

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра технологічних процесів та обладнання переробних і
харчових виробництв

Допущений до захисту:
завідувач кафедри
д.т.н., професор Севостьянов І.В.

(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

« 10 » листопада 2020 р.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА В СУШАРКАХ
З ВИКОРИСТАННЯМ СВЧ НАГРІВУ**

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування

Виконав: студент групи 61-Маш
Мужилівський Микола Анатолійович

Керівник: д.т.н., професор
Булгаков Володимир Михайлович

Вінниця - 2020

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний аграрний університет

Інженерно-технологічний
факультет

Кафедра технологічних
процесів та обладнання переробних
та харчових виробництв

Затверджую:

зав. кафедри технологічних процесів
та обладнання переробних та харчових
виробництв,

_____ д.т.н., проф. І.В.Севостьянов

" ____ " _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

Студенту Мужилівський Микола Анатолійович

на тему:

«Дослідження процесу сушіння зерна проса в сушарках з використанням
СВЧ нагріву»

затверджену наказом від 26.02. 2020р. № 36 м

Вихідні дані для підготовки роботи:

1. Методичні вказівки з виконання магістерської роботи
2. План магістерської роботи.
3. Підручники і навчально-методичні посібники.
4. Наукові видання (монографії, книги, збірники, журнали, методики, матеріали ЦНТЕІ, тощо).
5. Дані власних досліджень, одержаних в попередній період.

Календарний план виконання магістерської роботи

Структура роботи		Обсяг, сторінок	Термін підготовки	Підпис керівника
Анотація		1	28.02.2020	
Вступ		2-5	15.03. 2020	
Розділ 1	Сучасний стан теорії, техніки і технології сушіння зерна проса		17.03. 2020	
Розділ 2	Дослідження властивостей зерна проса, як об'єкта сушіння		22.04. 2020	
Розділ 3	Експериментальне дослідження процесу сушіння зерна проса в апараті із закрученими потокami теплоносія і свч- енерговодводом		16.06. 2020	
Розділ 4	Теоретичне дослідження сушіння зерна проса у свч- апараті з закрученими потокami теплоносія		22.07. 2020	
Розділ 5	Практичне застосування результатів наукових і проектно-технічних рішень		20.09. 2020	
Висновки та пропозиції		2-3	01.10. 2020	

Термін подання роботи на кафедру

для попереднього захисту " 05 " листопада 2020 р.

Завдання видав

керівник " 23 " лютого 2020 р.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕОРІЇ, ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА.....	11
1.1. Загальна характеристика зерна проса.....	11
1.2. Огляд існуючих СВЧ-сушильних установок для сушіння зерна проса.....	13
1.3. Обґрунтування способу сушіння зерна проса.....	18
1.4. Тепло- і масообмін при сушінні дисперсних матеріалів у вихровій камері.....	20
1.5. Фізика процесу взаємодії з вологими об'єктами електромагнітних хвиль СВЧ-діапазону.....	23
1.6. Короткий аналіз підходів математичного моделювання руху частинок дисперсного матеріалу, а також підходів до опису впливу СВЧ-енергії на процес сушіння.....	28
1.7. Основні висновки.....	34
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗЕРНА ПРОСА, ЯК ОБ'ЄКТА СУШІННЯ.....	36
2.1. Дослідження фізико-механічних властивостей зерна проса.....	36
2.1.1. Визначення щільності.....	37
2.1.2. Вивчення насипної щільності.....	39
2.1.3. Кути природного укосу.....	40
2.1.4. Визначення коефіцієнта щільності укладки.....	41
2.1.5. Дослідження порозности шару.....	42
2.2. Дослідження тепло-фізичних характеристик.....	43
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА В АПАРАТІ ІЗ ЗАКРУЧЕНИМИ	

