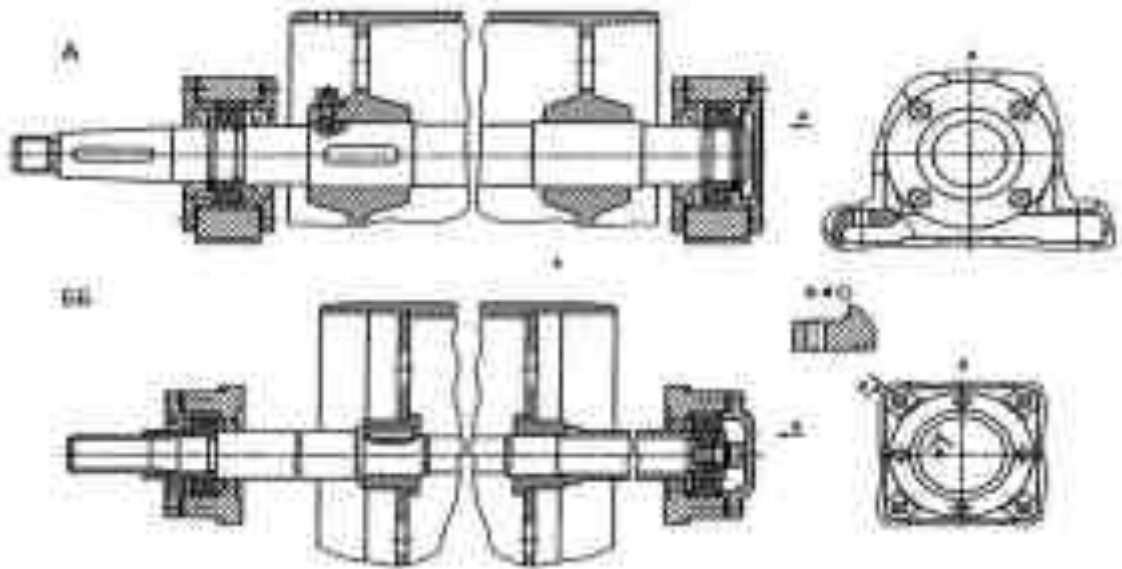


Рис. 7. Барабани приводні на валу: А – литий; Б - зварний

Барабани натяжні та відхиляючі встановлюються на осях рухливих та нерухомих (рис. 8).

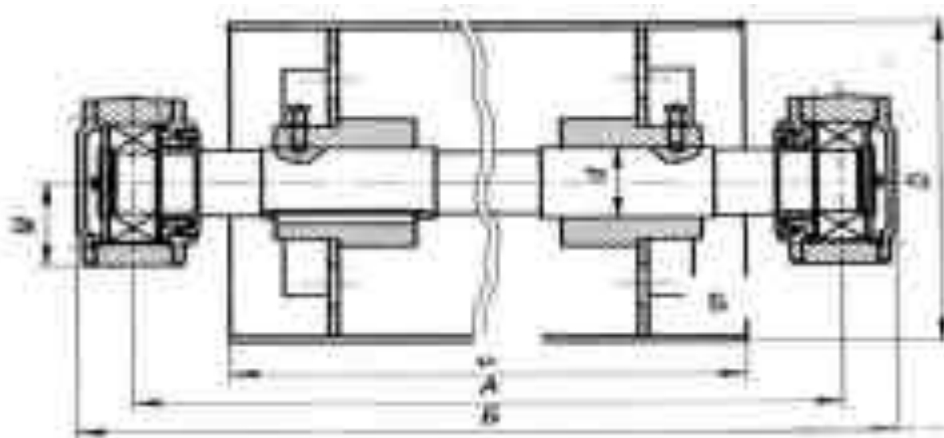


Рис. 8. Натяжний барабан

Усі види барабанів (привідні, натяжні, що відхиляють) повинні забезпечувати рівномірність руху та оптимальне натягнення конвеєрної стрічки під час виробничого процесу. Так як приводний барабан встановлюється на рамі конвеєра у підшипникових корпусах, тому можлива неточність монтажу. Для компенсації неспіввісності установки барабана застосовуються самовстановлювані дворядні сферичні підшипники. Саме діаметр підшипника так само, як і ширина конвеєрної стрічки є визначальними факторами при виборі типу барабана. Розмір консолі приводного валу залежить від типу редуктора та способу з'єднання приводу та приводного барабана. Натяжні і

відхиляючі барабани не передають момент, що крутить, тому вони встановлюються на осі в кулькових радіальних підшипниках.

Кожен барабан розрахований на певну потужність конвеєра. Тому до найважливіших параметрів цього механізму відносяться міцнісна та функціональна характеристики. Чим більше величина крутного моменту і чим вище допустиме навантаження на стрічку, що рухається, тим вище міцнісна характеристика барабана. Функціональна характеристика визначається розрахунковими формулами сили тертя між стрічкою та барабаном. Для збільшення сили тертя (коефіцієнта тертя) стрічки на барабані поверхня його може бути футерована гумою, еластомером, наприклад, нітриловий каучук (твердість 60-80) або уретан (твердість 80-90). Такі фрикційні покриття можуть бути використані у формі труби, листа або розпиленням (рис.9).



Рис. 9. Приводні барабани футеровані гумою

Мінімальні діаметри барабанів визначаються від його призначення навантаження, в основі якого розуміється максимальний натяг стрічки, величина окружного зусилля крутного моменту, що передається (рис.10).

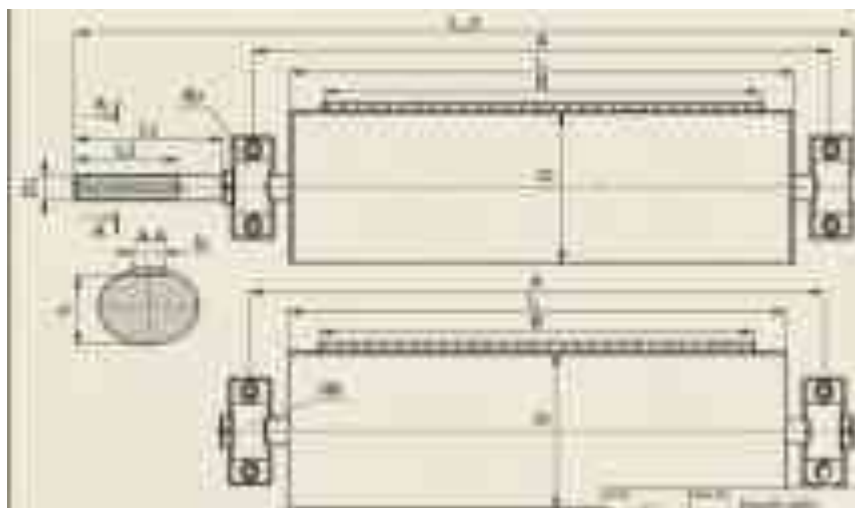


Рис. 10. Барабан приводний, непривідний: - ширина стрічки; D – діаметр

барабана; $D1$ – діаметр валу; $L_{заг}$ - загальна довжина валу; L – довжина обічайки барабана; $L1$ – довжина консолі; $L2$ – довжина шпонки; d_p – діаметр підшипника; A – приєднувальний розмір до рами конвеєра.

Висновок. Для конвеєра мікрохвильової стрічкової сушарки, враховуючи незначну відстань перенесення вантажу та мале питоге навантаження стрічки доцільно використати зварні, гладкі, сталеві привідний і натяжний барабани, діаметр яких розрахуємо відповідно до моменту опору стрічки з продуктом під час транспортування навантаження.

2.2.4. Вибір натяжного пристрою конвеєра

За допомогою натяжного пристрою в стрічці конвеєра створюється натяг необхідний для щільного прилягання стрічки до барабанів і створення сили тертя достатньої для протягування стрічки з шаром продукту через зрну сушіння. Тягове зусилля на приводному барабані, що забезпечується за рахунок сили тертя, що виникає між стрічкою та поверхнею барабана має бути достатнім не лише для нормального режиму роботи конвеєра а й для старту коли зусилля досягає максимуму. З часом повздовжній розмір стрічки збільшується (матеріал розтягується) що приводить до її провисання і зменшення сили тертя між стрічкою та барабаном. При неконтрольованому процесі сила тертя зменшується настільки, що зусилля опору стрічки перевищує силу тертя, як наслідок виникає «буксування» стрічки і порушується процес транспортування. В разі сушарки зменшення швидкості транспортування сировини через камеру сушіння гарантовано приведе до пошкодження сировини а в найгіршому варіанті до її загоряння. Ситуація ускладнюється тим, що нагріта сировина частину тепла передаватиме стрічці а це приведе до періодичного і неконтрольованого термічного розширення матеріалу стрічки. Натяжний пристрій у процесі роботи та конвеєра постійно компенсує розширення (видовження) стрічки, незалежно від причини цього явища. В залежності від довжини та навантаження конвеєра, стрічка довгих та

високонвантажених конвеєрів розтягується більше, використовують різні типи натяжних пристроїв, здатних компенсувати ослаблення (видовження) стрічки.

В часті силового елемента в натяжному пристрою використовують відомий барабан конвеєра. В деяких конструкціях використовують додатковий натяжний барабан встановлений на холостій гілці з утворенням петлі стрічки конвеєра. Натяжні пристрої за способом дії та конструкції класифікують на механічні; пневматичні; гідравлічні; вантажні (рис. 11).

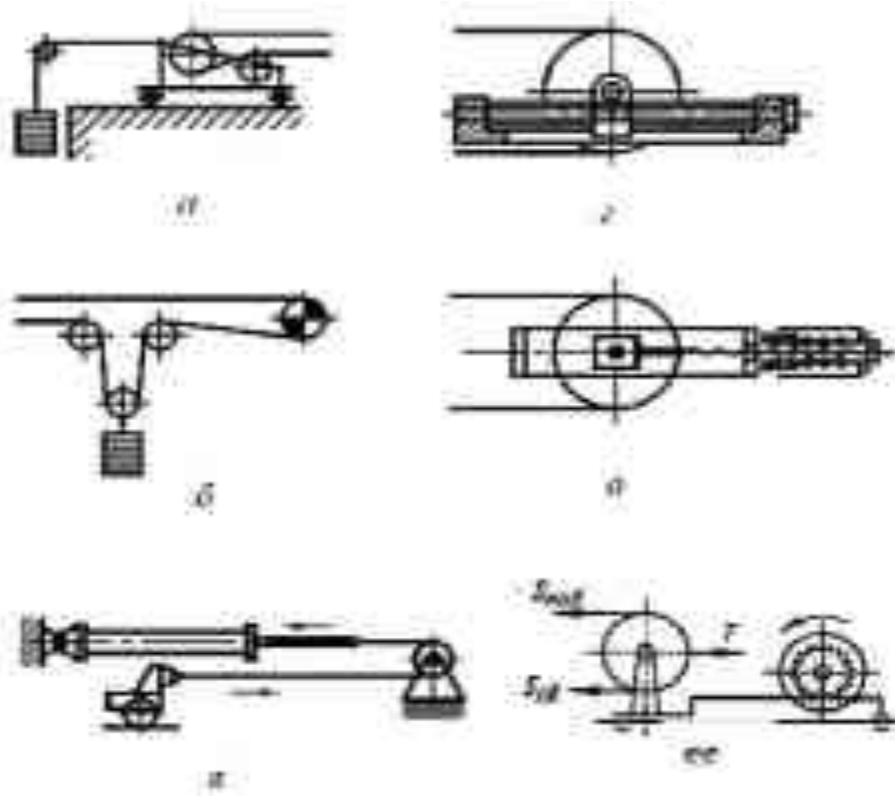


Рис. 11. Натяжні пристрої: а – хвостове вантажне; б - проміжне вантажне; в - гідравлічне (пневматичне); г - гвинтове; д- пружинно-гвинтове; е - рейкове

Вантажні натяжні пристрої поділяються на вантажні візкові та вантажні вертикальні (рамні). Кожен із названих натяжних пристроїв складається з натяжного візка (або натяжної рами) та вантажного пристрою. Вантажні пристрої можуть бути без поліспаду, з поліспастом або вантажобідні Переваги механічних натяжних пристроїв: - простота конструкції; малі габаритні розміри; компактність. Недоліки механічних натяжних пристроїв: нестабільний натяг у процесі експлуатації конвеєра; можливість надмірного натягу тягового

елемента; жорсткість кріплення та відсутність рухливості при випадкових перевантаженнях; необхідність періодичного спостереження та підтягування.

Переваги вантажного натяжного пристрою: працює під дією вантажу, автоматично забезпечує постійне зусилля натягу стрічки; компенсує зміни довжини тягового елемента; зменшує пікові навантаження під час перевантажень. Недоліки вантажного натяжного пристрою: великі габаритні розміри; велика маса вантажу для потужних та довгих стрічкових конвеєрів.

Пневматичні та гідравлічні натяжні пристрої мають малі габаритні розміри, але потребують встановлення спеціального обладнання для подачі під постійним тиском повітря або олії.

Вибір типу натяжного пристрою залежить від довжини конвеєра, схеми траси, умов розміщення пристрою та інших умов. В основному на конвеєрах, що використовуються в хімічній та харчовій промисловості, використовують механічні (гвинтові) натяжні пристрої (рис. 12).

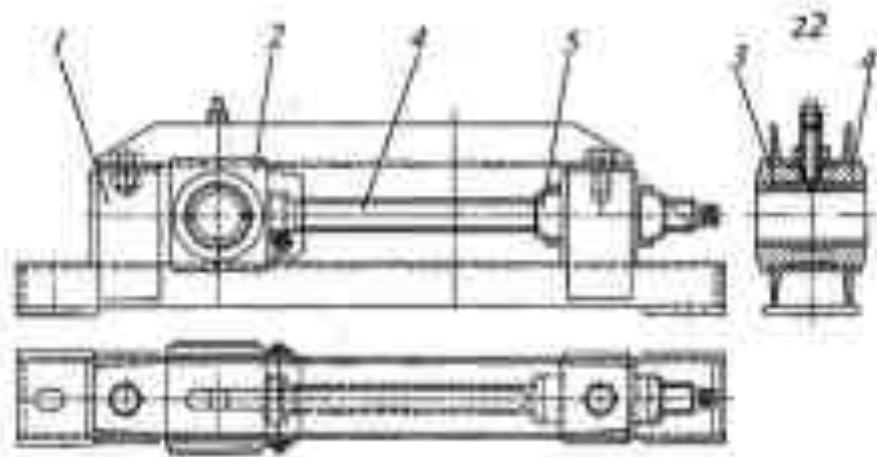


Рис. 12. Гвинтовий натяжний пристрій: 1 – корпус; 2 – повзун; 3 – вкладиш; 4 – гвинт; 5 – гайка

Довжина ходу барабана натяжного пристрою має бути (1,5-2)% від довжини конвеєра. Гвинтові натяжні пристрої слід застосовувати за довжини конвеєра що не перевищує 50 м. Довжина ходу натяжного барабана гвинтового пристрою повинна бути 320 мм (для конвеєрів довжиною до 15 м); 500 мм (для конвеєрів до 25 м) та 800 мм (для конвеєрів довжиною 25-50 м). Типорозмір

гвинтового натяжного пристрою слід приймати в залежності від типорозміру приводного барабана. З метою зменшення габаритів конвеєра рекомендується встановлювати гвинт у рамках контуру стрічки, тобто щоб гвинт працював на деформацію стиснення (рис. 13).

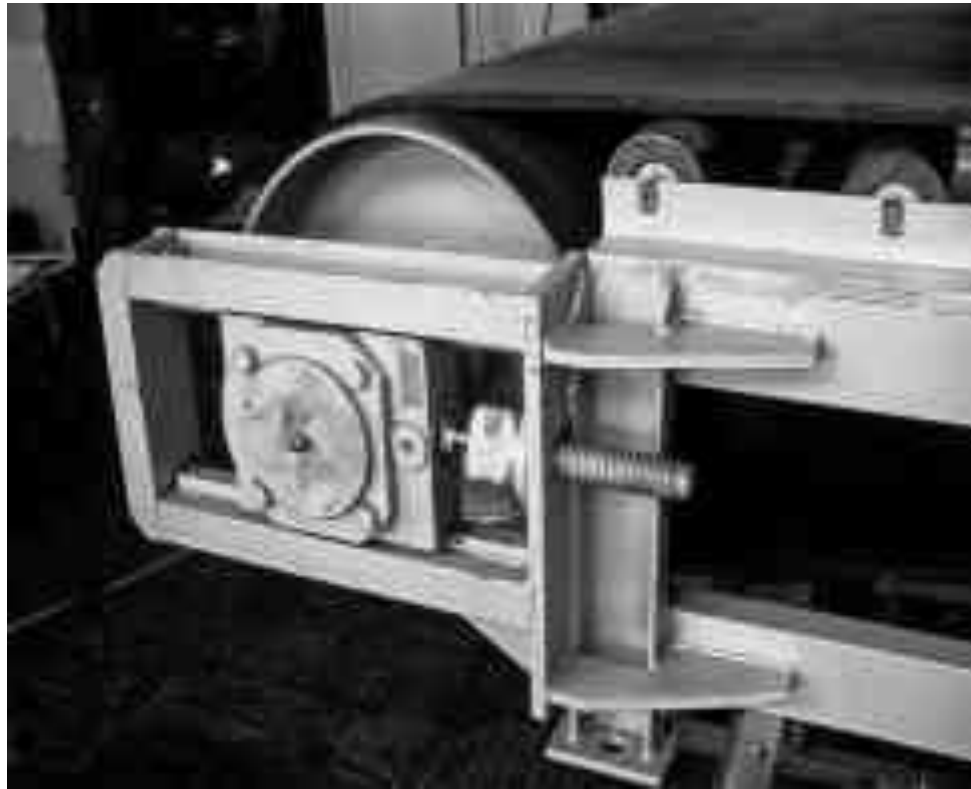


Рис.13. Установка гвинтового натяжного пристрою

Висновок. Зважаючи на довжину стрічки конвеєра сушарки (6,0 м), її невелику ширину, синтетичний матеріал, що зберігає високу силу зчеплення з поверхнею гладкого сталюого привідного барабана та враховуючи необхідність зберігати компактні розміри апарату оберемо для приводу конвеєра сушарки типовий гвинтовий натяжний пристрій (рис. 13).

2.2.5. Кінематичний розрахунок приводу конвеєра

Привід – електромеханічний пристрій для приведення в рух стрічки конвеєрів. Призначення приводу - створити тягове зусилля на приводному барабані достатнє для гарантованого переміщення стрічки з заданою швидкістю разом з вантажем, як у момент пуску конвеєра (найбільше навантаження), так і в стаціонарному режимі.

Найбільш надійним та конструктивно простим для стрічкових конвеєрів загального призначення, зокрема, для харчової промисловості, є однобарабанний привід. При виборі типу редуктора для приводу робочого органу (пристрою) необхідно враховувати багато факторів, найважливішими з яких є: значення та характер навантаження, необхідна довговічність, надійність, ККД, маса та габаритні розміри, вимоги до рівня шуму, вартість виробу, експлуатаційні витрати.

З усіх видів передач зубчасті передачі мають найменші габарити, масу, вартість та втрати на тертя. Коефіцієнт втрат однієї зубчастої пари при ретельному виконанні та належному мастилi не перевищує зазвичай 0,02-0,03. Зубчасті передачі в порівнянні з іншими механічними передачами забезпечують високу надійність роботи, сталість числа передачі через відсутність прослизання і дозволяють обрати редуктор в широкому діапазоні швидкостей та числа передачі. Ці властивості забезпечили широке використання зубчастих передач, вони застосовуються для всього діапазону потужностей, від малих (у приладах) до вимірюваних десятками тисяч кіловат.



Рис.14. Привідна станція високонавантаженого стрічкового конвеєра

Електромеханічний привод стрічкового конвеєра складається з електродвигуна та механічної частини, що складається з редуктора та при необхідності відкритої передачі. У стрічкових конвеєрах загального

призначення переважно застосовуються асинхронні з підвищеним пусковим моментом електродвигуни, типу 4А. Такий електродвигун має високу надійність, відносно низьку вартість, простоту в експлуатації та забезпечує нормальний пуск приводу за умови $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}} > 1,5-1,8$.

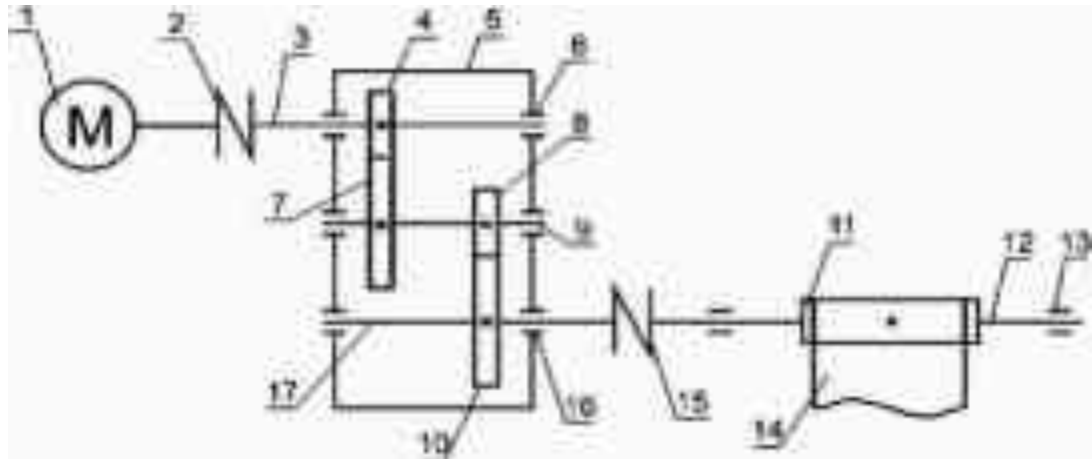


Рис. 15. Типовий варіант привода стрічкового конвеєра: 1 – електродвигун; 2,15 – муфти (МУВП); 3 – швидкохідний (привідний) вал; 4,7 – 1-ий зубчастий ступінь; 5 – корпус; 6,9,16 – підшипникові вузли; 8,10 – другий зубчастий ступінь; 11 – привідний барабан; 12 – вал; 13 – підшипниковий вузол; 14 – конвеєрна стрічка; 17 – тихохідний (відомий) вал

Залежно від призначення конвеєра, продуктивності, експлуатаційних вимог, привід проектується в різних варіантах відповідно до його розташування, оптимальності, економічності. Редуктори в приводі зазвичай застосовують зубчасті циліндричні двоступінчасті (рис. 14), при встановленні приводу, де двигун розташовується вздовж осі конвеєра, застосовують зубчасті конічно-циліндричні редуктори.