ПОТОКАМИ ТЕПЛОНОСІЯ І СВЧ-ЕНЕРГОВОДВОДОМ.....	55
3.1. Опис експериментальної установки і методика проведення експерименту.....	55
3.2. Багатофакторний статистичний аналіз процесу сушіння проса в СВЧ-апараті з закрученими потоками теплоносія.....	58
3.2.1. Обґрунтування вибору і меж зміни вхідних факторів.....	58
3.2.2 Вибір оптимальних рішень задачі сушіння проса в СВЧ апараті з закрученими потоками теплоносія.....	63
3.3. Дослідження впливу основних факторів на кінетику процесу сушіння зерна проса в СВЧ апараті з закрученими потоками теплоносія.....	73
3.3.1. Дослідження залежності кінетики процесу сушіння від температури теплоносія.....	74
3.3.2. Дослідження впливу кінетики на сушіння зерна проса швидкостей осьового і тангенціального потоків теплоносія.....	76
3.3.3. Дослідження впливу СВЧ-потужності, що підводиться, на процес сушіння.....	77
РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА У СВЧ-АПАРАТІ З ЗАКРУЧЕНИМИ ПОТОКАМИ ТЕПЛОНОСІЯ.....	80
4.1. Математична модель.....	80
4.1.1. Опис в моделі зерен проса.....	81
4.1.2. Опис в моделі теплоносія.....	83
4.1.3. Опис в моделі основних процесів тепло- і вологоперенесення і СВЧ-нагрівання.....	86
4.2. Вплив параметрів процесу сушіння на її ефективність.....	90
4.2.1 Кінетика СВЧ-сушіння зерна проса.....	90
4.2.2. Вплив потужності СВЧ-випромінювання на ефективність процесу сушіння.....	92

4.2.3. Вплив температури теплоносія на ефективність процесу сушіння.....	94
4.2.4. Вплив характеру обертання потоку теплоносія на ефективність процесу сушіння.....	96
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ І ПРОЕКТНО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ.....	99
5.1. Організація машинної технології комплексної переробки зерна проса.....	99
5.2. Апарат для сушіння дисперсних матеріалів з закрученими потоками теплоносія і СВЧ-енергопідведенням.....	106
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	110
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	111

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота на здобуття наукового ступеня магістра за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування». Вінницький національний аграрний університет. Вінниця, 2020.

Магістерська робота присвячена питанням дослідження інтенсифікації технологічного процесу сушіння зерна проса в вакуум апараті з СВЧ енергопідведенням. Проведено аналіз стану і перспективи розвитку промислової переробки зерна проса. Досліджено властивості зерна проса як об'єкта сушіння. Проведено математичне моделювання процесу вакуумного сушіння зерна проса з СВЧ-енергопідведенням. Визначено вплив основних конструктивно-технологічних параметрів процесу вакуумного сушіння зерна проса.

ANNOTATION

Master's robot for the scientific stage of master for special skills 133 - "Galuzeve machine-building". Vinnytsia National Agrarian University. Vinnytsia, 2020.

The magister robot is assigned to the nutritional support of the technological process of drying millet grain in a vacuum apparatus with microwave power supply. An analysis was carried out on the prospect of the development of industrial processing of millet grain. Doslidzheno power grain millet yak ob'ekta sushinnya. Mathematical modeling of the process of vacuum drying of millet grain with microwave energy is carried out. The injection of the main constructive and technological parameters into the process of vacuum drying of millet grain is designed.

ВСТУП

В основу розвитку техніки і технології того чи іншого технологічного процесу можна закласти ряд основоположних параметрів: підвищення продуктивності, якості, ефективності операцій з переробки сировини, забезпечення стійкості роботи лінії (технологічного потоку). Ключовим елементом нашої роботи було вивчення зерна проса як об'єкта сушіння, і як наслідок вивчення властивостей продукту, виявлення кінетичних закономірностей досліджуваного процесу, побудова статистичної та математичної моделей, пропозиція нових технічних рішень, як в конструкціях, так і в технології переробки проса .

Просо традиційно займає позицію важливої сільськогосподарської культури на території України. Його використовують для виробництва як пшоняної крупи (шліфоване просо або просо-дранець), борошна, а також останнім часом і просяної олії в якості медичних [5, 9] і харчових цілей [4, 5, 6].