Для стрічкових конвеєрів сушарок, де швидкості транспортної стрічки невеликі, застосовують черв'ячні редуктори (рис. 16) або мотор-редуктори через їх велике передавальне число та компактні розміри.

Редуктори підбирають за розрахунковим крутним моментом на тихохідному (вихідному) валу і передатному відношенню, таким чином, щоб під час експлуатації прийнятий редуктор працював з можливим тимчасовим перевантаженням перенавантаженням до 5% і типовим недовантаженням до

15%. Двигун вибирається за розрахунковою потужністю та частотою обертання валу, що з врахуванням передаточного числа максимально відповідає розрахунковій швидкості переміщення стрічки.

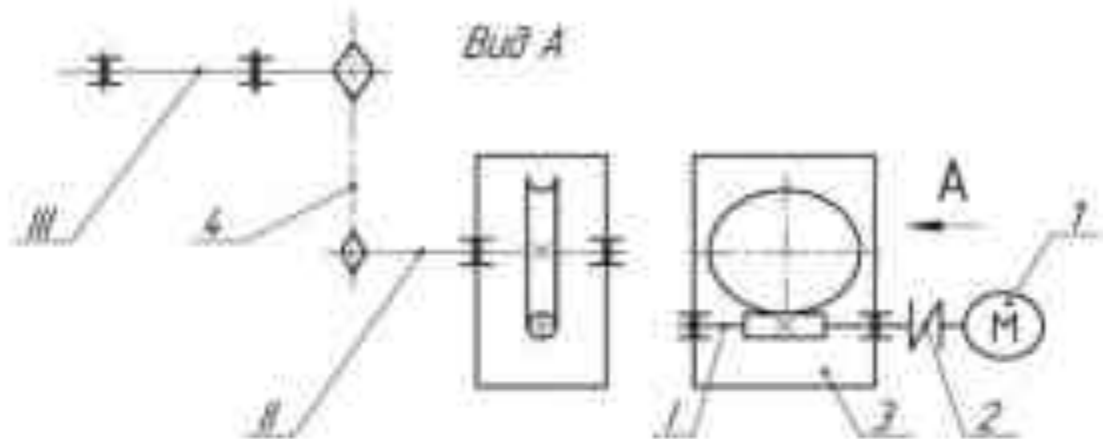


Рис. 16. Привід стрічкового конвеєра з мотор-редуктором: 1 – електродвигун; 2 – муфта пружна; 3 – черв'ячний редуктор; 4 – ланцюгова передача; I – провідний вал редуктора; II - ведений вал редуктора; III - вал приводного барабана

Зважаючи на необхідність точного регулювання швидкості стрічки для дотримання заданого режиму обробки сировини, для керування електродвигуном конвеєра, зазвичай використовують частотний перетворювач. Такий спосіб керування дозволяє виконувати вибір редуктора та двигуна лише по найбільшій можливій швидкості стрічки та максимальному необхідному

крутроду моменту на валу привідного барабана конвеєра.

Механічна система привідної станції конвеєра забезпечується сполучними муфтами. Вал електродвигуна з швидкохідним (привідним) валом редуктора для зменшення динамічних ударних навантажень при пуску двигуна з'єднується пружними муфтами: втулково-пальцевою, з гумовою зірочкою, тороподібною оболонкою.

Ці муфти мають малий момент інерції, що зменшує пускові та інші динамічні навантаження, а також мають пружні властивості, що дозволяє компенсувати перекіс валів, радіальне і осьове зміщення. Вихідний (відомий) вал редуктора і вал приводного барабана конвеєра зазвичай з'єднують зубчастою або ланцюговою муфтами. Ці муфти передають великі моменти кручення і в той же час мають добрі компенсаційні властивості, що необхідно для з'єднання валів розташованих не на одній рамі. Якщо рама приводу жорстко з'єднана з станиною конвеєра, кращим варіантом з'єднання валів є пряма відкрита передача.

Розрахунок параметрів стрічкового конвеєра.

Зважаючи на приведені вище залежності, визначимо основні параметри вузлів стрічкового конвеєра мікрохвильової стрічкової сушарки. Конструктивні параметри установки оберемо у відповідності до параметрів визначених в розділі 2.1.

Параметри стрічкового конвеєра визначаються вихідними даними:

- призначення: транспортування сипучої рослинної сировини з максимальним питомим навантаженням на стрічку до 3,5 - 4,0 кг/м².
- характеристика вантажу: рослинна сировина (горох, зерно, насіння соняшника, різані фрукти та овочі) розміщеної рівномірним шаром з висотою насипу 20-30 мм.
- продуктивність: змінна, (100-2000 кг/год) залежить від сировини;
- режим роботи: постійний, з регулюванням швидкості руху стрічки;
- схема транспортування вантажу: лінійна, горизонтальна;
- швидкість руху стрічки: 0,01-0,3 м/с;

- геометричні розміри конвеєра: ширина – 0,5 м, довжина – 6,0 м;
- режим навантаження конвеєра: легкий;
- додаткові умови: використання радіо прозорої синтетичної стрічки сертифікованої для контакту з харчовими продуктами.

Продуктивність конвеєра (Q) залежить від погонного навантаження шару матеріалу, що транспортується (G), і швидкості (V)

$$Q = 3,6 * G * V, \text{ кг/год} \quad (1)$$

Тоді максимальна продуктивність складатиме:

$$Q = 3,6 * 4,0 * 0,1 = 1,44 \text{ т/год.}$$

Слід зазначити, що максимальна продуктивність сушарки досягатиметься лише в режимах активації зернової сировини, що не є типовим режимом роботи сушарки. Тобто з максимальною продуктивністю конвеєр працювати не буде, так як високі швидкості транспортування сировини використовуються при його неповній завантаженості.

Згідно з стандартом швидкість стрічки V (м/с) має вибиратися з наступного ряду: 0,25; 0,315; 0,4; 0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4,0; 5,0; 6,3. Відхилення швидкостей допускається не більше +10%. Короткі конвеєри повинні мати меншу швидкість, ніж довгі та магістральні, для яких доцільне застосування підвищених швидкостей. Проте у харчовій промисловості, якщо конвеєри використовуються не тільки для транспортування вантажу, а і для виконання технологічних операцій, швидкість може бути меншою за 0,25 м/с.

Вибір конвеєрної стрічки.

Вибір стрічки багато в чому залежить від її призначення та умов, за яких передбачається її експлуатація. При виборі конвеєрної стрічки слід враховувати такі фактори:

- 1) довжина траси конвеєра;
- 2) наявність непрямих ділянок профілю робочої гілки стрічки;
- 3) достатня міцність стрічки на розрив;
- 4) допустимі (за технічною характеристикою стрічки) діаметри приводних,

натяжних та обвідних барабанів конвеєра;

5) ступінь тертя вантажу об робочу поверхню стрічки, а також опорної поверхні стрічки об поверхню привідного барабана;

6) вид підтримуючого пристрою;

7) спосіб завантаження;

8) кут нахилу конвеєра;

9) умови роботи конвеєра (запиленість, вологість та ін.);

10) прогнозований термін служби;

11) вартість стрічки;

12) вплив маси стрічки на енергоспоживання конвеєра.

Аналіз і обґрунтування вибору конвеєрної стрічки.

Для транспортування харчової продукції в межах короткого конвеєра довжиною 6 м доцільно застосувати синтетичну конвеєрну стрічку, яка відповідає санітарно-гігієнічним вимогам харчової промисловості, має достатню термостійкість і забезпечує стабільну роботу в умовах малих навантажень. Вихідними умовами для вибору є: ширина стрічки 0,5 м, безметалева конструкція, наявність дрібної перфорації, а також здатність працювати при температурі до 120-150 °С.

Аналіз можливих варіантів показує, що звичайні ПВХ-стрічки не є оптимальними, оскільки їх теплостійкість, як правило, нижча за 120 °С. Поліуретанові стрічки є кращими для харчового застосування завдяки гігієнічності, еластичності, зносостійкості та придатності до контакту з продуктами. Проте більшість стандартних PU-стрічок розраховані на температури приблизно до 80–100 °С, що недостатньо для заданих умов. Отже, для забезпечення необхідного температурного запасу доцільно розглядати термостійкі синтетичні матеріали на основі PTFE або комбіновані харчові стрічки з термостійким покриттям.

Наявність дрібної перфорації є важливою технологічною вимогою, оскільки вона забезпечує частковий прохід повітря, вологи або пари через полотно стрічки. Це особливо актуально для процесів сушіння та термічної

обробки харчових продуктів. Дрібні отвори дозволяють зберегти опорну здатність стрічки, не допускаючи провалювання дрібних виробів, і водночас підвищують ефективність тепло- та масообміну.

Безметалева конструкція є обов'язковою для МХ сушарки і харчового виробництва, оскільки виключає ризик нагрівання в МХ полі, можливість корозії і потрапляння металевих частинок у продукт. Синтетична стрічка простіша в санітарній обробці та не потребує складного обслуговування, що є важливим для виробництв із підвищеними вимогами до чистоти.

З урахуванням малої довжини конвеєра і невеликого навантаження немає потреби застосовувати важкі багатошарові або армовані промислові стрічки. Для даного випадку раціональним є використання легкої синтетичної стрічки з термостійкого полімерного матеріалу, шириною 500 мм, що забезпечить достатню несучу здатність, мінімальне енергоспоживання приводу та зменшить масу рухомих елементів. Це позитивно впливає на надійність і економічність приводу.

Найбільш обґрунтованим є вибір **безметалевої перфорованої синтетичної стрічки РТФЕ харчового призначення з термостійкістю 120-150 °С і шириною 500 мм**. Така стрічка відповідає санітарним вимогам, забезпечує необхідний температурний режим, придатна для короткого малонавантаженого конвеєра та дозволяє ефективно реалізувати технологічний процес у харчовій галузі. Найкращий виробник таких стрічок в Україні: ТОВ «РТК «АКВІТТЕНС» (AKVITENS), Україна, Харків. Виробляє конвеєрні стрічки на основі поліуретану (ПУ), для харчових виробництв (харчова промисловість, хлібопекарна, кондитерська), стрічки шириною 500 мм, довжина довільна, обираємо двошарову - типову для мало навантажених синтетичних стрічок.

Висновок. **Обрана стрічка є технічно доцільною**, оскільки поєднує в собі харчову безпечність, термостійкість, легкість конструкції та функціональність перфорації. Її застосування забезпечує надійну і стабільну роботу конвеєра при мінімальних експлуатаційних витратах.

Визначення основних параметрів барабанів.

При проектуванні конвеєра рекомендується розміри приводного барабана приймати в залежності від ширини та номінальної міцності стрічки.

Розрахунок діаметра привідного барабана

Діаметр привідного барабана стрічкового конвеєра визначається з урахуванням типу стрічки, її конструкції та кількості прокладок. Для стрічок із синтетичними прокладками рекомендовано визначати діаметр барабана за залежністю $D_b = a_1 \cdot i$, де a_1 — коефіцієнт, що залежить від типу стрічки, а i — кількість прокладок у стрічці. Для стрічок із синтетичної тканини значення коефіцієнта a_1 приймають у межах 100...200 мм.

У даному дипломному проєкті для короткого малонавантаженого конвеєра прийнято синтетичну стрічку шириною 500 мм з двома прокладками. Для забезпечення достатнього запасу міцності та жорсткості приймається коефіцієнт $a_1 = 100$ мм. Тоді розрахунковий діаметр привідного барабана становить:

$$D_b = 100 \cdot 2 = 200 \text{ мм} \quad (2)$$

Отримане значення узгоджується з рекомендованими методиками розрахунку стрічкових конвеєрів і надалі приймається як основне. З урахуванням стандартного ряду типорозмірів барабанів для подальшого конструювання приймемо стандартний діаметр привідного барабана 200 мм.

Перевірка вибраного діаметра

Після попереднього вибору діаметра привідного барабана необхідно виконати перевірку за допустимим тиском між стрічкою та барабаном. Для цього використовується залежність

$$p = 2 S_{\max} / (D_b \cdot B), \quad (3)$$

де S_{\max} - максимальний натяг стрічки, Н

D_b - діаметр барабана, см

B - ширина стрічки, см

Допустимий тиск для барабана має становити близько 40 Н/см².

Допустимий натяг стрічки 2 Smax визначається за міцністю її тягового шару і залежить від ширини та кількості прокладок. Для стрічки шириною 500 мм допустиме зусилля приймемо за довідковими даними виробника. Для обраної стрічки допустимий натяг становить 5–6 кН. Тоді для конвеєра шириною 50 см, та прийнятого діаметра барабана $D_b=20$ см, для максимального натягу стрічки складатиме $2 * 6000 / (20 * 50) = 12$ Н/см².

Так як одержане значення питомого тиску не перевищує допустимого, обраний діаметр барабана вважаємо правильним.

Інші геометричні параметри

Діаметри інших барабанів конвеєра приймаються залежно від діаметра привідного барабана. Натяжний барабан приймаємо рівним привідному, тобто $D_{нат}=D_b$, а підтримуючі барабани меншими, орієнтовно $0,65 * D_b$. Для прийнятого значення $D_b=200$ мм діаметр натяжного барабана також становить 200 мм, а діаметри інших барабанів приблизно 130 мм, обираємо до найближчого стандартного значення.

Після перевірки за допустимим тиском між стрічкою та барабаном встановлено, що прийнятий діаметр забезпечує нормальні умови роботи конвеєра, тому для подальшого проєктування остаточно прийнято привідний барабан діаметром 200 мм.

Отриманий діаметр барабана округляють до стандартного найближчого значення.

Довжина барабана вибирається залежно від ширини стрічки (рис. 10)

$$L = B + (100 - 200) \text{ мм.} \quad (4)$$

$$\text{Тоді } L = 500 + 100 = 600 \text{ мм.}$$

Відстань між втулками зазвичай приймається

$$K = 0,7 * L \text{ мм.} \quad (5)$$

$$K = 0,7 * 600 = 420 \text{ мм.}$$

Товщина обода барабана приймається рівною

$$\delta_{об} = 0,005 * D + (4 - 5) \text{ мм.} \quad (6)$$

$$\delta_{об} = 0,005 * 200 + 5 = 1,025 \text{ мм.}$$

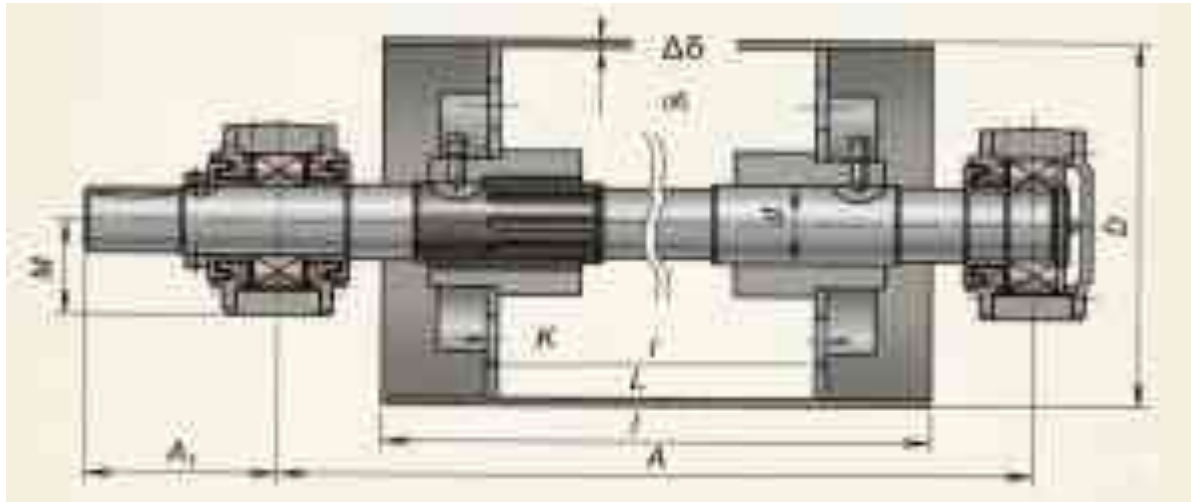


Рис. 17. Основні параметри конструкції барабана

За розрахованими параметрами виконано деталювання привідного та натяжного вузлів конвеєра.

2.2.6. Силовий розрахунок, вибір електродвигуна конвеєра

Для розрахунку привода стрічкового конвеєра приймемо такі вихідні дані: ширина стрічки $B=500$ мм, довжина конвеєра $L=6000$ мм, діаметр привідного та натяжного барабанів $D=200$ мм, тип стрічки – синтетична, питоме навантаження на стрічку $q=4$ кг/м². Для короткого малонавантаженого конвеєра приймемо максимальною швидкість руху стрічки $v=0,5$ м/с, що відповідає рекомендованим значенням для стрічкових конвеєрів загального призначення.

Питомий вантаж на одному метрі довжини стрічки визначається множенням питомого навантаження на ширину стрічки:

$$q_l = q \cdot B = 4 \cdot 0,5 = 2 \text{ кг/м} \quad (7)$$

Тоді загальна маса вантажу, що одночасно знаходиться на робочій гілці конвеєра довжиною 6 м, становить:

$$m_v = q_l \cdot L = 2 \cdot 6 = 12 \text{ кг} \quad (8)$$

Вага вантажу на стрічці:

$$G_v = m_v \cdot g = 12 \cdot 9,81 = 117,72 \text{ Н} \quad (9)$$

Для синтетичної стрічки малої ширини у попередньому розрахунку

можна прийняти масу стрічки приблизно 5 кг на 1 м довжини. Тоді маса стрічки по всій довжині конвеєра:

$$m_c = 5 \cdot 6 = 30 \text{ кг} \quad (10)$$

Вага стрічки:

$$G_c = m_c \cdot g = 30 \cdot 9,81 = 294,3 \text{ Н} \quad (11)$$

Для горизонтального стрічкового конвеєра із малим навантаженням загальне тягове зусилля можна орієнтовно визначити через коефіцієнт опору руху $w=0,03$ який враховує опори в роликкоопорах, деформацію стрічки та місцеві втрати. Тоді тягове зусилля становить:

$$F = w \cdot (G_B + G_c) = 0,03 \cdot (117,72 + 294,3) = 12,36 \text{ Н} \quad (12)$$

Потужність на валу привідного барабана визначається за формулою:

$$P_B = (F \cdot v) : 1000 = (12,36 \cdot 0,5) : 1000 = 0,00618 \text{ кВт} \quad (13)$$

Оскільки при практичному виборі електродвигуна необхідно враховувати втрати в передачі, пускові режими та запас по потужності, вводиться коефіцієнт запасу $k=1,2$ а коефіцієнт корисної дії приводу приймається $\eta=0,85$. Тоді необхідна потужність електродвигуна дорівнює:

$$P_{дв} = (k \cdot P_B) : \eta = (1,2 \cdot 0,00618) : 0,85 = 0,00872 \text{ кВт} \quad (14)$$

Отримане значення є дуже малим, що характерно для короткого малонавантаженого конвеєра. Проте в реальних умовах вибір двигуна за таким значенням недоцільний, оскільки потрібно забезпечити надійний пуск, стійку роботу при можливому збільшенні навантаження та конструктивну уніфікацію. Тому для даного конвеєра доцільно прийняти стандартний асинхронний електродвигун потужністю 0,25 кВт, який забезпечує достатній запас потужності.

Частота обертання привідного барабана визначається за формулою:

$$n_B = (60 \cdot v) : (\pi \cdot D) = (60 \cdot 0,5) : (3,14 \cdot 0,2) = 47,8 \text{ об/хв} \quad (15)$$

Для стандартного чотирьополюсного асинхронного двигуна з частотою обертання приблизно $n_{дв}=1440$ об/хв необхідне передаточне число редуктора становитиме:

$$i = n_{дв} : n_B = 1440 : 47,8 = 30,1 \quad (16)$$

Отже, для приводу заданого стрічкового конвеєра приймається асинхронний електродвигун потужністю 0,25 кВт з номінальною частотою обертання 1440 об/хв та редуктор із передаточним числом близько 30. Такий вибір забезпечує необхідну швидкість руху стрічки, надійність роботи приводу та запас потужності для експлуатації конвеєра

Вибір електродвигуна та черв'ячного редуктора.

На підставі виконаного розрахунку потужності приводу для стрічкового конвеєра шириною 500 мм і довжиною 6000 мм розрахункова потужність електродвигуна становить близько 0,009 кВт, однак з урахуванням пускових режимів, експлуатаційного запасу, можливого зростання навантаження та уніфікації комплектуючих доцільно прийняти стандартний трифазний асинхронний електродвигун потужністю 0,25 кВт. Для цього обрано електродвигун типу **AIP63A4** українського виробництва, представлений компанією EKVIVES. Він має номінальну потужність 0,25 кВт, частоту обертання 1500 об/хв, трифазне виконання, напругу живлення 220/380 В, чотири полюси, ступінь захисту IP55, коефіцієнт потужності 0,82, ККД 64,5% і масу 5,6 кг. Виробник на сторінці виробу вказує монтажні виконання IM1081, IM2081, IM3081, IM2181 та IM3181, що дає змогу узгодити двигун із компоновкою приводу конвеєра.



Рис. 18. Електродвигун AIP63A4, 0.25 кВт 1500 об/хв IM1081

Для забезпечення необхідної частоти обертання привідного барабана було визначено, що при діаметрі барабана 200 мм і швидкості стрічки 0,5 м/с

частота його обертання становить приблизно 47,8 об/хв. За номінальної частоти обертання двигуна 1500 об/хв потрібне передаточне число редуктора дорівнює приблизно 31,4, тому доцільно прийняти стандартне значення $i = 30$. Таке значення забезпечує вихідну частоту обертання близько 47 об/хв, що практично відповідає розрахунковому режиму роботи конвеєра.

Як понижувальну передачу обрано одноступінчастий черв'ячний редуктор **NMRV 030**. За даними постачальника, редуктор NMRV 030 має міжосьову відстань 30 мм, алюмінієвий корпус, передавальні числа від 7,5 до 100, допускає комплектування електродвигунами потужністю від 0,09 до 0,37 кВт і застосовується, зокрема, у конвеєрах та харчовому обладнанні. Для передаточного числа $i = 30$ при вхідній частоті 1500 об/хв вихідна частота обертання редуктора становить 47 об/хв, крутний момент на вихідному валу — 16 Н·м, а ККД редуктора — близько 0,65. Такі параметри відповідають вимогам приводу малонавантаженого стрічкового конвеєра.



Рис. 19. Редуктор NMRV 030

Редуктор NMRV 030 сумісний з електродвигунами габариту AIP63 і має виконання з приєднувальним фланцем 63B5 або 63B14, що дозволяє безпосередньо агрегатувати його з вибраним двигуном AIP63A4. За даними виробника, редуктор має габаритні розміри 75×56×97 мм, масу 1,2 кг, гарантію 12 місяців та призначений для тривалого режиму роботи S1 і повторно-короткочасного режиму S3. Це робить його придатним для

використання у приводі конвеєра з відносно невеликою потужністю та безперервним режимом транспортування продукту.

Отже, для проєктованого стрічкового конвеєра остаточно приймається привід у складі трифазного асинхронного електродвигуна AIP63A4, 0,25 кВт, 1500 об/хв, українського виробництва, та черв'ячного редуктора NMRV 030 з передаточним числом $i = 30$. Обрана комбінація забезпечує потрібну частоту обертання приводного барабана, достатній крутний момент на вихідному валу, компактність привода та надійну роботу конвеєра в умовах харчового виробництва.

Таблиця 2. Характеристики обраного обладнання

Параметр	Електродвигун AIP63A4	Черв'ячний редуктор NMRV 030
Виробник / постачальник	EKVIVES, Україна	СЛЕМЗ, Україна; серія NMRV 030
Тип	Асинхронний трифазний, короткозамкнений	Одноступінчастий черв'ячний
Потужність	0,25 кВт	Для двигунів 0,09–0,37 кВт
Частота обертання	1500 об/хв	47 об/хв при $i=30$ і 1500 об/хв на вході
Напруга	220/380 В	Працює в складі мотор-редуктора з двигуном 220/380 В
Ступінь захисту	IP55	Не вказано
ККД	64,5%	Близько 0,65 при $i=30$
Крутний момент	Не наведено окремо	16 Н·м при $i=30$, 1500 об/хв
Маса	5,6 кг	1,2 кг

Посилання на виробників в Україні

Електродвигун AIP63A4: <https://www.ekvives.com>

Черв'ячний редуктор: <https://drivesystems.com.ua/nmrv-2>

2.2.7. Розрахунок на міцність

Для шпонкового з'єднання тихохідного валу редуктора з валом приводного барабана треба виконати перевірочний розрахунок на зминання призматичної шпонки згідно з методикою розрахунку шпонкових з'єднань.

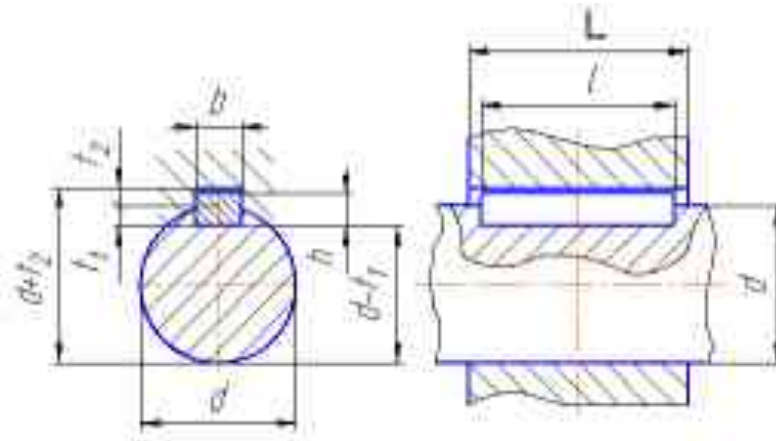


Рис. 20 Схема шпонкового з'єднання.

Вихідні дані для розрахунку:

Потужність на вихідному валу редуктора (на барабані) $P=0,25$ кВт.

Частота обертання тихохідного валу $n=47$ об/хв (при редукторі $i\approx 30$).

Діаметр вала/маточини барабана (посадка редуктора) приймаємо конструктивно $d=30$ мм (для NMRV 030 із двигуном 0,25 кВт).

Матеріал вала, маточини та шпонки – сталь Ст3.

Допустиме напруження зминання для сталеві маточини при спокійному навантаженні $[\sigma_{зм}]=100$ МПа.

За діаметром вала $d=30$ мм з ГОСТ 23360-78 для призматичної шпонки обираємо типорозмір 8×7 мм (ширина $b=8$ мм, висота $h=7$ мм).

Робочу довжину шпонки приймаємо з умови конструктивної довжини маточини барабана $l_0=40$ мм (довжина шпонки за стандартом).

Визначення крутного моменту

Крутний момент на валу з'єднання:

$$T = (9550 \cdot P) : n = (9550 \cdot 0,25) : 47 = 50,8 \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (17)$$

У подальших розрахунках приймаємо $T=51$ Н·м.

Розрахункова колова сила на шпонці

Колову силу, яка передається через шпонку, визначаємо за залежністю:

$$F_t = (2 \cdot T) : d \quad (18)$$

де T – крутний момент, Н·мм,

d – діаметр вала, мм.

Момент у Н·мм: $T = 51 \text{ Н} \cdot \text{м} = 51000 \text{ Н} \cdot \text{мм}$, $d = 30 \text{ мм}$.

$$F_t = (2 \cdot 51000) : 30 = 102000 : 30 = 3400 \text{ Н} \quad (19)$$

Перевірка на зминання

Площа поверхні зминання для призматичної шпонки:

$$A_{zm} = b \cdot l_0 \quad (20)$$

де $b = 8 \text{ мм}$ – ширина шпонки, $l_0 = 40 \text{ мм}$ – робоча довжина шпонки.

$$A_{zm} = 8 \cdot 40 = 320 \text{ мм}^2$$

Напруження зминання:

$$\sigma_{zm} = F_t : A_{zm} = 3400 : 320 = 10,625 \text{ МПа} \quad (21)$$

Порівнюємо з допустимим:

$$\sigma_{zm} = 10,6 \text{ МПа} \leq [\sigma_{zm}] = 100 \text{ МПа} \quad (22)$$

Умова міцності на зминання виконується з великим запасом, отже, обране шпонкове з'єднання за зминанням є достатньо міцним.

Перевірка на зріз

Площа зрізу шпонки:

$$A_{zr} = b \cdot h = 8 \cdot 7 = 56 \text{ мм}^2 \quad (22)$$

Напруження зрізу:

$$\tau_{zr} = F_t : A_{zr} = 3400 : 56 \approx 60,7 \text{ МПа}$$

Для сталі шпонки допустиме напруження зрізу можна брати $[\tau_{zr}] = 60 \text{ МПа}$ (для сталі Ст3 при спокійному навантаженні).

Оскільки $\tau_{zr} \approx 60,7 \text{ МПа} \approx [\tau_{zr}]$ міцність з'єднання на зріз знаходиться на межі допустимого значення. Для підвищення надійності допускається або збільшити довжину шпонки (наприклад, до 50 мм), або використати шпонку з більшим перетином, однак для малонавантаженого конвеєра й спокійного режиму роботи така комбінація розглядається як допустима.

Висновок. Для передавання крутного моменту від тихохідного валу

редуктора до вала приводного барабана застосовано призматичну шпонку за ГОСТ 23360-78. За діаметром вала $d=30$ мм обрано шпонку перерізом 8×7 мм і довжиною $l_0=40$ мм. Крутний момент на валу становить $T=51$ Н·м. Колова сила на поверхні зчеплення шпонки з маточиною дорівнює $F_t=3400$ Н. Напруження зминання на контактній поверхні шпонки й маточини дорівнює $\sigma_{зм}=10,6$ МПа, що значно менше за допустиме для сталевий маточини $[\sigma_{зм}]=100$ МПа. Напруження зрізу становить $\tau_{зр} \approx 60,7$ МПа, що близьке до допустимого $[\tau_{зр}]=60$ МПа. Таким чином, обране шпонкове з'єднання за умовами зминання й зрізу забезпечує необхідну міцність і працездатність у заданому режимі роботи конвеєра.

2.3. Розрахунок та вибір конструктивних рішень для енергетичної складової мікрохвильової стрічкової сушарки

Технічні рішення, що використовуються в мікрохвильових установках апробовані в конструкціях надвисокочастотних радіоапаратів зокрема в конструкціях генераторів та антен радарної (радіолокаційної) техніки. Параметри конструкції таких пристроїв визначаються законами радіофізики та їх призначенням. Типові методики проектування та розрахунку параметрів елементів конструкції МХ апаратури описані та доступні в фахових джерелах з радіофізики та фізики надвисоких частот.

На сьогодні немає особливої потреби у розробці компонентів мікрохвильових установок, так як компоненти для розробки мікрохвильових апаратів випускаються промисловістю в досить широкому спектрі та є вільно доступними на ринку.

Генератори мікрохвильових коливань (магнетрони).

Використання магнетронів в якості генераторів МХ випромінювання, на сьогодні, є оптимальним рішенням. Генератор, призначений для нагріву продукту. Незважаючи на численні переваги технології твердотілого генератора, вона підходить не для всіх застосувань. Магнетронна технологія все ще є дешевшою альтернативою, особливо для високої потужності.

Генератори живляться від простого, але ефективного та рентабельного трансформаторного джерела живлення. Вони живлять блок генерації, який оснащений відповідним магнетроном та змонтований безпосередньо на камері сушіння або на хвилеводі, який іде до камери.

Для магнетронної технології генерації мікрохвиль використовують імпульсні блоки живлення з високими та низькими пульсаціями (постійної та змінної генерації), які дозволяють підтримувати ідеальну робочу точку. Це забезпечує високу ефективність і довший термін служби мікрохвильових генераторів.

Прикладом такого пристрою може бути наступні комплекти із магнітною головкою та блоком живлення від німецької компанії «Fricke and Mallah».

Магнетрони для високочастотних застосувань.

Магнетрони відіграють центральну роль у виробленні електромагнітної енергії. Вони генерують у діапазонах частот 915, 2450 та 5800 МГц. Вихідна потужність магнетрону залежить від конструкції і частотного діапазону і може складати від 300 Вт до 100 кВт. Прикладом промислового магнетрона можна обрати генератори потужністю 3 кВт з частотою 2,45 ГГц, які використовуються в системах мікрохвильового нагрівання, сушіння та плазмових установках і є оптимальними за співвідношенням вартість / потужність. На промислових майданчиках (Alibaba, Made-in-China тощо) представлено багато зразків 3 kW microwave magnetron з вихідною потужністю 3000 Вт і частотою 2450 МГц, що позиціонується саме як промисловий магнетрон для нагріву і сушіння. Наприклад компанія GAE (Muegge/AGL) має модель GA8002 Industrial Magnetron, 3 kW, 2450 MHz, призначену для промислових генераторів мікрохвиль, які застосовуються для технологічного нагрівання, сушіння та плазмових процесів. Є також модулі у вигляді magnetron head 3 kW / 2.45 GHz з водяним охолодженням для індустріальних сушильних і лабораторних установок (тунельні печі, камерні печі, вакуумна СВЧ-сушка тощо). Для мого проєкту можна обрати «промисловий магнетрон 3 kW, 2450 MHz (тип GA8002 або аналогічний magnetron head 3 kW/2.45 GHz.



Рис. 21 Промисловий магнетрон 3 kW, 2450 MHz

Магнетронні головки - готові до конфігурації та готові до використання

Індивідуальні магнетронні головки – це повністю налаштовані та готові до використання пристрої з інтегрованим трансформатором розжарювання, магнетроном, температурним перемикачем та ізолятором у компактному корпусі. Бувають як стандартні магнетронні головки, які налаштовані та готові до використання так і ті, що виготовляються з параметрами заданими замовником. Наприклад: магнетронна головка «Magnetronhead 6kW / 2.45 GHz Water cooled with Isolator FM - MH6K0W4GH10».

Характеристики:

FM - Магнетронна головка з ізолятором, 2,45 ГГц, водяне охолодження

HF-Вихідна потужність 2 кВт, 3 кВт або 6 кВт

Частота 2450 +/- 10 МГц

Інтегрований трансформатор розжарювання

Інтегрований магнетрон з водяним охолодженням

Вбудований перемикач температури

Блокування: перегрівання магнетрона

Додатково з детектором потужності

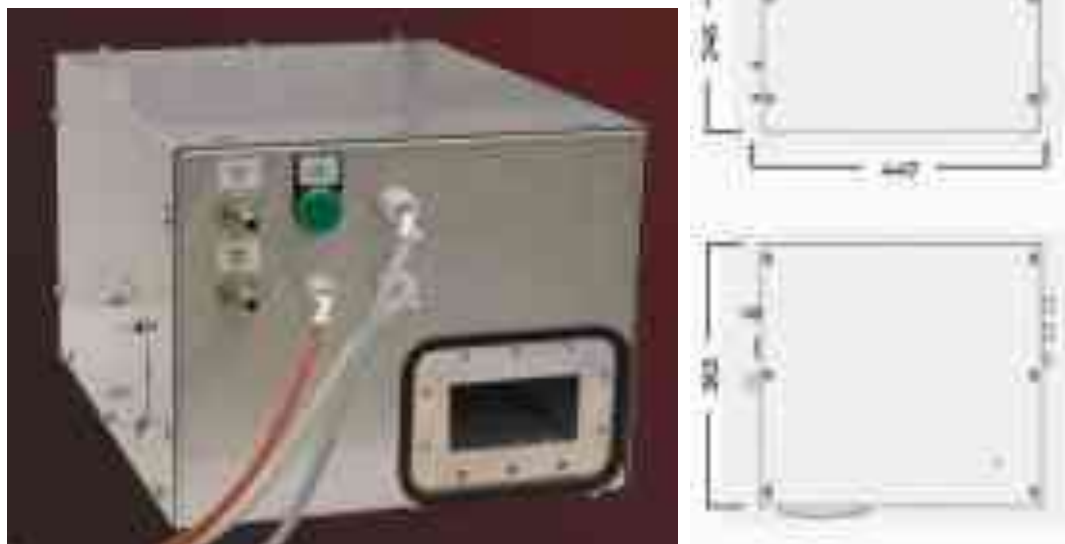


Рис. 22. Загальний вигляд магнетронної головки Magnetronhead 6kW

Специфікація:

Вихідна потужність 6 кВт

Фіксована частота 2450 +/-10 МГц

Вихідний фланець IEC153: R26 / EIA: WR340

Магнетрон MW6000NLLsL

Напруга нитки 5 +/- 0,2 В змінного струму

Струм розжарювання 29 А АС

Водяне охолодження

Статичний тиск води макс. 500 кПа

Потік води > 4 л/хв.

Температура води +18°C..+22°C

Якість води чиста вода

Розміри корпусу (ШxВxГ) 363 x 246 x 447 мм

Керування роботою сушарки. Ключовою особливістю однокамерної конструкції з декількома магнетронами є необхідність реалізації алгоритму циклічного (почергового або групового) вмикання магнетронів. Одночасна робота всіх магнетронів є небажаною через взаємний вплив генераторів у єдиному резонаторі (ефект зворотного відбиття може пошкоджувати

магнетрони) та ризик перегріву продукту [4, 9].

Рекомендований алгоритм управління – почергова активація генераторів з тривалістю циклу 2–5 с. Наприклад, для 10 магнетронів: активні М1, М2 ($t=1-2$ с) → М3, М4 ($t=2-4$ с) → ... → М9, М10 ($t=8-10$ с) → цикл повторюється. Такий режим рівномірно розподіляє теплову дію вздовж всієї довжини камери та запобігає місцевому перегріву. Загальна потужність установки в будь-який момент часу не перевищує потужності 2–3 одночасно активних магнетронів (2–4,5 кВт). Середня споживана потужність при 20–30 % навантаженні кожного магнетрона – 2,0–3,5 кВт, що суттєво знижує енергоспоживання порівняно зі 100 % завантаженням [1, 3].

Система управління будується на базі програмованого логічного контролера (ПЛК) з модулями дискретного виводу (8–10 каналів для комутації схем керування блоків живлення магнетронів), аналогового введення (датчики температури шару та вологості повітря в камері), а також модуля керування частотним перетворювачем приводів конвеєра та системи продувки камери повітрям. Панель оператора (сенсорний НМІ-дисплей) дозволяє завантажувати готові технологічні рецепти або програмувати власний профіль нагрівання. Передбачені два основних режими роботи: «Сушіння» (помірна потужність, знижена швидкість стрічки, тривала обробка) та «Термічна стерилізація» (максимальна потужність, висока швидкість, короткочасний вплив).

Табл. 3. Технічні параметри однокамерної МХ стрічкової сушарки з 8–10 магнетронами

№	Параметр	Розмірність	Значення
1	Споживана електрична потужність	кВт	10,0–26,0
2	Кількість магнетронів	шт.	8
3	Одинична потужність магнетрона	кВт	1,0–3,0

№	Параметр	Розмірність	Значення
4	Частота МХ-випромінювання	ГГц	2,45
5	Продуктивність (зернові)	кг/год	100–360
6	Продуктивність (стерилізація)	кг/год	> 400
7	Зниження вологості (по зерну)	%	12–18
8	Ширина стрічки конвеєра	мм	500
9	Швидкість стрічки	м/хв	0–3 (регул.)
10	Висота вхідного/вихідного вікна	мм	20–100
11	Загальна довжина сушарки	мм	6000
12	Питоме навантаження на стрічку	кг/м ²	до 4,0
13	Висота шару сировини	мм	~20
14	Габаритні розміри В×Ш×Г	мм	2000×700×6000

2.4. Розробка загального виду та основних конструктивних елементів мікрохвильової стрічкової сушарки

Корпус сушарки виготовляється зі смугової нержавіючої сталі (AISI 304) методом зварювання. Поперечний переріз мікрохвильової камери складає 700 × 700 мм (Г × Ш), що відповідає ширині стрічки 500 мм з технологічним зазором по 100 мм з кожного боку для встановлення направляючих роликів. Довжина внутрішнього простору резонаторної камери – 2000 мм; вхідний та вихідний відкриті тунелі – по 1500 мм з кожного боку [5, 6] та вхідний і вихідний шлюзи висотою 200 мм з кожної сторони. Висота вихідного вікна в кожному шлюзі має регулюватись відповідно до товщини шару продукту, що обробляється.

Верхня та нижня стінки корпусу камери є несучими панелями для 6–10 магнетронів. Магнетрони типу 2М210 або аналогічні (потужність 1,0–3,0 кВт, частота 2,45 ГГц) встановлюються вертикально, вихідний хвилевід кожного з

них через фланцеве з'єднання вводиться в порожнину камери. Відстань між осями сусідніх магнетронів – 400 мм. Розміщення пар магнетронів – перпендикулярне між парами по площині випромінювання. Розташування їх вздовж поздовжньої осі симетрії стрічки гарантує центрально-симетричне поле нагрівання. Кожний магнетрон може бути з'єднаний через повітряний канал з аспіраційним колектором, що водночас виконуватиме функцію охолодження генераторів та видалення вологого повітря з камери [2, 7].

Конвеєрна стрічка виконується з радіопрозорого полімеру (PTFE - PU) у вигляді сітки з перфорованими отворами 1-2 мм, що забезпечує прохід повітря через шар сировини при аспіраційному вологовидаленні. Привід конвеєра – мотор-редуктор з частотним перетворювачем, що забезпечує плавне регулювання швидкості в діапазоні 0–0.3 м/с. Натяжний та приводний барабани розміщуються за межами НВЧ-зони (поза корпусом, на виході шлюзів), підшипникові вузли – на зовнішніх стійках рами.

Аспіраційно-вентиляційна система складається з: нагнітаючого повітряного колектора для подачі атмосферного або нагрітого повітря з проточним нагрівачем та нагнітаючим вентилятором та витяжного колектора з відцентровим вентилятором. Повітряний потік проходить над та під шаром сировини і частково через нього, відводячи випаровану вологу. Питома витрата повітря – 400–600 м³/год на камеру.

Захист від витоків МХ-енергії на вході та виході реалізується за допомогою вихідних тунелів та водяних навантажень – радіопрозорих ємностей з водою, встановлених у торцях тунелів. Такий підхід є стандартним для промислових МХ-тунельних сушарок [5, 8]. Усі з'єднання корпусу виключно зварні або з суцільними притискними фланцями – болтові з'єднання без радіочастотного ущільнення не допускаються.

2.4.1. Опис результуючої конструкції

Результуюча однокамерна стрічкова МХ сушарка являє собою горизонтально розміщений зварний металевий корпус прямокутного перерізу з

нержавіючої сталі. Загальні габарити: В×Ш×Г ≈ 2000×700×6000 мм. На поверхні верхньої та нижньої стінок корпусу рівномірно розміщено по чотири магнетрони з кроком 400 мм. Кожен магнетрон вмонтований вертикально; хвилеводна антена спрямована вертикально вниз у внутрішній простір камери. Силовий блок кожного магнетрона (трансформатор, конденсаторний блок, система захисту) розміщений безпосередньо поряд з ним у захисному кожусі – це спрощує обслуговування та заміну несправних генераторів.