Просо має унікальні біологічні особливості. Насіння проса починають проростати при температурі 8-10 °С, поглинаючи при набуханні близько 25% води від маси насіння. Швидкість проростання залежить від температури: при 8 °С просо проростає через 10-15 днів, при 15 °С проростає через 4-5 і при 20-25 °С - через 3 дні. Найбільш енергійно просо кущиться при температурі 18-20 °С і достатній вологості ґрунту. Жаростійкість проса (особливо після викидання) набагато вища, ніж ячменю, пшениці та жита. Завдяки добре розвиненій водопровідній системі просо стійке до суховіїв. Окремо хотілося б відзначити здатність продуктивно використовувати пізні літні опади робить його цінною культурою для посушливих південних і південно-східних районів країни [8].

Аналізуючи дані статистики можна зробити висновок, про те, що недивлячись на, кореляючу величину посівних площ спостерігається доста-

точно великий розкид валового збору зерна проса залежно від року, що не дозволяє з упевненістю оптимально прогнозувати врожайність в майбутньому. Основними причинами, що впливають на збір зернових в цілому, є: низький рівень, застарілість посадкової і збиральної техніки, виснаження ґрунтів, несприятливі кліматичні умови, неправильна обробка сировини і порушення оптимальних режимів зберігання.

Провівши аналіз методів вдосконалення процесу сушіння дисперсних продуктів, нами був зроблений наступний висновок - високоякісна і ефективна сушка зерна проса може здійснюватися в апаратах з активним гідродинамічним режимом і застосуванням комбінованого енергопідведення.

Мета и задачі дослідження: наукове забезпечення процесу сушіння зерна проса в апараті з закрученими потоками теплоносія і СВЧ-енергопідводом, а також визначення раціональних технологічних режимів сушіння зерна проса.

Відповідно до поставленої мети вирішувались наступні **завдання:**

1. Вивчення зерна проса як об'єкта дослідження, визначення фізико-механічних, тепло-фізичних та електрофізичних характеристик сировини яка вивчається.

2. Проведення диференційно-термічного аналізу зерна проса для виявлення температурних інтервалів, відповідних видаленню вологи з різною формою зв'язку.

3. Вивчення кінетичних закономірностей процесу сушіння зерна проса в СВЧ-апараті з закрученими потоками теплоносія.

4. Визначення раціональних режимів установки для сушіння проса.

5. Розробка математичної моделі процесу сушіння зерна проса.

6. Розробка нової конструкції сушильного апарату, схеми автоматичного управління і технологічної схеми комплексної переробки зерна проса.

7. Провести промислові випробування розробленої конструкції

сушильного апарату.

Об'єкт дослідження – технологічний процес сушіння зерна проса.

Предмет дослідження – апарат з СВЧ енергопідведенням та закономірності зміни параметрів сушіння.

Методи дослідження. У даній роботі використано комплексний підбір методик дослідження. Були застосовані як загальнонаукові, так і спеціальні методи. Серед загальнонаукових широко застосовувалися ймовірностно-статистичні методи, системний підхід, спостереження, формалізація. Підбір методик для проведення експериментальних досліджень здійснювався відповідно до чинних стандартів. З числа спеціальних методів дослідження застосовувався метод графічного диференціювання для отримання експериментальних кривих, метод нестационарного теплового режиму для визначення тепло-фізичних характеристик та ін.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕОРІЇ, ТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА

1.1. Загальна характеристика зерна проса

Просо - однорічна яра культура. З чотирьох видів, які ростуть в нашій країні, для отримання зерна обробляють в основному один вид - просо звичайне (*Panicum miliaceum*) (рис. 1.1), підрозділяються за формою волоті на 5 груп: розкидне 1, розлоге 2, поникле (стисле) 3, полукомове 4 і комове 5 (рис. 1.2). З формою волоті пов'язаний і ознака скоростиглості. Найбільш скоростиглі сорти мають розкидисту або розлогу форму, а також проміжну розлого-поникли (стислу).



Рис. 1.1. - Просо звичайне

Просо одна з найважливіших круп'яних культур. Із зерна виробляють пшоняну крупу, яка відрізняється хорошою розвареністю і поживністю. Крім того, зерно використовують також для приготування борошна і як концентрований корм для птиці, а відходи переробки зерна згодують сільськогосподарським тваринам.