Всередині корпусу сушарки рухається безкінечна синтетична перфорована отворами 1-2 мм стрічка шириною 500 мм, що проходить через всю довжину камери між вхідним та вихідним тунелями. Сировина завантажується на вхідному кінці стрічки за допомогою живильника, що рівномірно розподіляє шар висотою 20 мм по всій ширині стрічки. Вивантаження висушеного продукту відбувається з вихідного кінця стрічки в приймальний бункер.

Аспіраційна система з підведенням нагрітого повітря та відведенням відпрацьованого, забезпечує вологовидалення з продукту в контурі повітряного потоку. Вологе тепле повітря відводиться через витяжний канал у боковій частині корпусу та викидається назовні. Додаткова рекуперація тепла охолодження магнетронів в технологічний процес (може бути реалізовано) підвищить загальну енергетичну ефективність установки на 10–15% порівняно з ізольованими системами охолодження та продувки [7].

Загальний вигляд конструкції відповідає класу промислових тунельних МХ-сушарок безперервної дії (аналог – серія обладнання виробників PÜSCHNER, Weiss Technik/HEPHAISTOS, MAX Industrial Microwave), але відрізняється від них відносно спрощеною конструкцією резонатора та орієнтацією на зернову, бобову та насінневу сировину при одиничній потужності магнетронів 1,0–3,0 кВт (напівпромисловий клас).

2.4.2. Список патентних аналогів та схожих конструкцій

Основні патентні джерела та конструктивні аналоги, що відповідають

описаній стрічковій МХ-сушарці з множинними магнетронами та циклічним керуванням:

[1] – Патент US 4 640 020 (Zoned Microwave Drying Apparatus and Process, 1987) описує однокамерний апарат безперервної дії для зонального МХ-сушіння на конвеєрній стрічці; камера поділена на зони окремими непрозорими для НВЧ перегородками, в кожній зоні – окреме джерело МХ-енергії; реалізується принцип поступового нагрівання продукту вздовж стрічки при контрольованій щільності потужності [1].

[2] – Патент CN 104 188 071 В (Tunnel-type Vegetable Microwave Dryer, 2014) розкриває тунельний овочевий МХ-сушильник з єдиним хвилеводним блоком, в якому шість магнетронів в два ряди розміщено у верхній частині єдиного корпусу; також включає автоматичну захисну систему від роботи без завантаження на основі технічного зору [2].

[3] – Патент US 20080104857 A1 (Multistage Continuous Microwave Dryer for Plate-Shaped Products, 2008) описує багатостадійну безперервну МХ-сушарку для листових матеріалів на конвеєрній пластиковій стрічці з масивом магнетронів у верхній частині резонатора; принцип організації хвилеводних антен у вигляді стержнів є аналогом рішення для рівномірного розподілу поля [3].

[4] – Патент US 4 430 806 (Microwave Agricultural Drying and Curing Apparatus, 1984) розкриває апарат для МХ-сушіння зернових культур (соя, арахіс, кукурудза) у безперервному режимі на конвеєрній стрічці з лабіринтними пастками витоку МХ-енергії на вході та виході камери [4].

[5] – Патент US 4 045 639 А (Continuous Microwave and Vacuum Dryer, 1977) – базовий патент на безперервний МХ-сушильник з конвеєрною стрічкою; висвітлює принципи організації вхідного/вихідного ущільнення НВЧ-камери та розміщення кількох резонаторних порожнин вздовж стрічки, які можуть підключатись до різних МХ-генераторів [5].

[6] – Патент RU 2 531 709 С1 (Мікрохвильова камера безперервної дії для

сушіння шпону, 2014) описує конструкцію з циліндричним корпусом, що обертається, з чотирма магнетронами, розміщеними по периметру; сировина рухається через камеру на роликовому конвеєрі з перфорованою стрічкою – аналог по принципу багатопозиційного нагріву в єдиному об'ємі [6].

[7] – Публікація: Weiss Technik GmbH / Karlsruhe Institute of Technology (KIT). NEPHAISTOS Microwave Belt Oven – система з трьох послідовних модулів по 6 магнетронів (2 кВт, 2,45 ГГц) в кожному, загальна кількість 18 магнетронів у гексагональних резонаторах; є найближчим промисловим аналогом по принципу роботи множини магнетронів в системі безперервної дії [7].

[8] – Патент US 11 619 446 B2 (Microwave Drying Device and Processing Box Thereof, 2023) – сучасна конструкція МХ-сушильника з внутрішніми перегородками-каналами, що організують меандровий хід хвилі всередині єдиного корпусу, та аспіраційною системою безпосереднього вологовидалення; розміщення магнетрона на бічній стінці зовнішнього корпусу є альтернативою верхньому розміщенню [8].

Список використаних джерел

[1] US Patent 4 640 020. Zoned microwave drying apparatus and process / Barmatz M. B., Garth J. L. – Publ. 03.02.1987. – URL: <https://patents.google.com/patent/US4640020>

[2] CN Patent 104 188 071 B. Tunnel-type vegetable microwave dryer and its automatic anti-no-load method. – Publ. 2014. – URL: <https://patents.google.com/patent/CN104188071B/en>

[3] US Patent Application 20080104857. Multistage continuous microwave dryer for plate-shaped products, especially fiber boards / Schiehlen A. – Publ. 08.05.2008. – URL: <https://patents.google.com/patent/US20080104857>

[4] US Patent 4 430 806. Microwave agricultural drying and curing apparatus / Toms M. L. – Publ. 14.02.1984. – URL: <https://patents.google.com/patent/US4430806A>

- [5] US Patent 4 045 639. Continuous microwave and vacuum dryer / Tremblay R. – Publ. 30.08.1977. – URL: <https://patents.google.com/patent/US4045639A>
- [6] Патент RU 2 531 709 C1. Мікрохвильова камера безперервної дії для сушіння шпону / Глухих В. В. та ін. – Опубл. 27.10.2014. – URL: <https://patents.google.com/patent/RU2531709C1/en>
- [7] Jelali M., Stichlmair J. System identification of conveyor belt microwave drying process of polymer foams using electrical capacitance tomography // PMC – NCBI. – 2021. – URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8588042/>
- [8] US Patent 11 619 446 B2. Microwave drying device and processing box thereof. – Publ. 04.04.2023. – URL: <https://patents.google.com/patent/US11619446B2>
- [9] MAX Industrial Microwave. Industrial Microwave Belt Conveyor Furnace. – URL: <https://www.maxindustrialmicrowave.com/industrial-microwave-belt-conveyor-furnace-a-160.html>
- [10] Виробник обладнання та розробник технологій переробки сої. <https://bronto.ua/>

2.5. Вибір та обґрунтування основних технологічних режимів роботи розробленої конструкції стрічкової сушарки

Для дослідження процесу видалення вологи при МХ сушінні на кафедрі процесів, обладнання та енергетичного менеджменту ОНТУ розроблено декілька дослідних стендів на основі мікрохвильових камер побутових МХ печей. Декілька досліджень було проведено в напрямі МХ сушіння в стрічкових сушарках. Результати таких досліджень можливо використати в оцінці ефективності МХ сушіння та в обґрунтуванні робочих режимів розробленої конструкції енергоефективної стрічкової МХ сушарки.

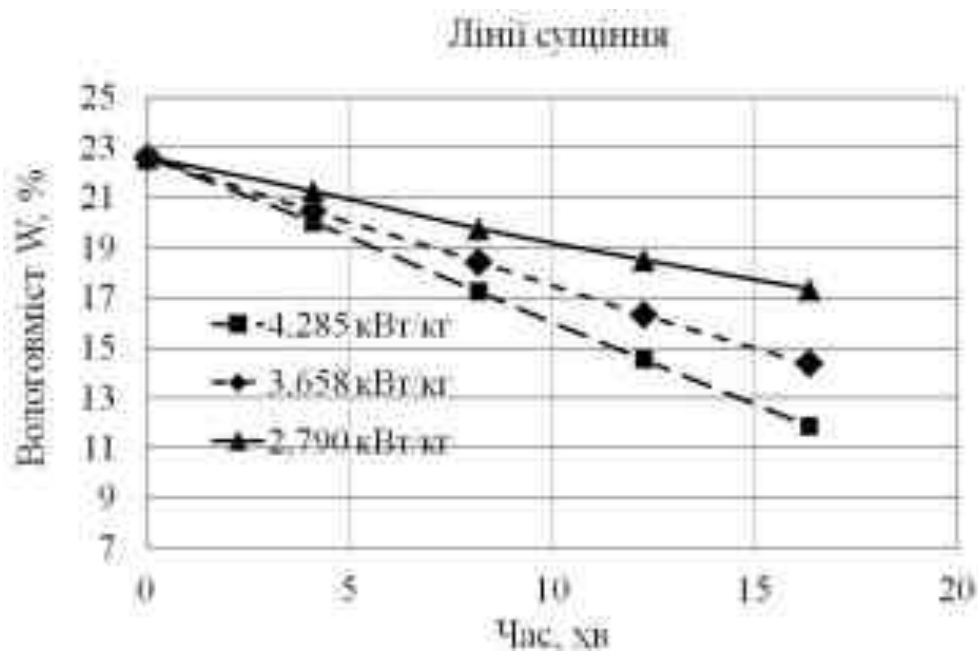
Принцип моделювання процесу сушіння в МХ полі полягає у послідовному, періодичному нагріванні матеріалу зразка в касеті МХ

випромінюванням з обдуванням шару матеріалу потоком атмосферного повітря. Передбачається, що такий процес моделює послідовне нагрівання шару випромінюванням при проходженні через сушильну камеру. Тривалість таких впливів складає десятки секунд і має визначатися розмірами зони сушіння та швидкістю руху стрічки.

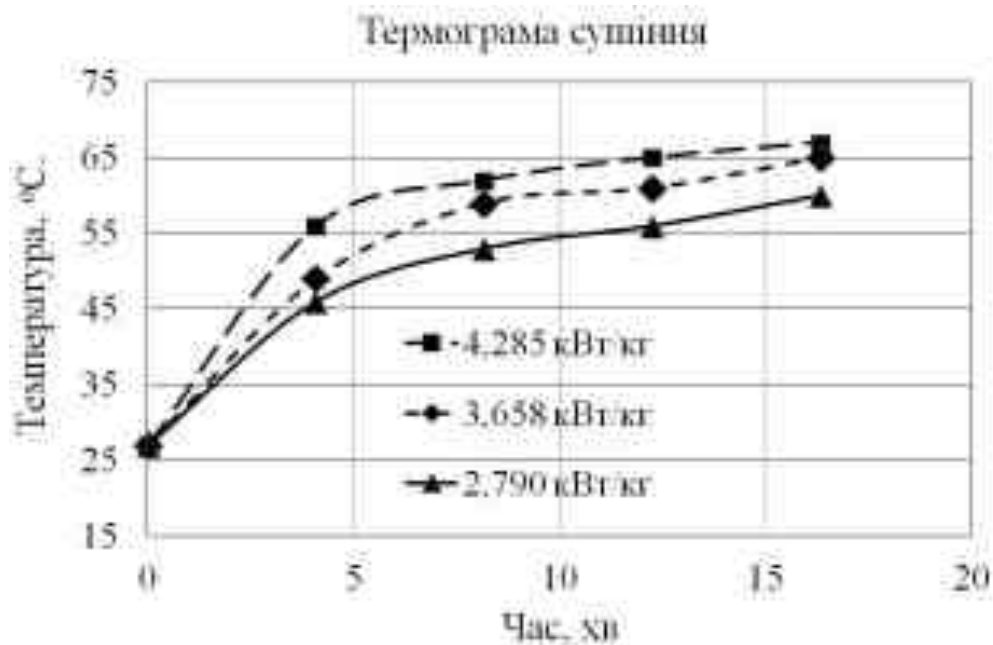
У ході досліджень [2,3,5] визначено кінетику впливу енергопідведення електромагнітним випромінюванням на процес видалення вологи з рослинних матеріалів. Як зразки використовувались невеликі (150-350 г) порції гороху.

Найбільш важливим параметром процесу є тривалість обробки зразка випромінюванням. У ході проведених досліджень встановлено основні залежності між кількістю енергії, що підводиться, і інтенсивністю видалення вологи.

Досліджено залежність параметрів процесу сушіння від завантаження камери і, відповідно, від кількості енергії, що підводиться. Моделювання зміни навантаження проводилося шляхом вибору трьох розмірів касет, товщина шару матеріалу залишалася незмінною та становила 20 мм, площа шару становила: 0,0088 м², вага матеріалу становила 140 г; 0,0132 м², матеріалу – 164 г, 0,0176 м², матеріалу – 215 г. Зазначені параметри при потужності магнетрону 0,6 кВт відповідають питомим енерговитратам: 4,285, 3,658 та 2,790 кВт/кг відповідно.



а)



б)

Рис. 23. Характеристики процесу мікрохвильового сушіння при зміні кількості підведеної енергії: а) лінія сушіння; б) термограма.

В результаті проведених досліджень підтверджено ефективність мікрохвильового способу сушіння, що поєднує подачу МХ - енергії та продування повітрям. Варіант реалізації такого способу сушіння показано на рисунку.

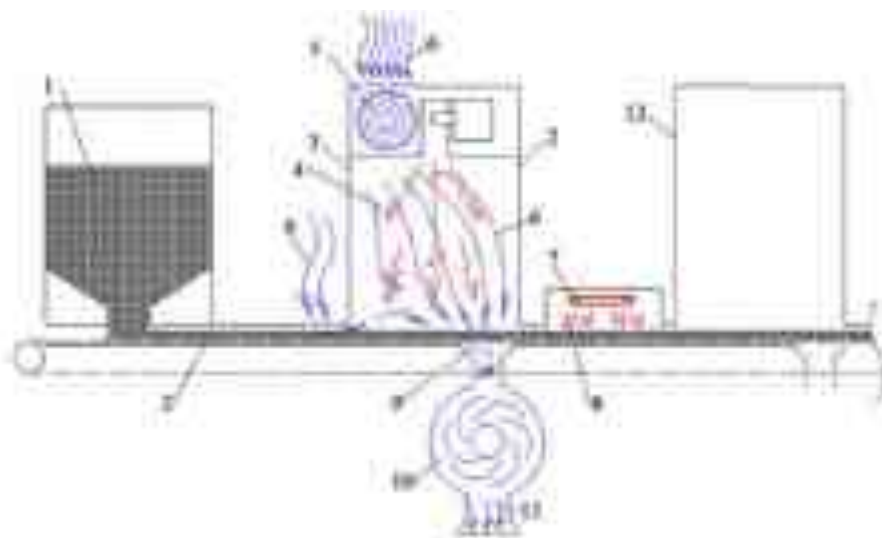


Рис. 24. Схема процесу в мікрохвильовій стрічковій сушарці з сушильною камерою комбінованого типу та інфрачервоним нагріванням: 1 – бункер з вологим матеріалом, 2 – шар вологого матеріалу, що рухається по сітчастому

конвеєру, 3 – перший модуль сушіння, 4 – випромінювання, 6 – потік сухого повітря, 7 – модуль сушіння, 8 – інфрачервоне випромінювання, 9 – продування шару повітрям, 10 – вентилятор, 11 – потік вологого повітря, 12 – наступна сушильна камера.

Енергетичний аналіз мікрохвильового сушіння та полягає в порівнянні витрат енергії на випаровування води в кожному з способів. Відомо, що фізичною межею витрат енергії на перетворення одного кілограма води в пару є енергія, що включає енергію нагріву води до температури випаровування та енергію фазового переходу води в стан пари, що становить середньому 2,7 МДж. Це теоретична мінімальна енергія, необхідна для видалення одного кілограма вологи з сировини. Фактичні витрати, як правило, набагато вищі, оскільки вони включають супутні витрати енергії на нагрівання сухої частини матеріалу, нагрівання обладнання, втрати енергії в навколишнє середовище.

Для мікрохвильового сушіння великою складовою непродуктивних витрат енергії є втрати при перетворенні електричної енергії, що живить мікрохвильові генератори в енергію мікрохвильового електромагнітного поля. Загалом такі втрати становлять близько 40% відсотків і є однією з важливих проблем які ще не вирішені. Але ці втрати є майже єдиними для МХ сушарок, через специфіку взаємодії МХ - випромінювання з вологою в матеріалі, втрати енергії на нагрівання сухої сировини витрачається на порядок менше енергії, ніж при конвективному сушінні.

У той же час конвективні способи сушіння мають сукупні супутні невиробничі витрати, які становлять у кращому випадку до 30% від загального енергоспоживання сушильної установки.

При порівняльному аналізі енерговитрат процесу вологовидалення при сушінні вологої рослинної сировини як точку відліку можна розглядати поточні енерговитрати на кілограм випарованої вологи, характерні для найпоширеніших конвективних технологій сушіння зерна. Більшість зерносушарок мають втрати близько 5,0 МДж і лише у деяких зразків вони близькі до 4,7 МДж. Для інших менш енергоєфективних технологій, таких як

стрічкові сушарки, рівень витрат енергії на випаровування вологи може становити близько 7-8 МДж на кілограм вологи. Тому рівень 4,5 МДж/кг можна вважати конкурентним для технології мікрохвильової сушіння в порівнянні з методом конвективного сушіння.

Дуже складно оцінити енергетичну ефективність комбінованого методу МХ сушіння реалізованого у вигляді випробувального стенду, що має низьку продуктивність і не застосовується у промислових умовах. При порівняльному аналізі доцільно оцінити механізми енергозабезпечення та вологовідведення, що використовуються для розробки кожного з комбінованих способів. Порівнюючи такі витрати з результатами науково-дослідних робіт, можна зробити узагальнений висновок про ступінь більшої чи меншої енергоефективності способів сушіння, що порівнюються.

В цьому випадку при аналізі енергетичних витрат на вологовидалення, характерних тільки для МХ сушіння, достатньо визначити витрати електроенергії на роботу самої експериментальної установки, оскільки такий процес не споживає інших видів енергії. Витрати на роботу магнетрона можна визначити шляхом вимірювання енергоспоживання установки під час його роботи в порівнянні із неробочим енергоспоживанням.

За результатами дослідження [7] побудовано графіки залежностей.

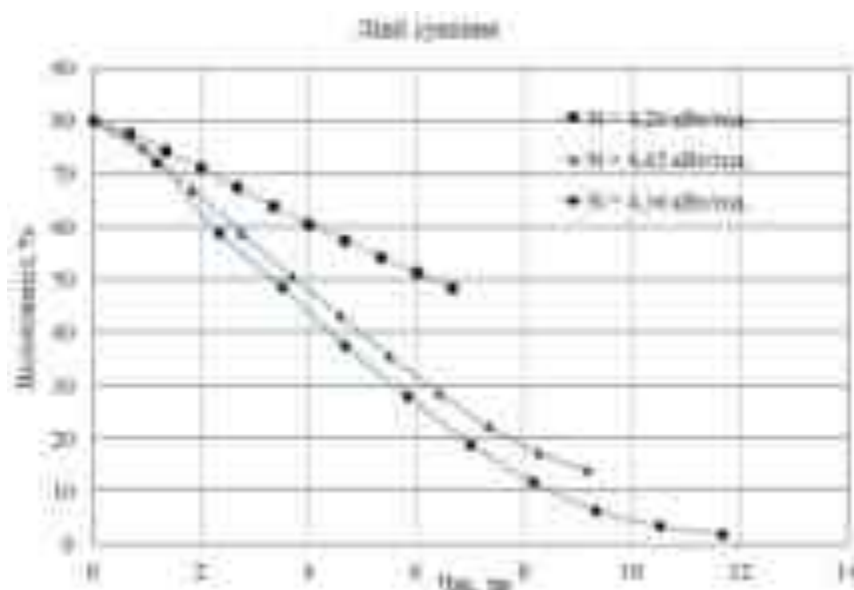


Рис. 25. Лінії сушіння при різних рівнях підведення енергії та постійної тривалості обдування шару нагрітого вологого матеріалу.

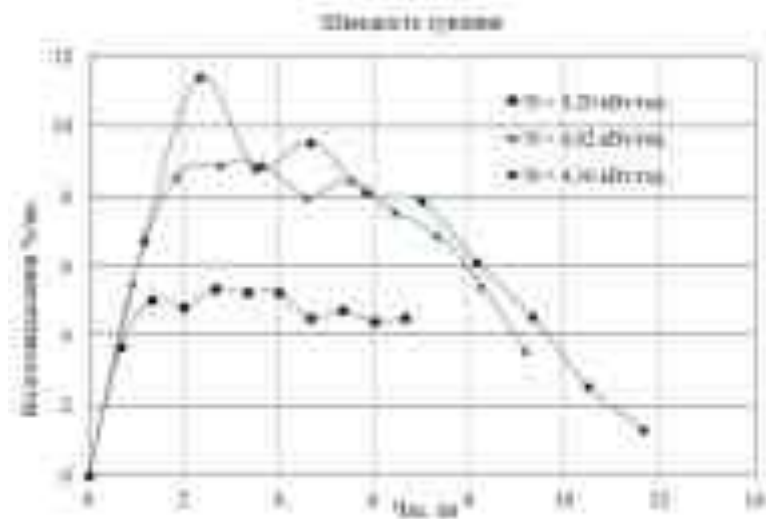


Рис. 26. Графік зміни швидкості сушіння за різних рівнів підведення енергії.