Відмінною особливістю даної культури є його жаростійкість та посухостійкість. Це виражається в тому, що в посушливі роки просо володіє

більш високою врожайністю у порівнянні з іншими зерновими культур. Також ця рослина досить повільно розвивається коли викидає волоті, що дозволяє зберегти вологу в посушливі періоди і відновлювати своє зростання після посухи.

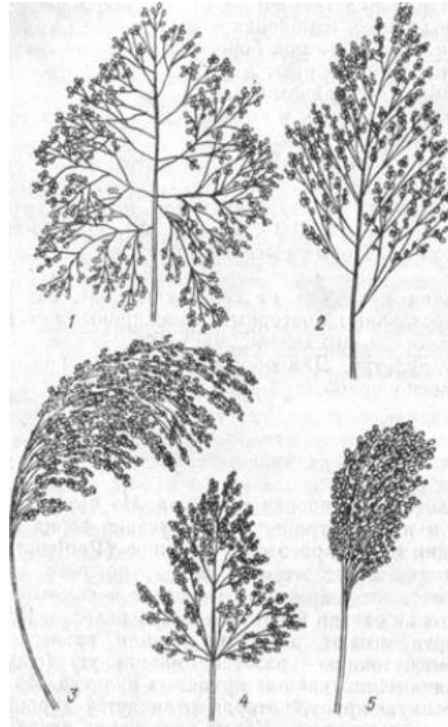


Рис. 1.2. - Класифікація проса у формі волоті

Вегетаційний період скоростиглих сортів проса коротше, ніж у інших зернових культур. Час дозрівання скоростиглих сортів становить 60-70 днів, середньостиглих – 70-90 днів і пізньостиглих – 90-120 днів. Температура проростання насіння 8 °С. Необхідна температура цвітіння 16-20 °С. Як і багато культур просо рекомендується висаджувати на родючих, структурних грантах, очищених від бур'янів. Кращими ґрунтами для нього вважаються чорноземи, каштанові ґрунти, а також сірі лісові та дернові ґрунти з нейтральною реакцією. Кращі врожаї проса збирають на цілинних землях першого року оранки.

Сприятливими попередниками проса при сівозміні є озимі та зернобобові культури, можливий посів по багаторічних травах.

Осінь і весняна обробка ґрунту необхідна для очищення поля від

бур'янів. З цієї причини навесні проводиться дві культивації - ранню і передпосівну. Також перед посівом для поля потрібно вирівнювання за допомогою боронування і прикочування.

В основній масі для збільшення врожайності використовують добрива на основі фосфору, зокрема гранульований суперфосфат з розрахунку 10 кг діючої речовини на 1 га.

Сіють просо рядовим, широкорядним (міжряддя 45 см) і стрічковим (45 + 15 см) способами. Ефективність кожного із способів змінюється в залежності від регіону обробітку. Як правило на полях, очищених від бур'янів, рекомендується застосовувати звичайний рядовий посів.

Рекомендована температура ґрунту, при якій висівають просо становить 10-12 °С. Нормою висіву вважається 1,5-2,5 млн схожих насінин на 1 га, що при рядовому посіві становить 30-40 кг, широкорядній – 20-25 кг, а в степових південних районах України 10-12 кг. Глибина загортання становить не більше 20-40 мм. При широкорядному і стрічковому посівах потрібно проводити міжрядний обробіток, особливо на початку літа, коли просо росте повільно. Крім цього, в даний час широке поширення набула прополка посівів гербіцидами.

Зерно проса дозріває нерівномірно. Сигналом до початку збирання служить дозріле зерно у верхній частині волоті, причому дане зерно відрізняється найбільшою цінністю. Збирання проса проводять роздільним способом, щоб уникнути втрат зерна. У момент настання у зерна середньої частини волоті воскової стиглості застосовують пряме комбайнування.