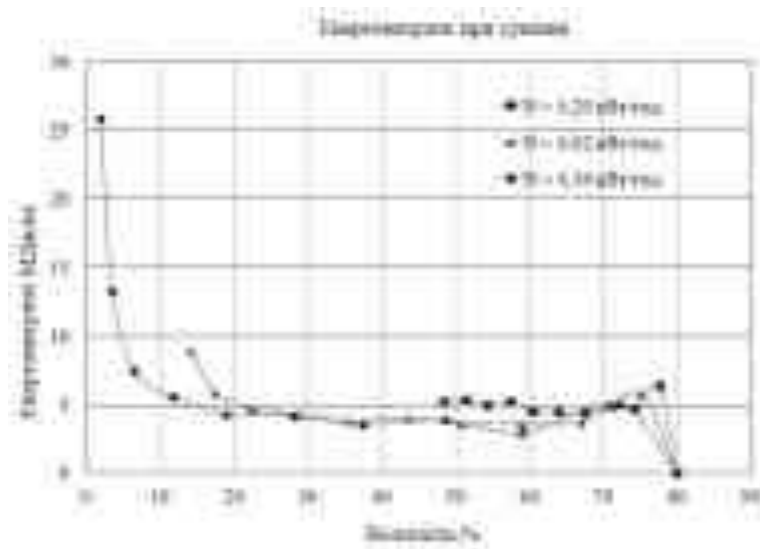


Рис. 27. Графік зміни енерговитрат на вологовидалення при різних рівнях підведення енергії.

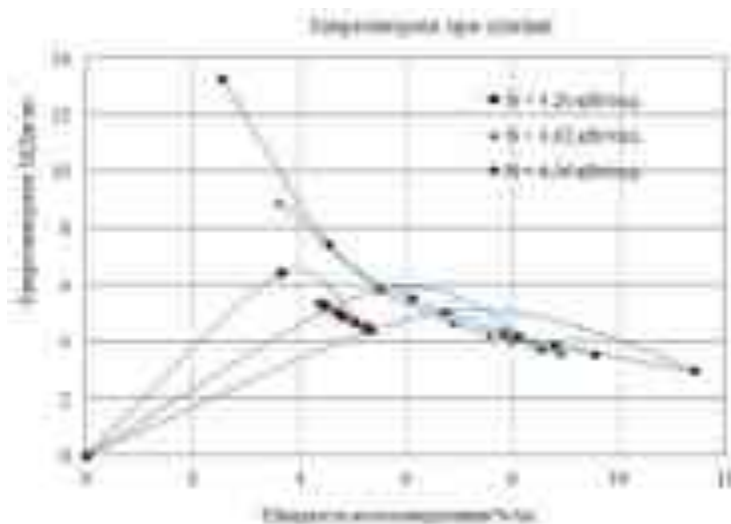


Рис.28. Графік залежності витрат енергії на вологовидалення від швидкості вологовидалення при різних рівнях підведення МХ енергії.

Висновки за результатами аналізу енергоефективності процесу сушіння в МХ сушарці:

- Процес МХ сушіння найбільш ефективний у його першій третині, при енерговитратах в межах 1-3 МДж/кг швидкість видалення вологи досягає свого максимуму - 16-18%/хв.
- Енерговитрати на видалення вологи зростають після видалення 50 % вологи. У перші 2/3 процесу витрата зростає лінійно від 2 до 5 МДж/кг вологи, а після досягнення рівня вологості 25-27% витрати швидко збільшуються до 10-14 МДж/кг.
- При подачі МХ енергії в межах 4 кВт/кг вологого продукту до 2/3 вихідної вологи буде видалено за перші 4 хвилини.
- Максимальне видалення вологи відбувається на початку процесу.

III. ЗАКЛЮЧНА ЧАСТИНА

8. ТЕХНОЛОГІЇ ОХОРОНИ ПРАЦІ ТА ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

Всі працівники, які приймаються на роботу та в процесі роботи проходять навчання та інструктаж з питань охорони праці на виробництві в компанії, вивчають правила надання першої медичної допомоги та першої допомоги постраждалим у разі нещасних випадків, а також правила поведінки у компанії. нещасний випадок чи пожежа у компанії.

Відповідальність за керівництво роботою з охорони здоров'я та безпеки праці, проведення заходів щодо зниження та попередження виробничого травматизму та професійних захворювань покладається на керівника підприємства. Відповідальним за охорону праці, техніку безпеки та виробничої санітарії є інженер (старший інженер) з техніки безпеки, підпорядкований головному інженеру підприємства.

У компаніях харчової та переробної промисловості для працівників, які виконують ремонтні роботи на обладнанні підвищеної небезпеки, обов'язково навчання безпечним методам роботи з обов'язковими іспитами, яке відбувається безпосередньо на виробництві зі схвалення керівництва. компанії та робочі програми, погоджені з органами державного нагляду за безпекою. Йдеться про ремонтні роботи парових та водяних опалювальних приладів; промислові печі та теплові установки, що працюють під тиском; компресори; холодильні агрегати; газове обладнання; електричне обладнання.

Види та порядок проведення інструктажів з охорони праці визначаються Типовим зведенням правил щодо порядку навчання та перевірки знань з охорони праці, затвердженим наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці № 15 від 26 січня 2005 р. .

Загальні правила техніки безпеки

При переміщенні по території слід дотримуватися обережності, прислухатися до сигналів транспорту, що рухається.

Робітники повинні триматися правої сторони під час зіткнення з рухом транспорту.

Забороняється торкатися обірваних ліній електропередач та ліній з пошкодженою ізоляцією.

Будьте обережні з кабелями, ланцюгами та мотузками.

Не слід наступати на кришки люків, різні кришки ям, траншей та котлованів, щоб не впасти в них.

Необхідно вивчити попереджувальні знаки, звукову та світлову сигналізацію, що діють на території та у приміщеннях установи.

Заборонений:

Стосуватися і спиратися на частини устаткування, що рухаються; використовуйте рукавички при роботі там, де є ризик бути захопленим їх частинами, що обертаються; використовувати несправні засоби індивідуального захисту.

Торкатися до оголених струмоведучих та незахищених частин електроустаткування. У разі виявлення порушення ізоляції електричних проводів, обриву струмових частин електрообладнання або порушення заземлення необхідно негайно повідомити про це безпосереднього начальника для вжиття заходів щодо усунення несправності. Забороняється курити сигарети та кидати недопалки у приміщеннях та на території установи.

Для МХ установок з переробки (сушіння) вологої сировини та матеріалів найбільш небезпечним фактором при їх обслуговуванні, як і для переважної більшості технологічного обладнання, є використання в таких установках електроенергії. Для безпечної експлуатації МХ обладнання необхідно повністю та чітко виконувати загальні вимоги щодо експлуатації електроустановок до 1000 В.

Специфічним фактором для МХ установок є використання в них НВЧ-випромінювання в діапазоні 2,4 МГц. Можливі й інші діапазони в залежності від типу магнетрону, що використовується в них, наприклад 915 МГц. Цей фактор МХ установок унеможливорює для людини відчуття МХ хвиль при їх випромінюванні від несправної установки. З метою забезпечення безпеки персоналу при експлуатації та обслуговуванні МХ установок необхідно

ознайомлення персоналу з наступними характеристиками обладнання, з метою запобігання використанню обладнання в несправному стані (наприклад, з відкритою камерою МХ сушіння), контролювати та перевіряти роботу елементів обладнання, що блокують можливість його небезпечної роботи.

4. АНАЛІЗ НЕБЕЗПЕЧНИХ ДЛЯ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА ФАКТОРІВ, ЩО МОЖУТЬ ВИНΙΚАТИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ УСТАНОВКИ

Під час експлуатації установки основними екологічно небезпечними чинниками є споживання електроенергії, теплові втрати, можливе електромагнітне випромінювання при порушенні герметичності НВЧ-тракту, утворення відходів сировини та пакувальних матеріалів, а також стічні води від санітарного очищення обладнання.

Аналіз небезпечних для навколишнього середовища факторів, що можуть виникати при експлуатації установки

У процесі експлуатації технологічної установки, призначеної для оброблення або сушіння харчової сировини, вплив на навколишнє середовище може проявлятися через низку фізичних, енергетичних та санітарно-гігієнічних чинників. Для харчових виробництв характерними екологічними проблемами є утворення стічних вод, накопичення органічних відходів, підвищене енергоспоживання та можливі викиди парів, аерозолів і тепла в робочу зону та навколишнє середовище. Стічні води підприємств харчової промисловості, хоча не завжди є токсичними, після потрапляння у водойми можуть знижувати вміст кисню та порушувати природний стан водних екосистем.

Для установки з мікрохвильовим або комбінованим тепловим обробленням додатково слід враховувати фактор електромагнітного випромінювання. Електромагнітні поля виникають при роботі височастотного електрообладнання, а в разі порушення технічної справності екранувальних елементів, дверцят робочої камери, хвилеводів або ущільнень можливе небажане випромінювання в навколишній простір. За нормальної експлуатації мікрохвильове обладнання не повинно становити небезпеки, однак при недотриманні правил обслуговування або при пошкодженні захисних

елементів зростає ризик шкідливого впливу електромагнітного поля як на персонал, так і на навколишнє технічне середовище.

Суттєвим екологічним фактором є споживання електричної енергії, оскільки будь-яке енергоємне обладнання опосередковано впливає на довкілля через загальний енергетичний баланс підприємства. Висока енергоємність технологічного процесу збільшує непряме навантаження на довкілля, пов'язане з виробництвом електроенергії, особливо за відсутності енергоощадних режимів роботи. Тому під час проектування та експлуатації установки важливо забезпечити оптимальний режим нагрівання, мінімізацію холостих ходів і раціональне використання потужності магнетронів, електродвигунів та допоміжного обладнання.

Ще одним джерелом негативного впливу є теплові викиди та виділення вологи, пари, запахів або дрібнодисперсних аерозолів під час сушіння чи нагрівання рослинної сировини. За недостатньої вентиляції ці виділення можуть погіршувати мікроклімат виробничого приміщення, сприяти утворенню конденсату й вторинному забрудненню повітря органічними домішками. Органічні залишки сировини, що накопичуються в зоні завантаження, транспортування та вивантаження продукту, можуть бути джерелом мікробіологічного забруднення та неприємних запахів, якщо не забезпечено своєчасне прибирання й утилізацію.

При експлуатації установки також можуть утворюватися тверді відходи у вигляді зіпсованої сировини, обрізків, пилу, пакувальних матеріалів, ущільнювачів, елементів теплоізоляції або відпрацьованих електротехнічних компонентів. Особливу увагу необхідно приділяти утилізації електронних вузлів, магнетронів, кабельної продукції та допоміжних елементів, оскільки вони не повинні потрапляти до загального побутового потоку відходів. Важливим екологічним заходом є роздільне збирання відходів, передавання відпрацьованих компонентів спеціалізованим організаціям та запобігання потраплянню технологічного сміття у стічну систему.

Отже, до основних небезпечних для навколишнього середовища факторів

при експлуатації установки слід віднести: підвищене енергоспоживання, можливі витоки електромагнітного випромінювання, теплові та вологісні викиди, утворення органічних і твердих відходів, а також забруднення стічних вод під час миття обладнання. Для зменшення впливу цих чинників необхідно передбачити герметизацію робочої камери та НВЧ-тракту, ефективну вентиляцію, раціональні режими енергоспоживання, своєчасне очищення установки, локальний збір відходів та дотримання санітарних вимог при експлуатації обладнання.

5.РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО БЕЗПЕЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ МІКРОХВИЛЬНОЇ СТРІЧКОВОЇ УСТАНОВКИ

Безпечна експлуатація енергоефективної мікрохвильової стрічкової установки повинна забезпечувати захист персоналу від ураження електричним струмом, впливу електромагнітного випромінювання надвисокої частоти, термічних опіків, пожежонебезпечних ситуацій та механічних травм під час руху стрічкового транспортера. Основою безпечної роботи є справний технічний стан установки, дотримання регламенту пуску, зупинки, очищення та технічного обслуговування, а також постійний контроль герметичності робочої камери і вузлів НВЧ-тракту.

Перед початком роботи необхідно перевірити справність електричної частини, наявність захисного заземлення, стан кабельних з'єднань, цілісність дверцят, огорожень, хвилеводів, ущільнювальних елементів і блокувальних пристроїв. Експлуатація установки за наявності пошкоджень корпусу, дверних замків, елементів екранування або системи блокування не допускається, оскільки це може призвести до витоку мікрохвильового випромінювання та створення небезпеки для обслуговуючого персоналу.

Пуск мікрохвильової установки дозволяється виконувати лише після завантаження технологічного продукту на стрічку та перевірки нормальної роботи систем вентиляції й охолодження. Робота НВЧ-генераторів без навантаження є небажаною, оскільки вона викликає перегрівання магнетронів, перевантаження окремих елементів та зниження ресурсу обладнання. Також не

допускається потрапляння у робочу камеру або на стрічку металевих предметів, елементів тари з металевими вставками чи інструменту, здатних спричинити іскріння, локальний перегрів або аварійний режим роботи.

Під час експлуатації установки необхідно забезпечити постійне спостереження за температурним режимом, станом стрічки, роботою приводу, системою охолодження магнетронів та витяжною вентиляцією. У разі появи стороннього шуму, запаху перегріву, диму, іскріння, нестабільного руху стрічки, підвищеного нагрівання корпусу або відмови блокувань установку слід негайно вимкнути від електромережі та припинити її експлуатацію до усунення несправності. У випадку займання продукту або елементів усередині камери необхідно негайно відключити живлення, не відкривати робочу камеру без потреби, повідомити відповідальних осіб та застосовувати первинні засоби пожежогасіння відповідно до інструкцій підприємства.

Для захисту персоналу від механічних травм усі рухомі елементи транспортера, приводу, ланцюгових або ремінних передач повинні бути закриті захисними кожухами. Завантаження та вивантаження продукту слід виконувати так, щоб руки оператора не потрапляли в зону руху стрічки, барабанів та притискних елементів. Налагодження, очищення, підтягування кріплень, регулювання стрічки та ремонтні роботи допускається виконувати лише після повної зупинки установки, відключення її від мережі та вжиття заходів проти випадкового повторного вмикання.

Особливу увагу потрібно приділяти санітарному стану установки, оскільки накопичення залишків продукту, жиру, пилу або вологи на поверхнях камери, стрічки, напрямних і вентиляційних каналах може викликати перегрів, димлення, погіршення теплообміну та підвищення пожежної небезпеки. Очищення внутрішніх поверхонь повинно здійснюватися м'якими неагресивними засобами без використання металевих щіток, абразивів або предметів, що можуть пошкодити захисне покриття, ущільнення чи екранувальні поверхні. Після санітарної обробки обладнання необхідно перевіряти сухість електротехнічних вузлів і відсутність залишків вологи у

зонах, де проходить електричний струм або формуються НВЧ-поля.

Електробезпека установки повинна забезпечуватися застосуванням справної апаратури захисту, автоматичних вимикачів, пристроїв аварійного відключення та надійного заземлення всіх металевих неструмовідних частин. Роботи з відкривання шаф керування, перевірки магнетронів, високовольтних ланцюгів, конденсаторів, трансформаторів і силових з'єднань дозволяється виконувати лише кваліфікованому електротехнічному персоналу з дотриманням правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Під час технічного обслуговування необхідно обов'язково перевіряти відсутність напруги, виконувати блокування повторного пуску та використовувати попереджувальні знаки безпеки.

З метою підвищення загальної безпеки й енергоефективності доцільно передбачити автоматичний контроль температури продукту і повітря в робочій зоні, контроль струму навантаження магнетронів, датчики положення дверцят та аварійні кнопки зупинки установки. Раціональне регулювання потужності НВЧ-нагріву, швидкості стрічки та тривалості оброблення дозволяє не лише знизити енерговитрати, а й запобігти перегріву продукту, пошкодженню стрічки та виникненню аварійних ситуацій. Таким чином, безпечна експлуатація енергоефективної мікрохвильової стрічкової установки досягається шляхом поєднання технічних засобів захисту, правильної організації роботи персоналу та суворого дотримання інструкцій з охорони праці, пожежної безпеки й електробезпеки.

ЗАКЛЮЧЕННЯ

У результаті виконання кваліфікаційної роботи (дипломного проєкту) розроблено конструкцію енергоефективної мікрохвильової стрічкової установки для термічного оброблення та сушіння харчової сировини, а також обґрунтовано основні технічні рішення щодо її привода, транспортної системи та безпечної експлуатації.

У роботі вирішено актуальне інженерне завдання, що полягає у розробленні енергоефективної мікрохвильової стрічкової установки для оброблення харчової рослинної сировини. На основі аналізу літературних і технічних джерел встановлено, що використання мікрохвильового нагрівання у поєднанні зі стрічковим транспортуванням продукту дозволяє інтенсифікувати тепломасообмінні процеси, знизити тривалість оброблення, підвищити рівномірність нагрівання та зменшити питомі енерговитрати порівняно з традиційними способами сушіння й нагріву.

У процесі проєктування було обґрунтовано вибір основних елементів транспортної системи установки. Для переміщення продукту прийнято синтетичну безметалеву харчову конвеєрну стрічку шириною 500 мм, що відповідає санітарно-гігієнічним вимогам, характеризується малою масою, достатньою гнучкістю та придатністю до використання в установках харчового призначення. На основі вихідних даних виконано підбір привідного барабана, електродвигуна та черв'ячного редуктора, що забезпечують необхідні кінематичні параметри руху стрічки й надійну роботу конвеєра в малонавантаженому режимі.

У роботі проведено інженерні розрахунки основних вузлів привода, зокрема визначено параметри електродвигуна, передаточне число редуктора та виконано перевірку шпонкового з'єднання на міцність. Результати розрахунків підтвердили достатню працездатність і міцність запропонованої конструкції, а прийняті стандартні елементи привода забезпечують простоту виготовлення, монтажу та подальшого технічного обслуговування установки.

Окрему увагу приділено питанням охорони праці, електробезпеки, екологічної безпеки та безпечної експлуатації мікрохвильового обладнання. Проаналізовано небезпечні та шкідливі фактори, які можуть виникати під час роботи установки, а також сформульовано рекомендації щодо зниження ризиків для персоналу й навколишнього середовища. Запропоновані заходи спрямовані на підвищення надійності, безпечності та енергоефективності роботи обладнання в умовах харчового виробництва.

Таким чином, поставлену мету кваліфікаційної роботи досягнуто, а розроблена мікрохвильова стрічкова установка може бути рекомендована як технічна основа для подальшого вдосконалення процесів сушіння та термооброблення рослинної сировини. Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих конструктивних і розрахункових рішень під час проектування, модернізації та автоматизації енергоефективного технологічного обладнання харчової промисловості.

ВИКОРИСТАНІ ЛІТЕРАТУРНІ ДЖЕРЕЛА

1. Мерко І.Т., Моргун В.О. Наукові основи і технологія переробки зерна . Підручник.. Одеса: Друк, 2001. – 348 с. ISBN 966-7934-57-8.

2. Безбах, І., Яровий, І., & Войтенко, О. (2019). Комбіновані способи енергопідведення в процесах сушіння рослинної сировини. Scientific Works, 83(2), 71-77.

3. Інноваційні способи енергопідводу у процесах сушіння термолабільної сировини / І. І. Яровий, М. А. Кашкано, О. І. Маренченко, Є. О. Пилипенко // Інноваційні енерготехнології – 2019: зб. пр. VII Міжнар. наук.-практ. конф., Одеса, 9–13 верес. 2019 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій ; ред. кол.: О. Г. Бурдо, Ю. О. Левтринська, Я. О. Масельська ; міжнар. оргком.: Б. В. Єгоров (голова) та ін. – Одеса, 2019. – С. 17–23 : рис. – Бібліогр.: 9 назв.

4. Виробник мікрохвильового обладнання. Fricke und Mallah Microwave Technology GmbH. Werner-Nordmeyer-Str. 25 | 31226 Пейне | Німеччина. Тел.: +49 (0) 5171 54 57-0 | Факс: +49 (0) 5171 54 57-26. info@microwaveheating.net [Електронний ресурс]. Режим доступу www.microwaveheating.net.

5. Яровий І. І. Перспективи використання технологій адресної доставки енергії у виробництві пектину / І. І. Яровий, В. П. Алі // Збірник праць 81-а наукова конференція викладачів академії, Одеса, 27–30. – Одеса: ОНАХТ, 2021. – с. 219-221.

6. Сушені фрукти та овочі [Електронний ресурс]. - Режим доступу: [URL: http://vzv.znaitovar.ru/s/Sushenie_plodi_i_ovoshhi.html](http://vzv.znaitovar.ru/s/Sushenie_plodi_i_ovoshhi.html).

7. Яровий І. І. Перспективи використання технологій адресної доставки енергії у виробництві пектинів / І. І. Яровий, В. П. Алі // Збірник тез доповідей 81-ї наукової конференції викладачів академії, Одеса, 27–30 квіт. 2021 р. / Одес. нац. акад. харч. технологій ; під заг. ред. Б. В. Єгорова. – Одеса : ОНАХТ, 2021. – С. 219–221 : рис. – Бібліогр.: 1 назв.

8. Шутюк, В. В. Використання мікрохвильового випромінювання для сушіння харчових продуктів / В. В. Шутюк // Наукові праці Національного технічного університету України. – К.: НІХТ, 2015. – Том 21, вип. 3. –

С.133-140.

9. Бурдо О.Г. «Енергетичний моніторинг харчової та переробної промисловості»: підручник / О.Г. Бурдо, Ф.А. Трішин, І.І. Яровий – Одеса: Мажента, 2020. – 246 с.: іл. 81, табл. 49.

Форм.	Зона	Поз.	Позначення	Найменування	Кіль.	Прим.
				<i>Документація</i>		
A1		1	КМСА 00.00.00.ТС	Технологічна схема	1	
A1		2	КМСА 00.00.00.ЗВ	Загальний вигляд	1	
A1		3	КМСА 00.00.00.СК	Кінематична схема	1	
A1		4	КМСА 00.00.00.КЗ	Складальне креслення	1	
A1		5	КМСА 05.00.00.СК	Натяжна станція	1	
A1		6	КМСА 05.00.01.СК	Барабан привідний	1	
A1		7	КМСА 07.00.00.СК	Дослідження та стенд	1	
A4		8	КМСА 00.00.00.ПЗ	Пояснювальна записка	1	
				<i>Збірні одиниці</i>		
A1		1	КМСА 01.00.00.СК	Станина	1	
A1		2	КМСА 02.00.00.СК	Сушильна МХ камера	1	
A1		3	КМСА 03.00.00.СК	Генератори МХ поля	8	
A1		4	КМСА 04.00.00.СК	Вхідний шлюз	2	
A1		5	КМСА 05.00.00.СК	Привідна станція	1	
A1		6	КМСА 05.00.02.СК	Барабан привідний	1	
A1		7	КМСА 05.00.03.СК	Редуктор NMRV 030	1	
A1		8	КМСА 05.00.04.СК	Натяжна станція	1	
A1		9	КМСА 05.00.05.СК	Барабан натяжний	1	
A1		10	КМСА 06.00.00.СК	Система продувки	1	
A1		11	КМСА 06.00.01.СК	Система аспірування	1	
A1		12	КМСА 07.00.00.СК	Вентилятори продувки	2	

КМСА 00.00.00.ПЗ

Зм	Лист	№ докум.	Підп.	Дата
Розроб.		Анцєфоров В.		
Перев.		Яровий І.І.		
Н.контр.				
Утв.				

**Розробка конструкції енерго-
ефективної мікрохвильової
стрічкової сушарки**

Літ.	Лист	Листів
ОНТУ, каф. ПОтаЕМ		

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ BDP-1000

- Продуктивність - 1000 кг / година
- Вологість продукту - тах 8 %
- Вологість сировини - тах 25 %
- Температура сушильного агента - 60 ... 110 °C
- Фракція сировини - 3 ... 25 мм
- Насипна вага сировини - 0,3 ... 0,5 т/м³
- Витрата повітря - 10 000 м³ / година
- Довжина - 21 100 мм
- Ширина - 3 900 мм
- Висота - 4 000 мм
- Висота завантаження сировини - 2 850 мм
- Висота вивантаження продукту - 700 мм
- Маса - тах 20 000 кг
- Витрата пари - 430 кг / година
- Теплова потужність парових нагрівачів - 2x115=230 кВт
- ВСТАНОВЛЕНА ПОТУЖНІСТЬ (без парогенератора) - тах 18 кВт

ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МХ СУШАРКИ

- Продуктивність - 100-360 кг / година
- Вологість сировини - тах 12-18 %
- Температура сушильного агента - 60 ... 110 °C
- Фракція сировини - 3 ... 20 мм
- Насипна вага сировини - 3 ... 4 кг/м.кв.
- Витрата повітря - 10 000 м³ / година
- Корисна довжина 2000 мм
- Корисна ширина 600 мм
- Корисна висота 117 мм
- Вага при бл. 3500 кг
- ВСТАНОВЛЕНА ПОТУЖНІСТЬ МХ генераторів - тах 24 кВт

Технологічна лінія переробки сої

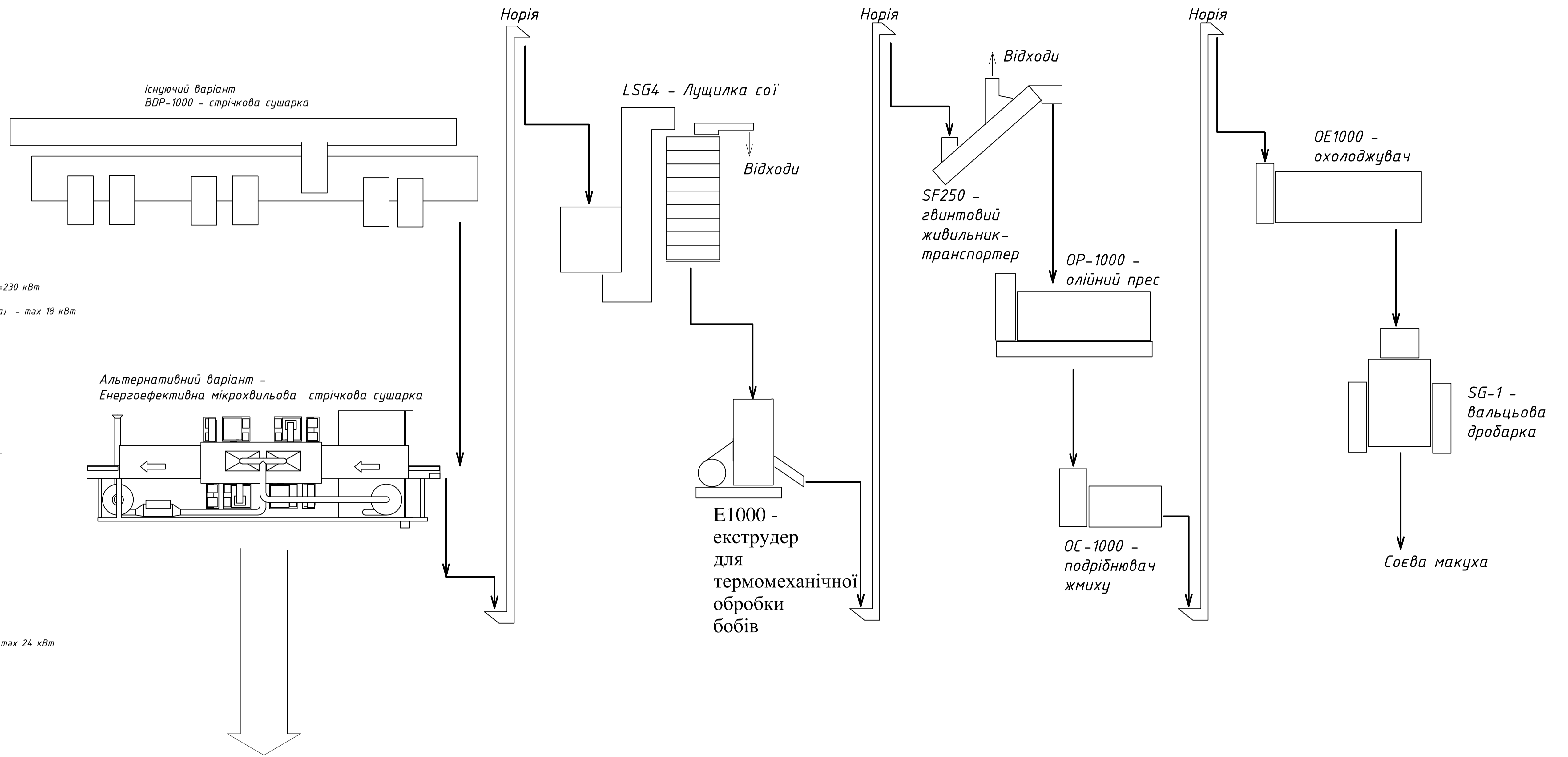
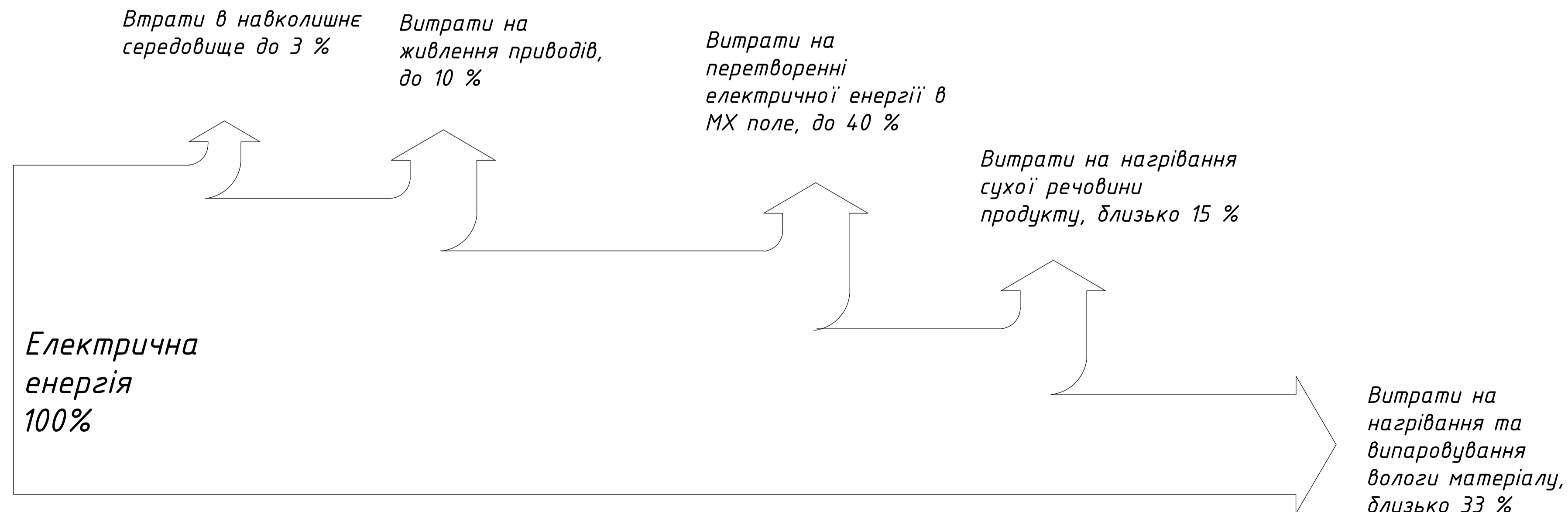


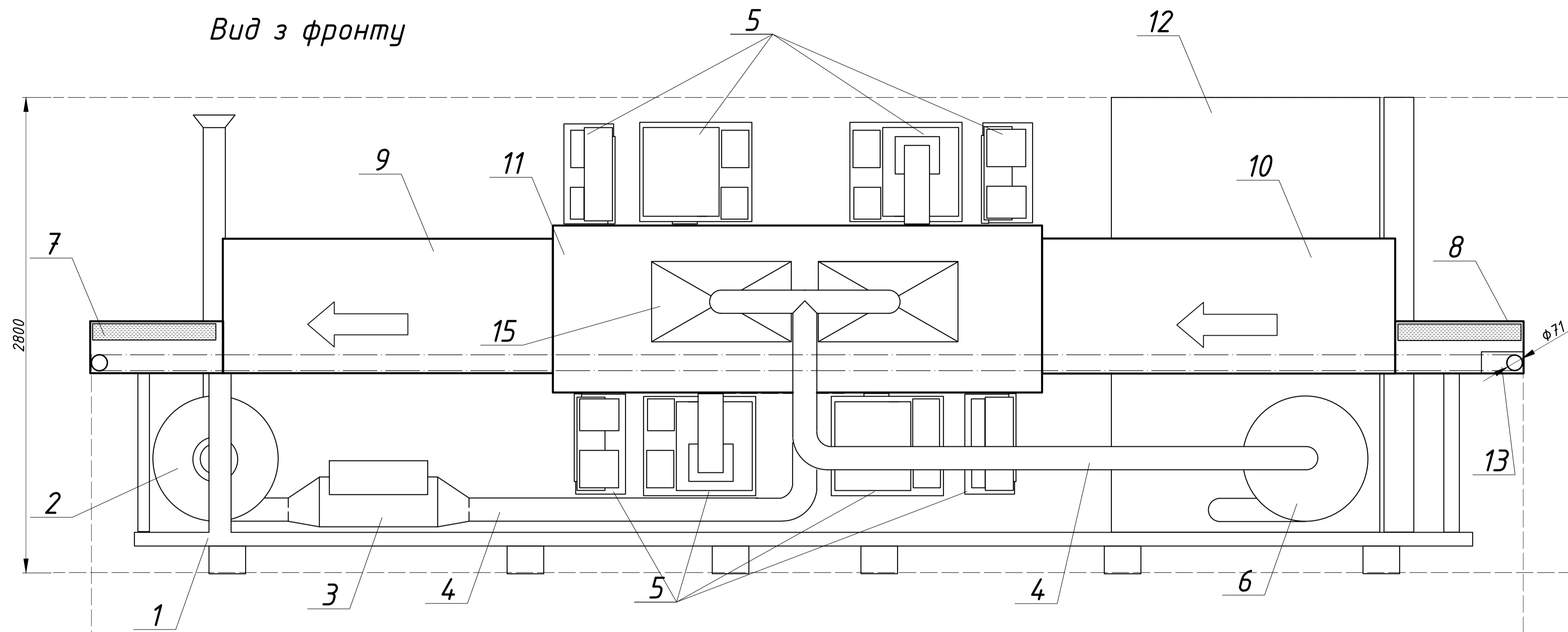
Схема конверсії енергії в процесі сушіння мікрохвильовим випромінюванням



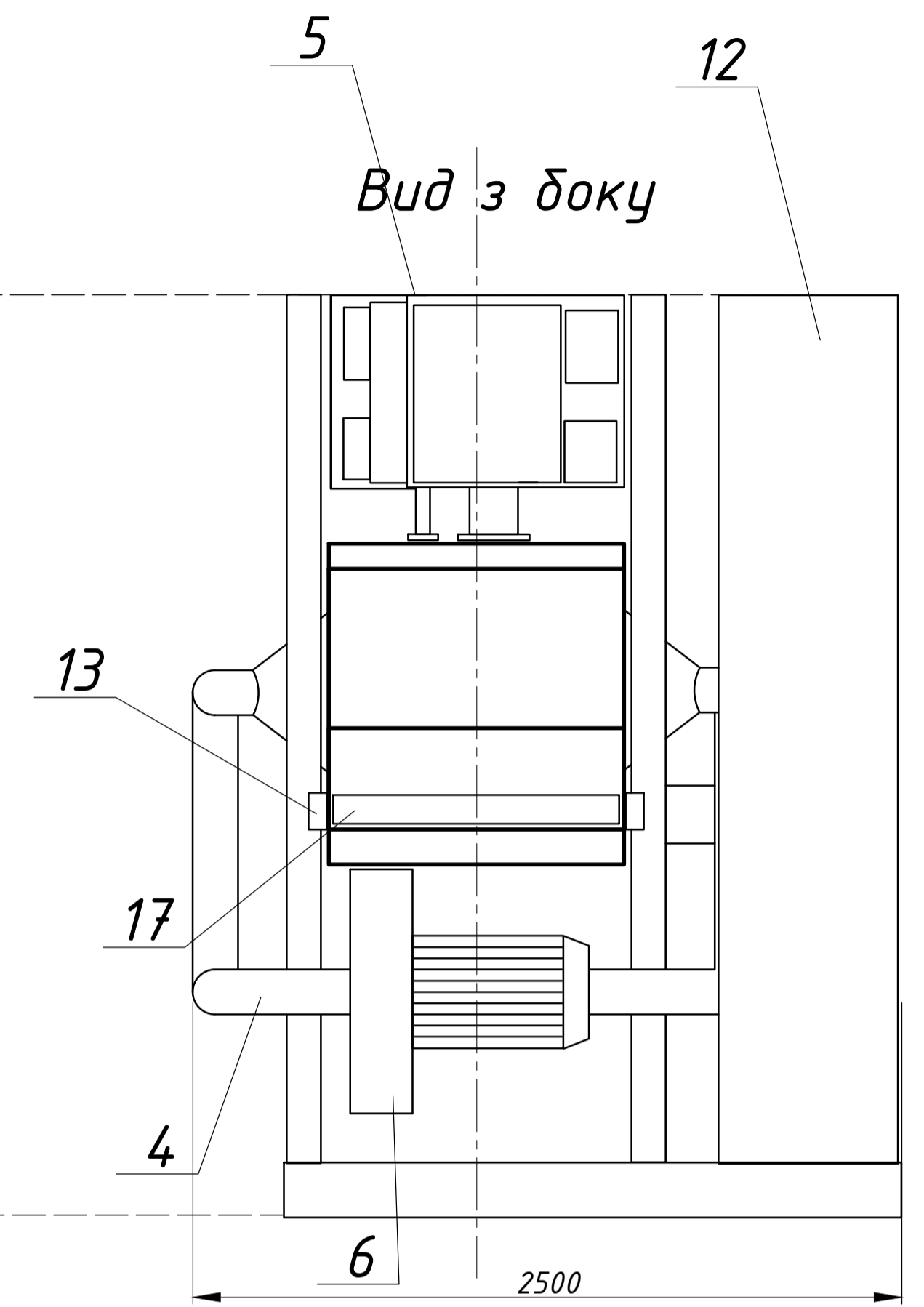
				КРМ.ПОтаЕМ.1.707-03.2.1		
Зм.	Лит.	№ документа	Підпис	Дата	Розробка енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки	Лит
Розробив		Анцферов В.О.				Маса
Перевірив		Яровий І.І.				Масштаб
Т. контроль						Лист 1
Зав. каф.		Бурда О.Г.				Листів 7
Ні контроль					Технологічна схема КМСА 00.00.00.ТС	ОНТУ, каф. ПОтаЕМ
Затвердив						

Загальний вигляд енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки

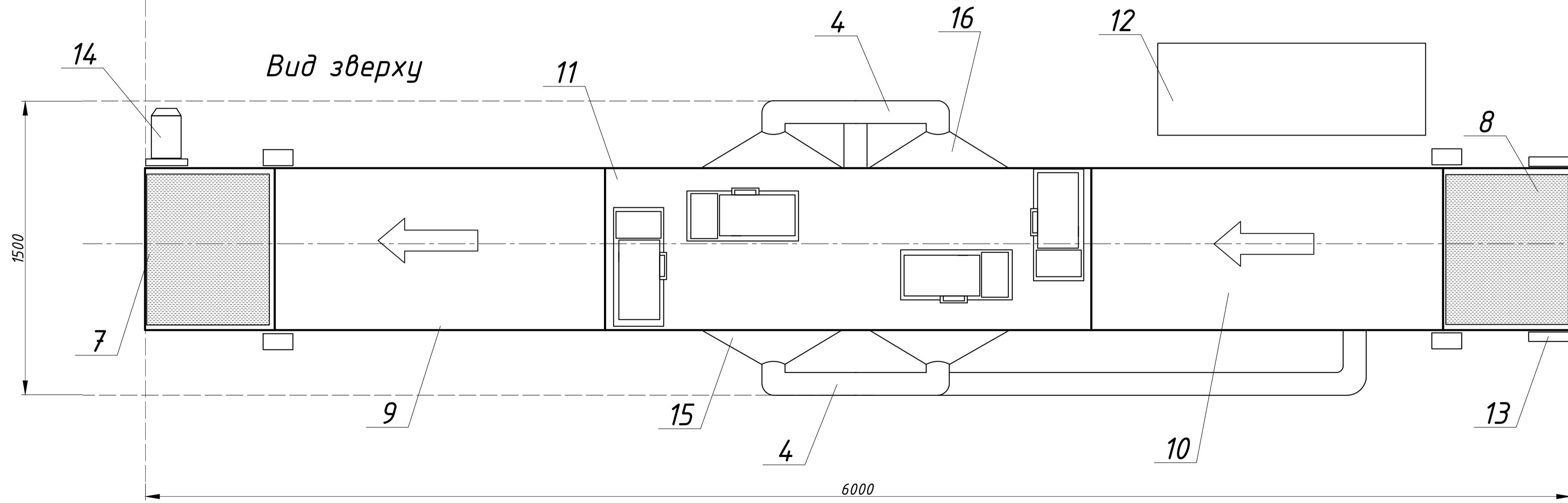
Вид з фронту



Вид з боку



Вид зверху

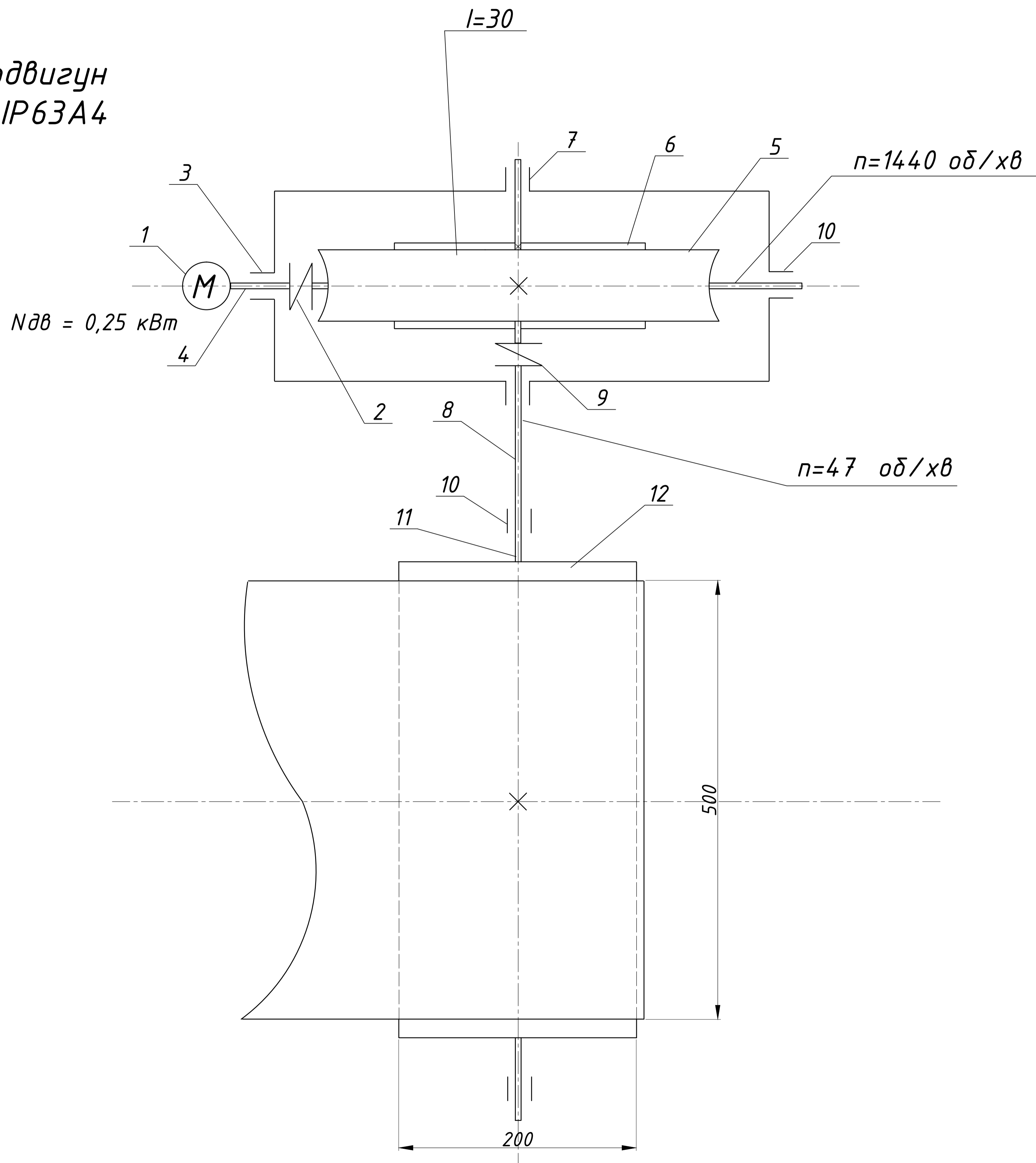


Позиційний номер	Найменування обладнання	Кільк	Примітки
1	Станина (каркас) МХ установки	1	
2	Вентилятор подачі гарячого повітря	1	
3	Термоелектричний проточний нагрівач повітря	1	
4	Повітроробід системи подачі та відведення повітря	1	
5	Мікрохвильовий генератор	8	
6	Вентилятор відведення відпрацьованого повітря	1	
7	Вихідний шлюз сушильної установки з водяним навантаженням	1	
8	Вхідний шлюз сушильної установки з водяним навантаженням	1	
9	Вихідний тунель сушильної камери	1	
10	Вхідний тунель сушильної камери	1	
11	Мікрохвильова сушильна камера	1	
12	Щит керування сушильною установкою	1	
13	Напругний пристрій вбудованого конвеєра в сушильної установки	2	
14	Привід (мотор-редуктор) конвеєра сушильної установки	1	
15	Конфузор відводу теплога, вологого повітря від сушильної камери	2	
16	Дифузор підводу гарячого повітря до сушильної камери	2	
17	Стрчка вбудованого конвеєра сушильної установки	1	