Окремо варто відзначити, що в південних регіонах найчастіше застосовують пожнивні посіви проса, тобто після збирання озимої пшениці або ячменю поле обробляють і засівають скоростиглими сортами проса, що дозволяє отримати два врожаї на рік з одного поля [31].

1.2. Огляд існуючих СВЧ-сушильних установок для сушіння зерна

проса

При вивченні процесу сушіння продуктів з використанням СВЧ-енергопідводу окремо варто відзначити сучасний стан техніки для сушіння зернових культур, їх конструктивні та технічні особливості.

СВЧ-сушарка серії 6EVS (рис. 1.3) призначена для експлуатації на великих підприємствах з метою примусового прискореного технологічно необхідного просушування сільськогосподарських продуктів і лікарських трав.



Рис. 1.3. - СВЧ-сушарка серії 6EVS

Дана сушарка працює від енергетичної мережі з напругою 380 В і частою 50 Гц. Устаткування сформовано на подовженому жорсткому звареному каркасі, обшитому листовою пофарбованою сталлю. Первинна сировина завантажується в приймальний резервуар і простягається транспортером через операційну зону, після виходу з якої скидається в сортувальну тару. Як джерело тепла використовується надвисока частота, сушка здійснюється рівномірно зсередини і зовні. Тунель обладнаний спеціалізованим кожухом, що запобігає витoku СВЧ хвиль і забезпечує безпеку персоналу. Ефективна і малошумна система охолодження значно подовжує термін експлуатації магнетрона і трансформатора.

Мікрохвильова установка «Бархан 3» (рис. 1.4) працює наступним чином: по транспортеру, який не входить в комплектацію установки, продукт

надходить в тепло-обмінник, де проводиться його попереднє підсушування. Потім, на тій же швидкості, без зупинки, підсушений продукт подається в мікрохвильовий модуль установки. Всередині модуля продукт рухається і нагрівається до заданої температури, а після цього розвантажується з установки. Можливість регулювання температури нагріву і швидкості руху продукту всередині установки забезпечує отримання кінцевого продукту з різним ступенем прожарювання і вологості.

Крім цього, тому що поверхня продукту, який висушуємо при виведенні рідини зсередини охолоджується, то всередині продукту температура трохи більше, ніж на поверхні. В результаті цього, внутрішня рідина прагне вийти зсередини продукту на поверхню, на що впливає також і тиск пари усередині продукту.



Рис. 1.4. - Мікрохвильова установка «Бархан 3»

Конструкції СВЧ установки для сушіння сипучих продуктів УМОС-02 (рис. 1.5) складається з прямокутної камери, на якій розташовані два СВЧ магнетрона, які з'єднані з робочою камерою через хвилеводи. Робоча камера розташована на нерухомій рамі з можливістю коливання навколо горизонтальної осі. Усередині робочої камери знаходяться три зустрічнонахилені полиці, виготовлені з матеріалів здатних проводити СВЧ випромінювання. Переміщення оброблюваного матеріалу відбувається за допомогою додання зворотньо-поступального руху робочої камері і частки

матеріалу, який скочується по похилих поверхнях полиць під дією сили гравітації. У верху робочої камери розташований пристрій завантаження, а на нижній межі робочої камери - вузол розвантаження, який запобігає виходу СВЧ-випромінювання за межі установки. На торцевих поверхнях апарату присутні вентиляційні перфоровані вікна і люки для можливості проведення екстреного ремонту та мийки всередині сушарки. Блок живлення СВЧ магнетронів і управління приводом розташований в нижній нерухомій частині пристрою.

Внаслідок відсутності жорсткого зв'язку між рівнем потужності СВЧ енергії, амплітуди і частоти коливань робочої камери можливо регулювання в значних діапазонах режимів обробки матеріалів, таких як, жорсткість впливу СВЧ-енергії, кВт/кг, і питомої дози поглинання, кДж/кг.



Рис. 1.5. – Установка УМОС-02

Установка УМВК-1 (рис. 1.6) призначена для сушіння зерна, фруктів, овочів і ягід. Робота установки здійснюється наступним чином: гаряче повітря попередньо прогріває вихідний продукту і видаляє вологу з поверхні, яка була витіснена з обсягу продукту парами води, що виникли під дією СВЧ поля.

Управління процесом сушіння продуктів здійснюється в автоматичному режимі. Установка складається з наступних основних блоків:

генератори СВЧ (магнетрони), хвилеводи, сушильна камера установки, стрічковий конвеєр, блок живлення, пульт управління, вентиляційна система.



Рис. 1.6. – Установка УМК1

Універсальна установка мікрохвильової вакуумної обробки матеріалів «Джерело» (рис. 1.7), є сучасним, високотехнологічним обладнанням. Перевагами даної установки є можливість проводити низькотемпературну сушку продуктів при температурі 30-50 °С, що дає можливість сушити продукти критичні до високих температур, які не можуть бути якісно і швидко висушені іншими способами. Крім цього, завдяки селективності мікрохвильового нагріву відбувається вирівнювання вологості в продуктах: більш вологі області в матеріалі сильніше поглинають мікрохвильову енергію і відбувається вирівнювання вологості, що неможливо отримати в таких методах як інфрачервона і конвективна сушка. Також установка дозволяє позбутися від шкідників, які заводяться в зернових, насінні, борошні та висівках за допомогою мікрохвильового нагріву.



Рис. 1.7. - Установка «Джерело»

При створенні нових конструкцій сушильних установок з використанням СВЧ-енергопідводу необхідно керуватися такими принципами:

- екологічність проходження процесу;
- необхідний рівень якості висушеного продукту;
- енергоекономічність;
- інтенсивне проведення процесу сушіння;
- низька металоємність;
- можливість сушіння зерна з підвищеною вологістю і зерна для насіннєвих потреб;
- мінімальний рівень травмованості зерна;
- автоматизація проведення процесу.

Таким чином напрашується висновок щодо створення установок нового типу і нових конструкцій [8].

1.3. Обґрунтування способу сушіння зерна проса

Завдання сушіння зерна проса є досить специфічним та складним

завданням. Це обумовлюється необхідністю наступними особливостями: процес протікає у вузькому інтервалі вологості від 18 до 14%, велика частина вологи розташована в поверхневих всередині зерен у вигляді осмотично зв'язаної вологи, а також необхідної кінцевої вологості проса з допустимим розкидом за об'ємом не більше 1 %. В додаток до цього продукт після проведеного процесу сушіння повинен володіти високими якісними показниками (збереження вітамінів, корисних речовин і так далі) в наслідок його застосування в подальшому у вигляді продукту харчування після переробки [8, 14].

Для того щоб вирішити поставлене завдання необхідно розробити новий високоінтенсивний спосіб сушіння зерна проса, що дозволяє забезпечити високу якість висушеного продукту і при цьому оптимізувати енерговитрати на його проведення.

Природно, що в основі інтенсифікації процесу сушіння повинні лежати заходи, що враховують закономірності явищ внутрішнього влагоперенесення і зовнішнього тепло-- і влагообміну.

Комплексного впливу на інтенсифікацію зовнішнього влагообміну і внутрішнього влагоперенесення можна домогтися на основі оптимального поєднання технологічних прийомів, використовуваних для зневоднення зерна в експлуатованих і проєктованих сушарках.

При зовнішньому влагообміні інтенсифікацію можна проводити за допомогою підвищення температури сушильного агента і швидкості потоків теплоносія. Також можливо підвищити тепло-- і влагообмін за допомогою збільшення активної поверхні продукту. Це досягається шляхом застосування сушильних установок зі зваженим шаром матеріалу з різною гідродинамікою, яка дозволяє регулювати час перебування матеріалу в апараті, граничну температуру агента сушіння, інтенсивність протікання процесів тепло-- і масообміну, енерговитрати на проведення процесу сушіння.

Застосування активного гідродинамічного режиму дозволить значно інтенсифікувати протікання процесу зі збереженням економічної ефективності, зберегти якість готового продукту, забезпечити значну безпеку і технологічність процесу [4, 24].