				КРМ.ПОтаЕМ.0.730-03.2.1				
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата	Розробка енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки	Лист	Маса	Масштаб
Розробив		Анцеров В.О.						
Перевірив		Ярощий І.І.						
Т. контроль						Лист 2	Листів 7	
Зав. каф.		Бурда О.Г.			Креслення загального виду КМСА 00.00.00.3В	ОНТУ, каф. ПОтаЕМ		
Н. контроль								
Затвердив								

Редуктор NMRV 030

Електродвигун
типу АІР63А4

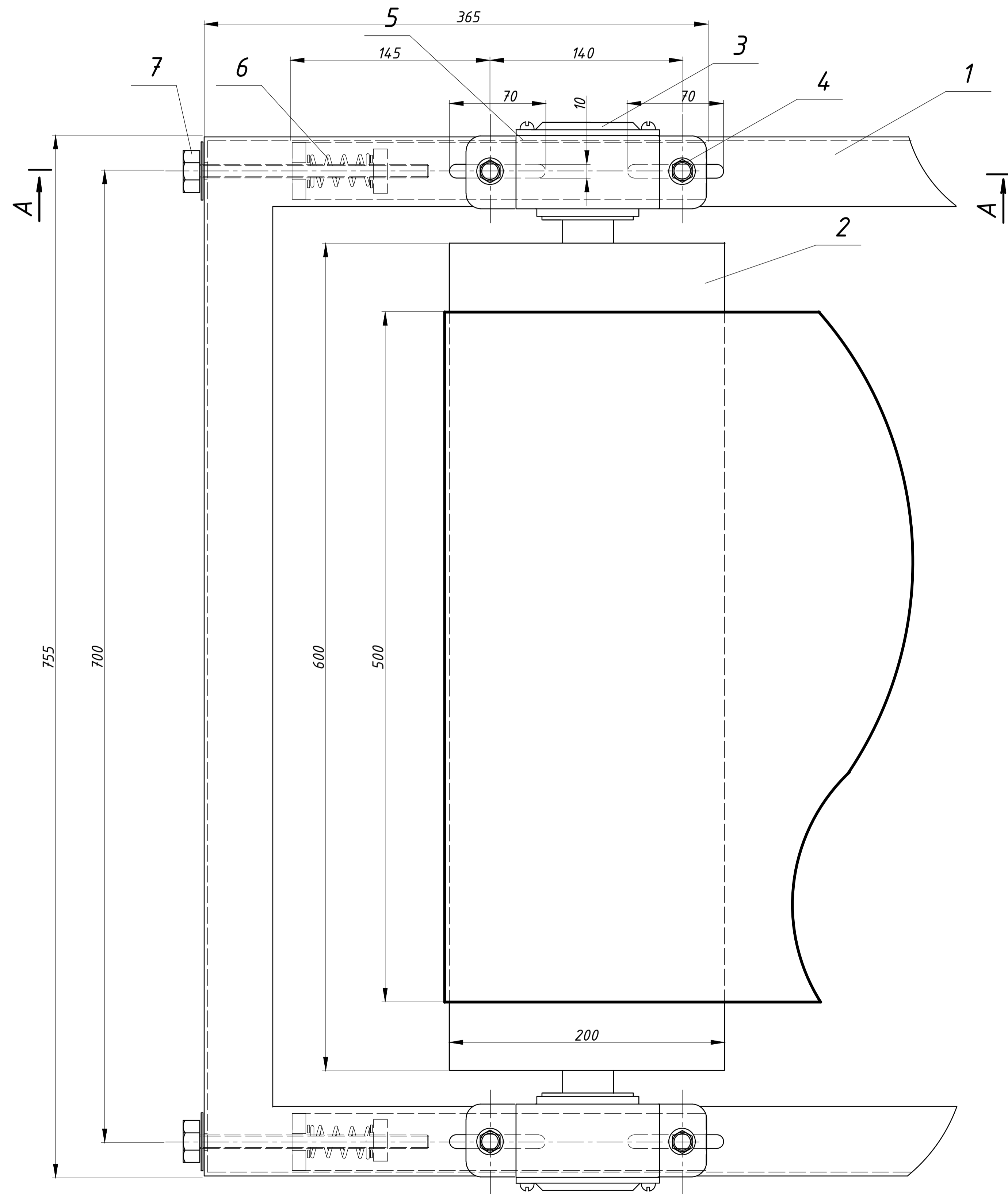


Позиційне позначення	Найменування елемента	Кільк.	Примітки
	Привідна станція стрічкового конвеєра сушильної установки		
1	Електродвигун		
2	Муфта передавальна двигуна		
3	Підшипниковий вузол привідного валу		
4	Швидкохідний (привідний) вал		
5	Червячне колесо		
6	Червячний вал		
7	Підшипниковий вузол вихідного валу		
8	Тихохідний (вихідний) вал		
9	Муфта передавальна вихідного валу		
10	Підшипниковий вузол привідного барабану конвеєра		
11	Привідний (ведучий) барабан стрічкового конвеєра		
12	Барабан конвеєра		

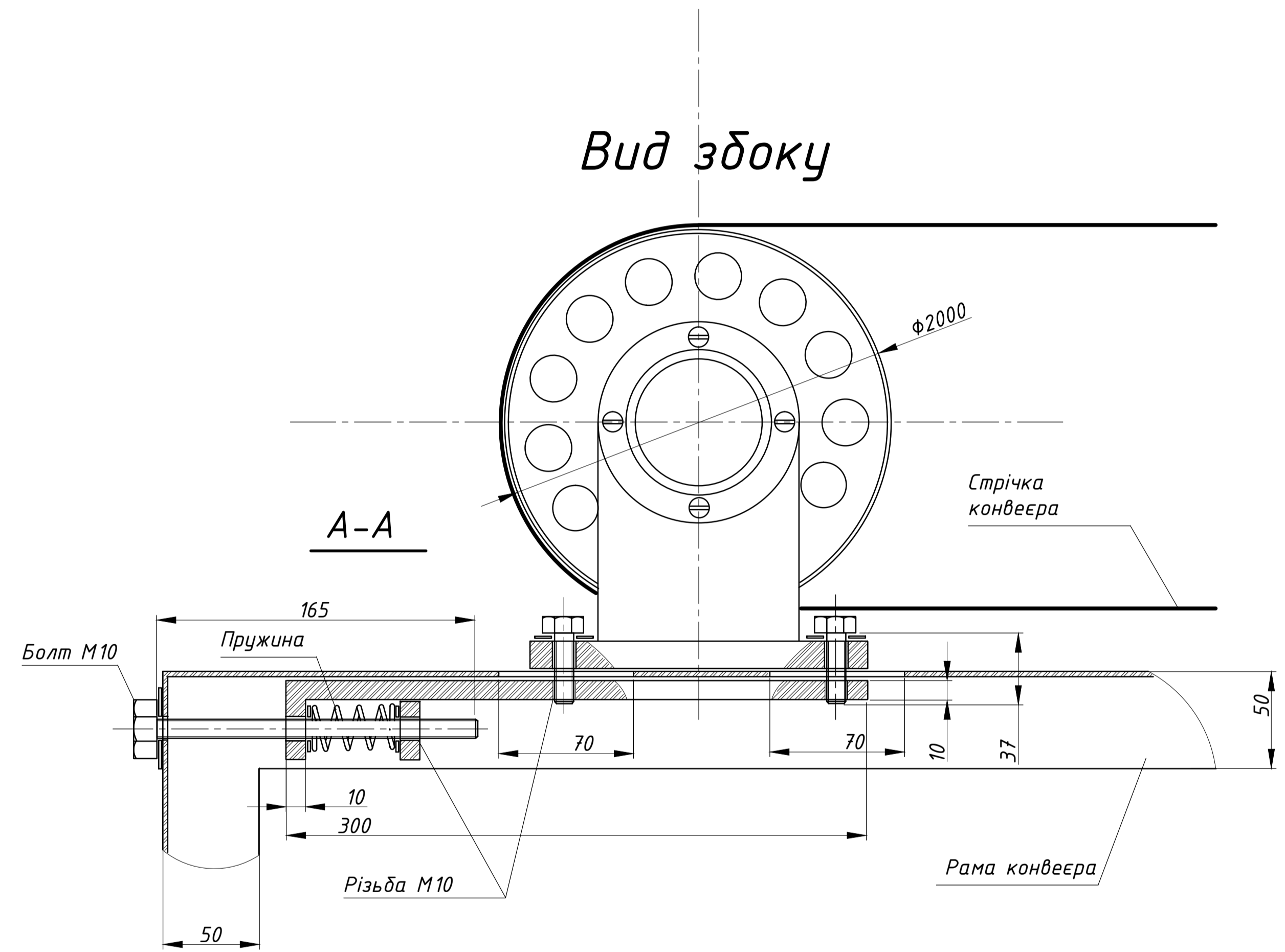
					КРМ.ПОтаЕМ.0.730-03.2.1		
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата	Розробка енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки		
Розробив	Лист 3	Анцєфоров В.О.					
Перевірив	Лист 7	Ярощий ІІ.					
Т.контроль							
Заб. каф.		Бурдо О.Г.			Кінематична схема приводу КМСА 00.00.00.СК		
І.контроль							
Затвердив					ОНТУ, каф. ПОтаЕМ		

Натяжна станція та відомий барабан стрічкового конвеєра сушильної установки

Вид зверху



Вид збоку

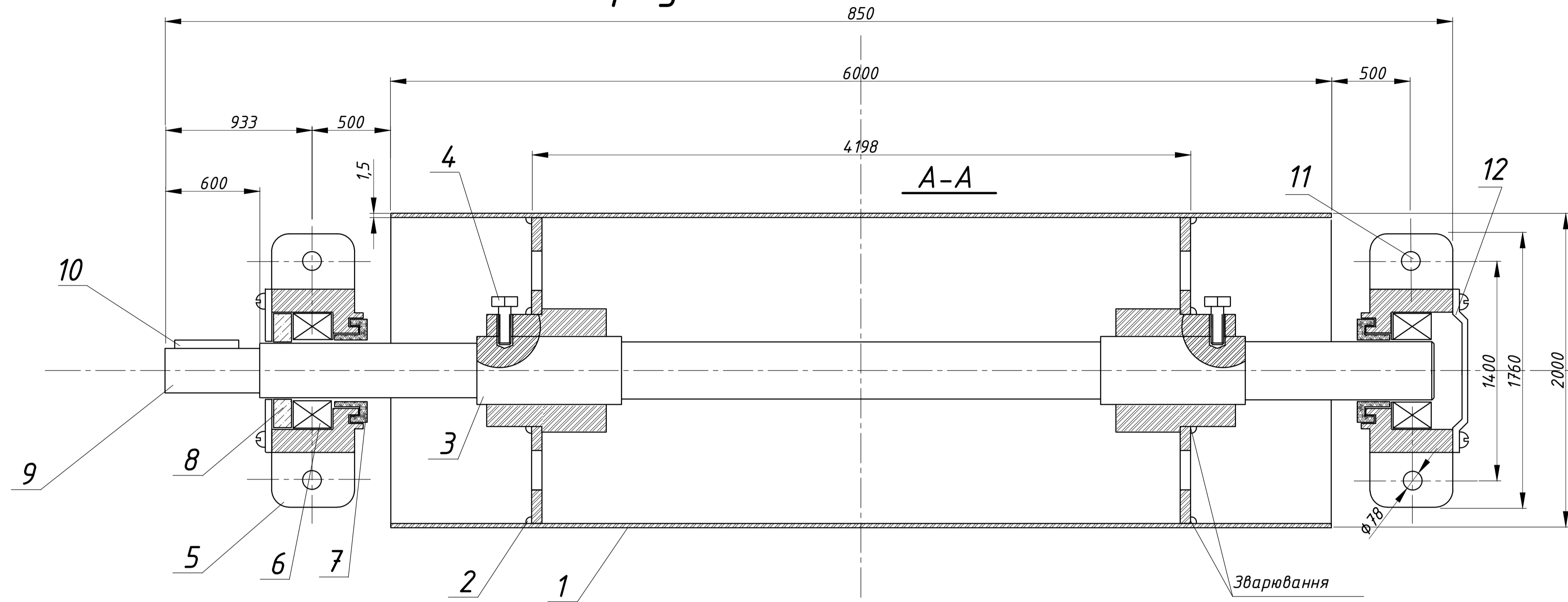


Позиційне позначення	Найменування елемента	Кільк.	Примітки
	Натяжна станція стрічкового конвеєра		
1	Корпус приводного барабана		
2	Натяжний барабан		
3	Втулка кріплення барабану		
4	Винти фіксації кріплення барабану на станині		
5	Опора барабану		
6	Натяжна пружина барабану		
7	Гвинт натяжний пружини барабану		

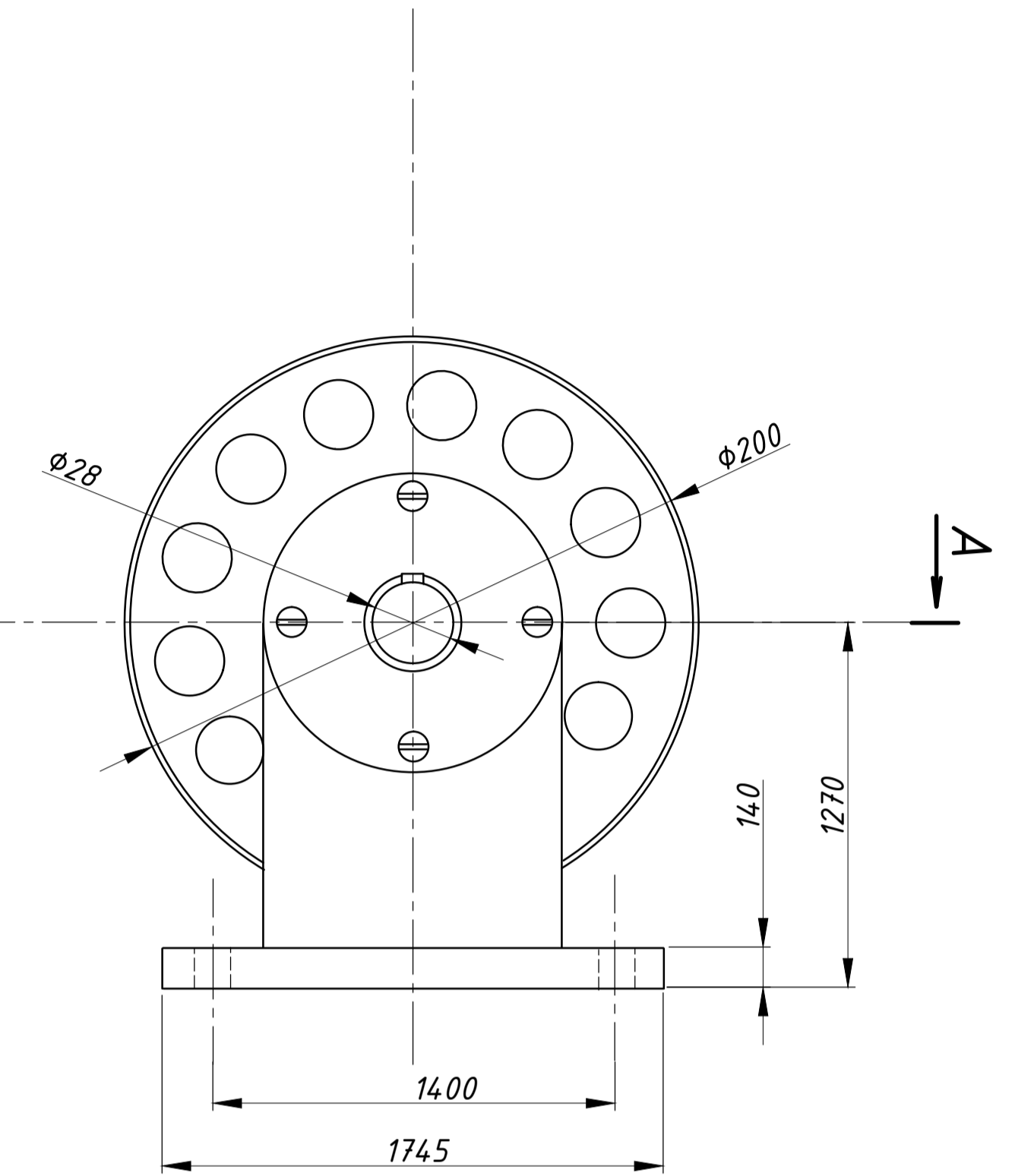
КРМ.ПОтаЕМ.0.730-03.2.1					Лист 5		
Зм.	Лит.	№ документа	Підпис	Дата	Лист	Маса	Масштаб
Розробив	Лит.	№ документа	Підпис	Дата			
Перевірив	Лит.	№ документа	Підпис	Дата			
Т. контроль	Лит.	№ документа	Підпис	Дата			
Заб. каф.	Лит.	№ документа	Підпис	Дата			
Н. контроль	Лит.	№ документа	Підпис	Дата			
Затвердив	Лит.	№ документа	Підпис	Дата			
Розробка енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки					Лист 5	Листів 7	
Кресл. натяжної станції КМСА 05.00.00.СК					ОНТУ, каф. ПОтаЕМ		

Привідний барабан стрічкового конвеєра сушильної установки

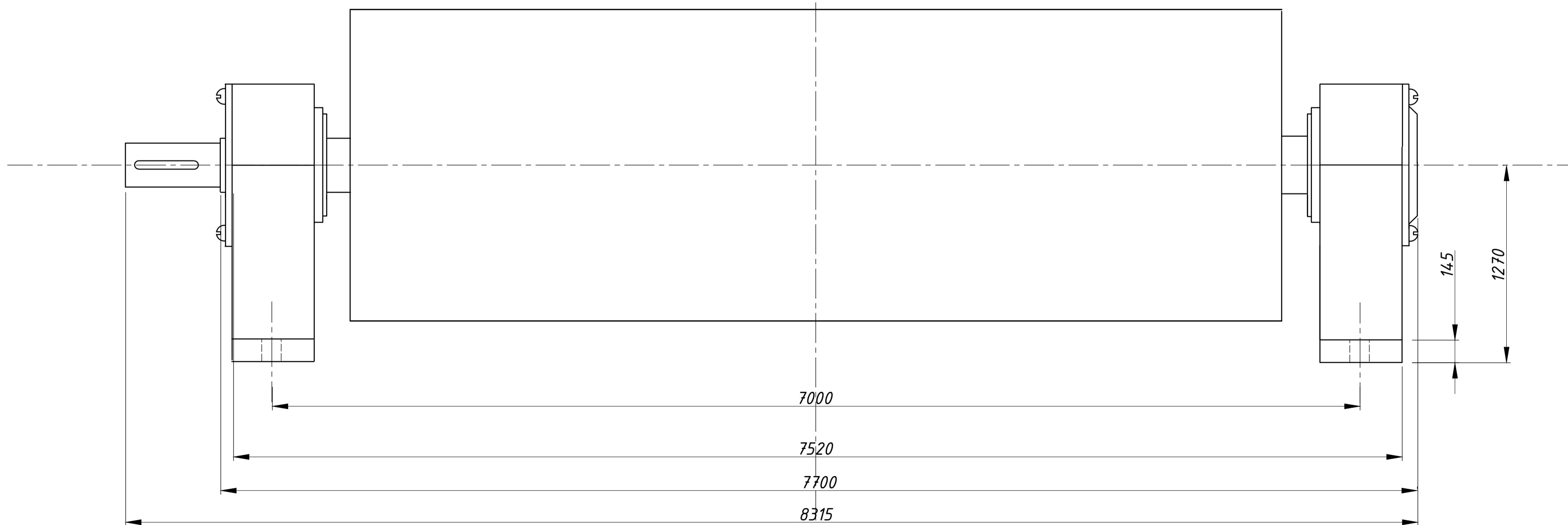
Вид зверху



Вид збоку



Вид спереду



Позиційне позначення	Найменування елемента	Кільк.	Примітки
	Привідна станція стрічкового конвеєра		
1	Корпус привідного барабана		
2	Диск барабана		
3	Втулка кріплення барабана		
4	Винт для фіксації барабану на валу		
5	Опора барабану		
6	Підшипник опори привідного барабану		
7	Втулка ущільнювача		
8	Сальник маслоупримуючий		
9	Вал привідного барабану		
10	Шпонка з'єднуюча		
11	Отвори монтажні опор барабану		
12	Кришка захисна підшипникового вузла		