Характерним прикладом використання активного гідродинамічного режиму при розробці сушильних апаратів є дія на частинки дисперсного матеріалу відцентрової сили, що виникає при русі твердої фази по криволінійній траєкторії. Застосування закручуючих пристроїв забезпечує збільшення коефіцієнтів тепло-масообміну пов'язаного з підвищенням відносної швидкості руху фаз в закрученому потоці в 3-4 рази в порівнянні з прямолінійними потоками [20, 23].

Таким чином можна стверджувати, що використання активного гідродинамічного режиму в тепло-масообмінних апаратах при належній швидкості нагріву зерен і швидкого періоду зневоднення, дозволить здійснити ефективну і високоякісну сушку зерна проса. Даному комплексу заходів дасть змогу скоротити час впливу на зерно високих температур, збереже поживну та біологічну цінності, у тому числі і термолабільні вітаміни, тим самим збереже якість отриманого продукту.

1.4. Тепло- і масообмін при сушінні дисперсних матеріалів у вихровій камері

На практиці при проведенні процесу конвективного сушіння в апаратах зі зважено-закрученим шаром тепло- і масообмін не є еквівалентним через повернення частини тепло-ти в газову фазу з вологою, яка випарувалася. Це обумовлено тим, що тепло- витрачається на нагрів матеріалу, подолання енергії зв'язку вологи з матеріалом і безпосередньо на випаровування вологи. Тому, дійсні коефіцієнти тепло- і масообміну менше еквівалентних і визначаються деякими ефективними значеннями.

Зв'язок між еквівалентними і ефективними коефіцієнтами тепло- і масовіддачі встановлюється з балансу при обміні тепло-тою матеріалу і газу за нескінченно малий проміжок часу визначається наступними залежностями [7].

В результаті термодинамічного аналізу були отримані наступні рівняння зв'язку:

для ефективних коефіцієнтів масовіддачі:

$$\beta_{эф} = \beta - \frac{\rho_V [(c_T + c_{ж} \cdot C) d\theta + \sigma \cdot q_i \cdot dX]}{\rho \cdot S_Y (r_0 + c_{пt} - c_{ж} \cdot \theta) (X' - X) d\tau}, \quad (1.1)$$

де β - коефіцієнт масовіддачі, м/с;

ρ_V - об'ємна щільність матеріалу, кг/м³;

c_T - питома тепло-ємність твердого тіла, Дж/(кг·К);

$c_{ж}$ - питома тепло-ємність рідини, Дж/(кг·К);

C - вміст вологи матеріалу, кг/кг·св;

θ - температура матеріалу, К;

$d\theta$ - приріст температури матеріалу, К;

X - вологовміст повітря;

dX - збільшення вмісту повітря;

X' - вологовміст насиченого повітря;

σ - питома витрата матеріалу;

ρ - щільність парогазової суміші, кг/м³;

r_0 - питома тепло-та пароутворення, Дж/кг;

c_n - питома тепло-ємність пара, Дж/(кг · К);

$d\tau$ - приріст часу, с.

Для ефективних коефіцієнтів тепло-передачі

$$\alpha_{эф} = \alpha - \frac{\rho_V [(c_T + c_{ж} \cdot C) d\theta + \sigma \cdot q_i \cdot dX]}{S_Y (t - t') d\tau}. \quad (1.2)$$

де α - коефіцієнт теплопровідності, м²/с;

t - температура повітря, К;

t' - температура насиченого повітря, К.

$$dQ = \alpha(t - t')S' \cdot d\tau, \quad (1.3)$$

$$dw = \beta_x(X' - X)S \cdot d\tau, \quad (1.4)$$

При використанні в розрахунках рівнянь тепло-віддачі і масовіддачі підставляючи в них відповідно значення ефективних коефіцієнтів тепло-віддачі і масовіддачі з рівнянь (1.1) і (1.2), можна розраховувати тривалість процесу сушіння або необхідний робочий об'єм апарату.

Для апаратів із стисненими потоками дисперсної фази або при високій концентрації матеріалу в газі (напівзважений, зважений, вихровий шар) або при зміні структури матеріалу, що висушується, ефективні значення коефіцієнтів тепло- і масообміну виявляються також менше еквівалентних, що теж обумовлено нееквівалентним тепло- і масообміном.