КРМ.ПОтаЕМ.0.730-03.2.1					Лист	Маса	Маштаб
Зм.	Лист	№ документа	Підпис	Дата	Лист 6	Лист 7	
Розробив	Андрей В.В.	Андрей В.В.					
Перевірив	Ярослав ІІ	Ярослав ІІ					
Т.контроль							
Заб. каф.	Бурда О.Г.				Кресл. привідного барабану КМСА 05.00.01.СК		ОНТУ, каф. ПОтаЕМ
Н.контроль							
Затвердив							

Залежності отримані при сушінні рослинної сировини на дослідному стенді з МХ енергопідведенням

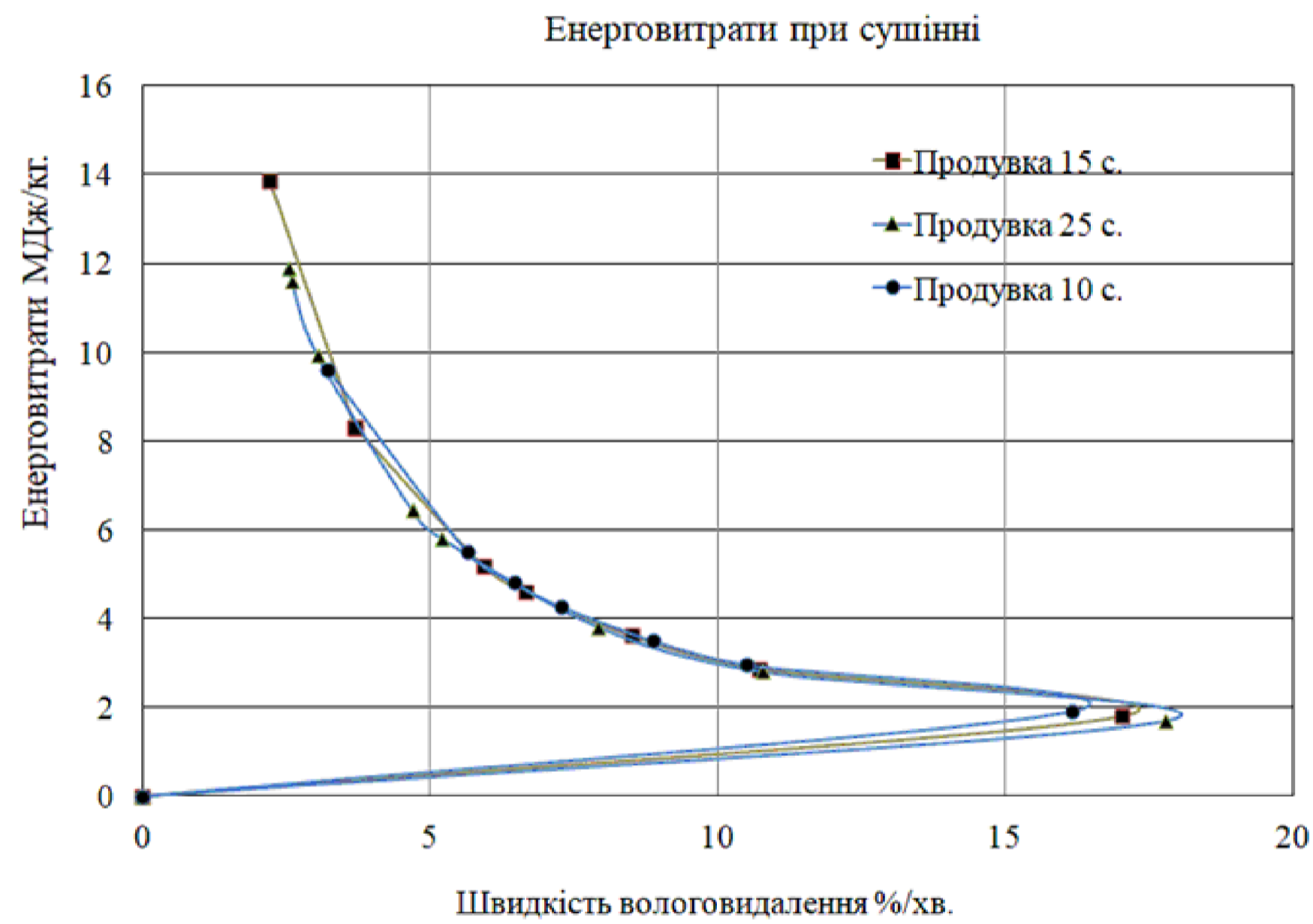
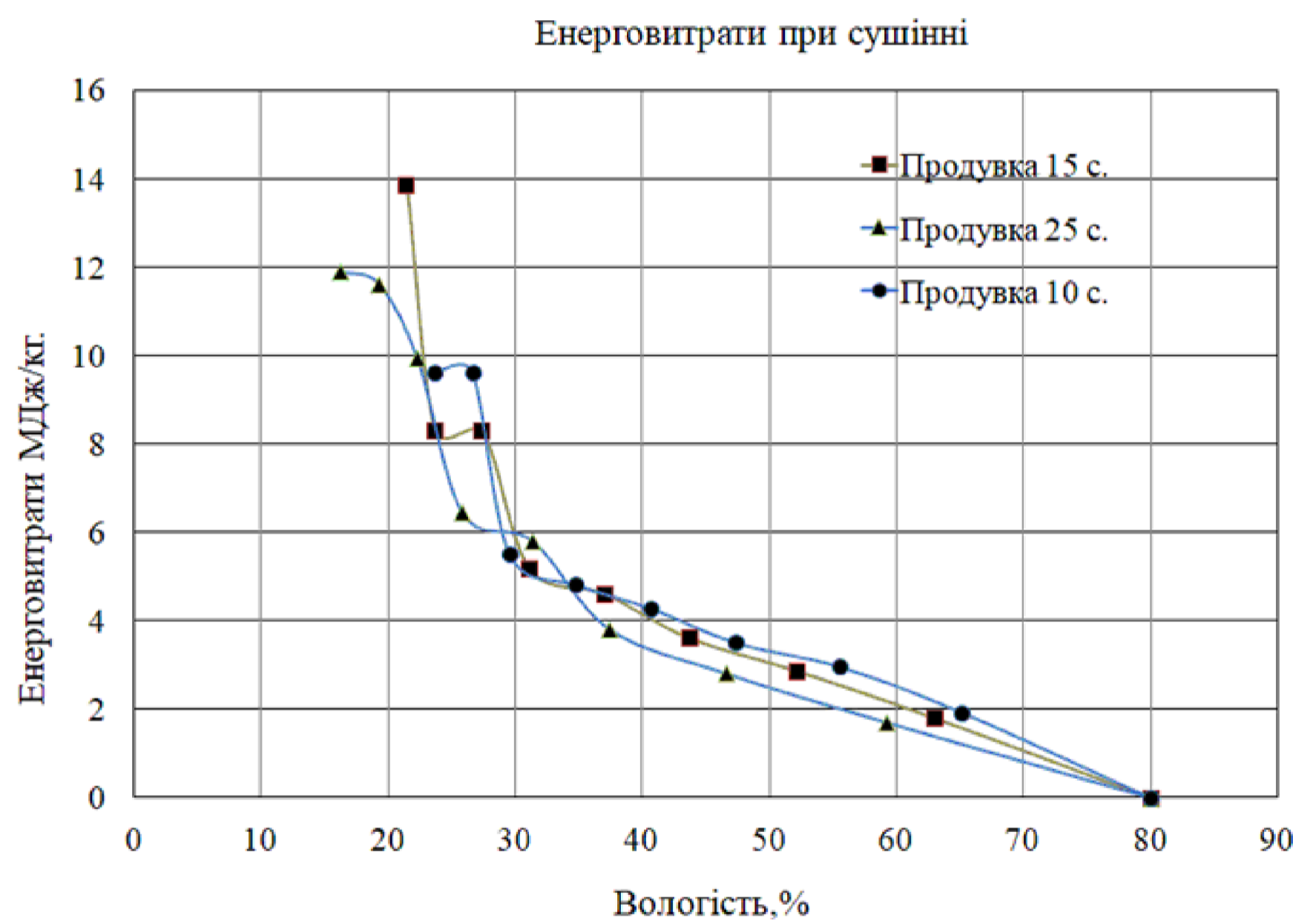
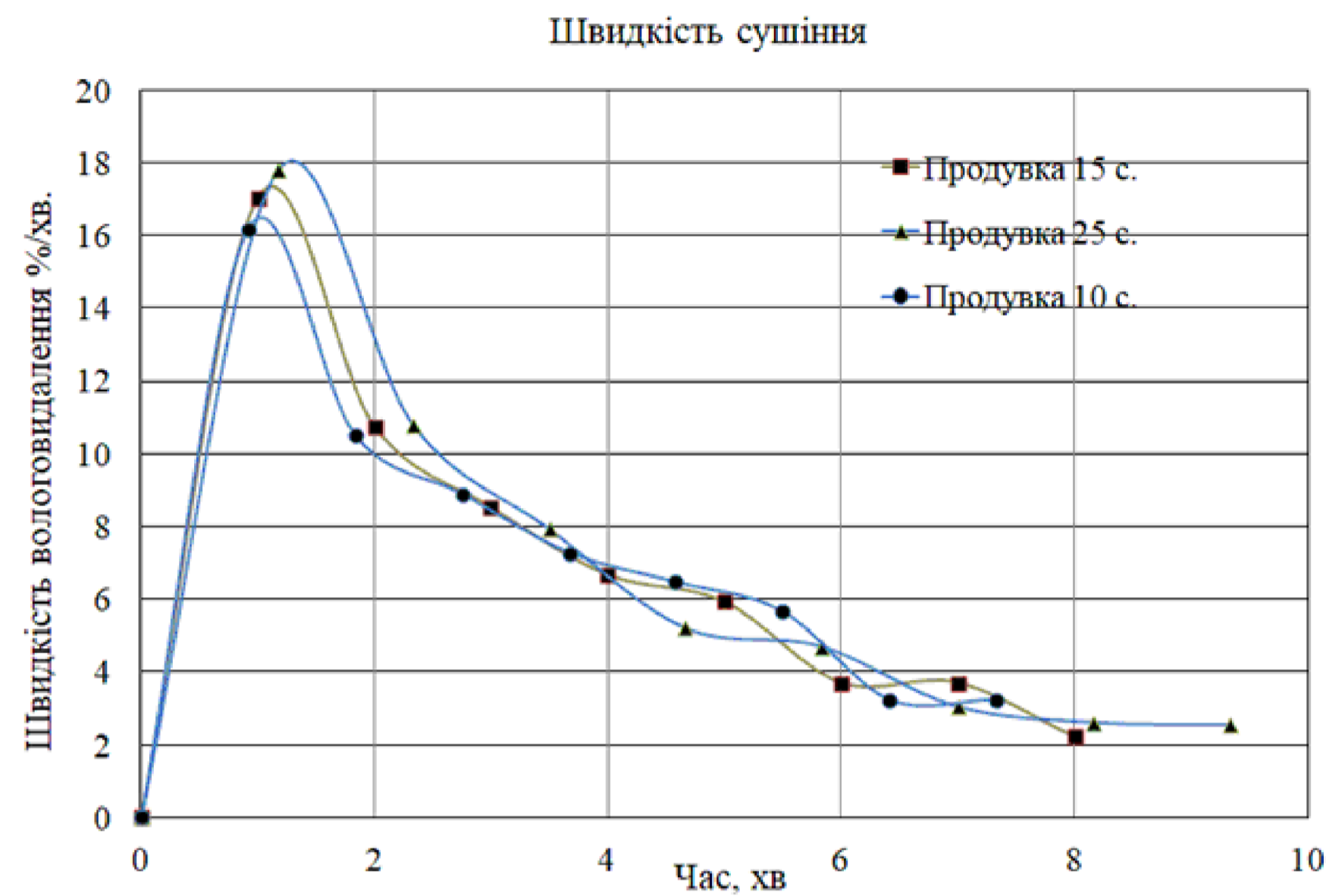
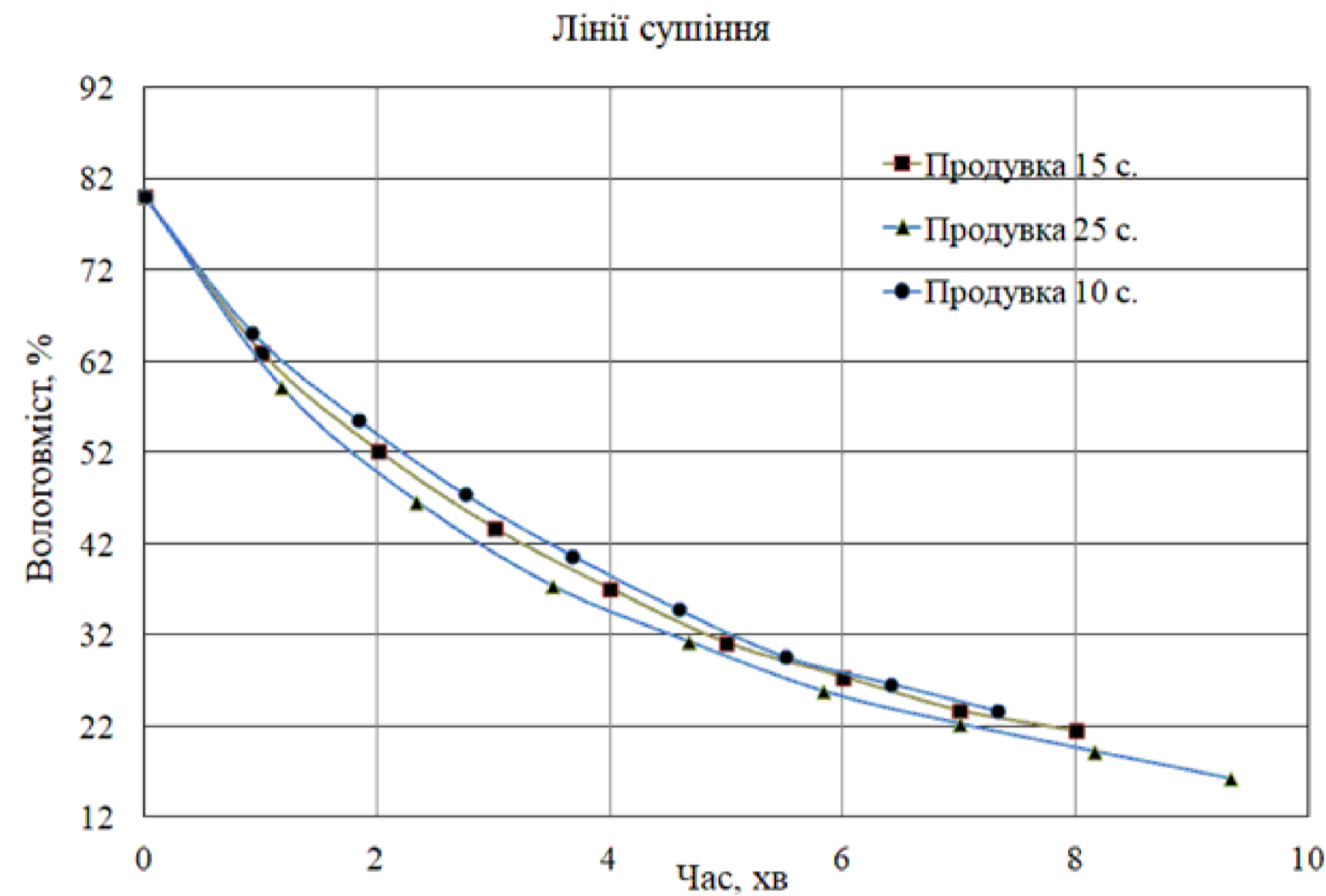
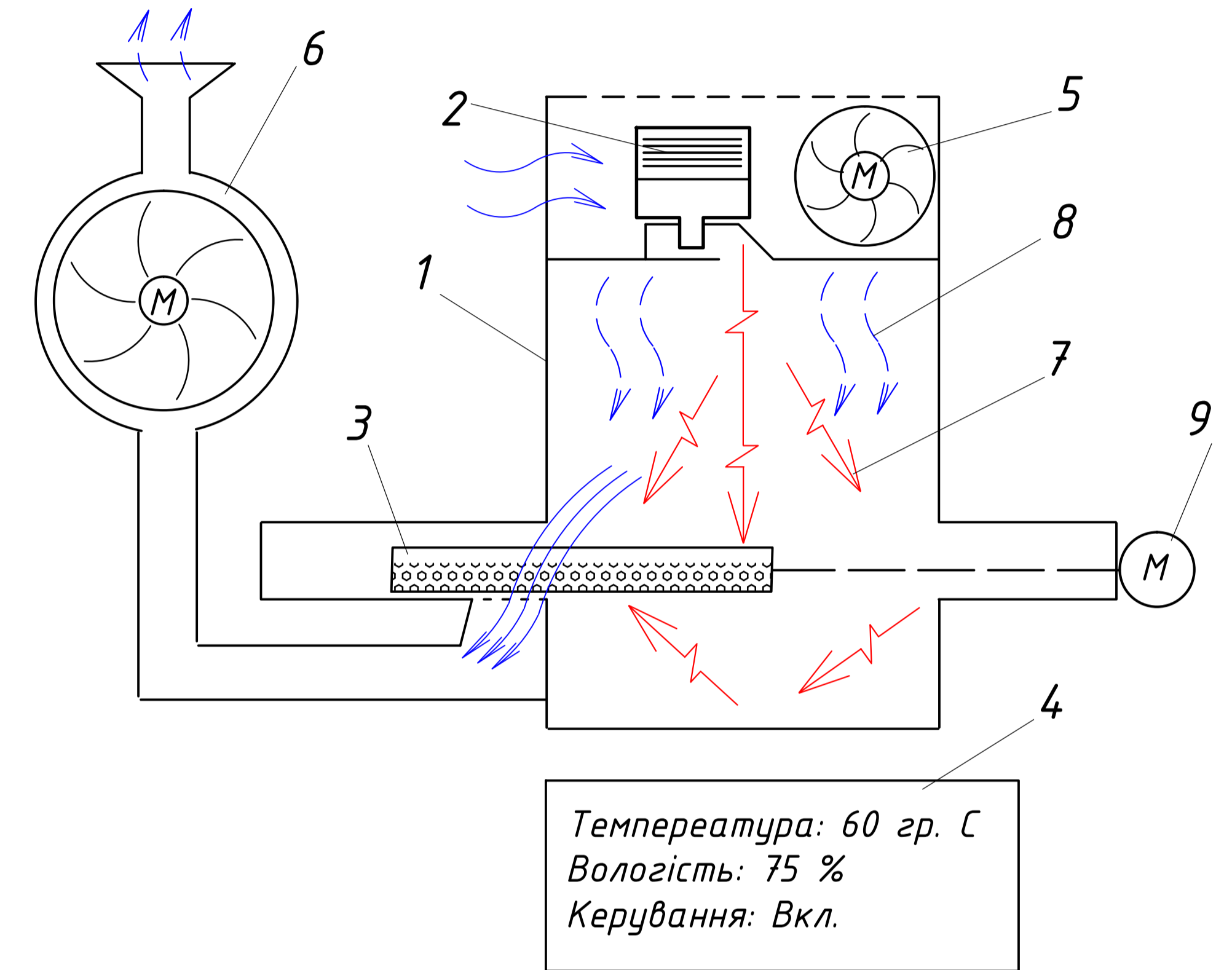


Схема експериментально-дослідного стенду для дослідження процесів комбінованого вологовидалення



Позиційне позначення	Найменування елементу	Кільк.	Примітки
1	Мікрохвильова резонансна (сушильна) камера		
2	Генератор мікрохвиль - магнетрон	1	1036 Вт
3	Касета з вологим матеріалом	1	
4	Прилади контролю	1	
5	Вентилятор охолодження магнетрона	1	
6	Вентилятор продувки (фільтраційного сушіння)	1	583 Вт
7	Мікрохвильове випромінювання		-600 Вт
8	Потоки повітря		
9	Привід касети		

Висновки за результатами аналізу енергоефективності процесу сушіння в МХ сушарці:

- Процес МХ сушіння найбільш ефективний у його першій третині, при енерговитратах в межах 1-3 МДж/кг швидкість видалення вологи досягає свого максимуму - 16-18%/хв.
- Енерговитрати на видалення вологи зростають після видалення 50 % вологи. У перші 2/3 процесу витрата зростає лінійно від 2 до 5 МДж/кг вологи, а після досягнення рівня вологості 25-27% витрати швидко збільшуються до 10-14 МДж/кг.
- При подачі МХ енергії в межах 4 кВт/кг вологого продукту до 2/3 вихідної вологи буде видалено за перші 4 хвилини.
- Максимальне видалення вологи відбувається на початку процесу.

КРМ.ПОтаЕМ.0.730-03.2.1				Лист	Маса	Масштаб
Зн.	Лит.	№ документа	Підпис	Дата		
Розробив		Анцарова В.О.				
Перевірив		Яровий ІІ.				
Т.контроль						
Заб. каф.		Бурдо О.Г.				
Н.контроль						
Затвердив						
Розробка енергоефективної мікрохвильової стрічкової сушарки				Лист 7	Листів 7	
Результати дослідження КМСА 07.00.00.СК				ОНТУ, каф. ПОтаЕМ		