На практиці ефективні коефіцієнти для випадків видалення спільно вільної і зв'язаної вологи при високих концентраціях твердої фази в потоці, що також характерно для вихрових камер, розраховуються за критеріальними залежностями, отриманим в результаті обробки експериментальних даних.

Наприклад, для апаратів з киплячим шаром в результаті узагальнення численних експериментальних даних отримані наступні рівняння для визначення коефіцієнтів тепло-віддачі:

$$Nu = 0,016(Re/\varepsilon)^{1,3} \cdot Pr^{0,33} \text{ при } \frac{Re}{\varepsilon} < 200, \quad (1.5)$$

$$Nu = 0,4(Re/\varepsilon)^{0,67} \cdot Pr^{0,33} \text{ при } \frac{Re}{\varepsilon} > 200, \quad (1.6)$$

де Re - число Рейнольдса;

Pr - число Прандтля;

ε - коефіцієнт фазового перетворення.

Ці рівняння можна використовувати для оцінки коефіцієнтів тепло-

обміну в інших типах апаратів з порозністю шару не менше 0,9.

Для більш точних розрахунків доцільно користуватися дослідними даними, отриманими для конкретних видів продуктів і конструкцій сушарок. коефіцієнти тепло- і масовіддачі для умов сушіння у вихровій камері істотно менше, ніж для умов спірального каналу. Це пояснюється тим, що матеріал, який входить у вихрову камеру, містить в основному пов'язану вологу, тому різко зростає нееквівалентний тепло- і масообмін. Крім того, у вихровій камері істотно вища скрутність потоку дисперсної фази і пов'язана з цим неоднорідність структури потоку газосуспензії.

Таким чином, в результаті зміни конструкцій камер зі зважено-закрученим шаром, значення ефективних коефіцієнтів тепло- і масовіддачі будуть визначатися по залежностях, які отримують в ході експериментів по сушці безпосередньо досліджуваного продукту в сушильних камерах.

1.5. Фізика процесу взаємодії з вологими об'єктами електромагнітних хвиль СВЧ-діапазону

При СВЧ-сушінні необхідно враховувати, що діелектричні властивості сухої речовини і води різні. Тому вологий матеріал нагрівається значно швидше ніж сухий. Також це виражається в тому, що температура більш вологих внутрішніх шарів продукту при СВЧ сушінні вище зовнішніх, більш зневоднених. Це і створює найбільш «вірний» напрям градієнта масоперенесення вологи, від внутрішніх до зовнішніх шарів продукту, яке не реалізується у відомих на даний момент методах сушіння.

Матеріали, що піддають сушінню, найчастіше, складні неоднорідні тіла-діелектрики, що містять в своєму складі водні розчини солей, що виконують роль електролітів.

Наявність невеликої кількості електролітичних розчинів у своєму складі дозволяє даними діелектриків володіти незначною провідністю, яка є однією з констант, що характеризують дане матеріальне середовище. При

проходженні через продукт електромагнітних хвиль частина електромагнітної енергії буде поглинатися оброблюваним середовищем, що обумовлено перетворенням електромагнітної енергії в теплову [6, 9, 10, 13, 14].

Крім цього, в діелектриках спільно з вільними зарядами присутні і пов'язані заряди, які умовно можна розділити на наступні групи:

- обумовлених впливом електронної поляризації під дією електричного поля приводить до зміщення заряду і зміни його орбіти (внаслідок чого в атомі виникає як би деяка пара сил і відповідний дипольний момент);
- пов'язаних зарядів відповідних атомної поляризації (що спостерігається в твердих кристалічних елементах і обумовленої зміщенням різноіменних заряджених атомів);
- відповідних дипольних поляризації молекул;
- відповідних поляризації областей з вільними зарядами, які можуть переміщатися в цій області і створювати певний поляризаційний момент (іонної поляризації).

Сушка на підставі теорії термічного ефекту поля СВЧ представлена на принциповій схемі (рис. 1.8), при цьому змінне електричне поле створюється між обкладками конденсатора.

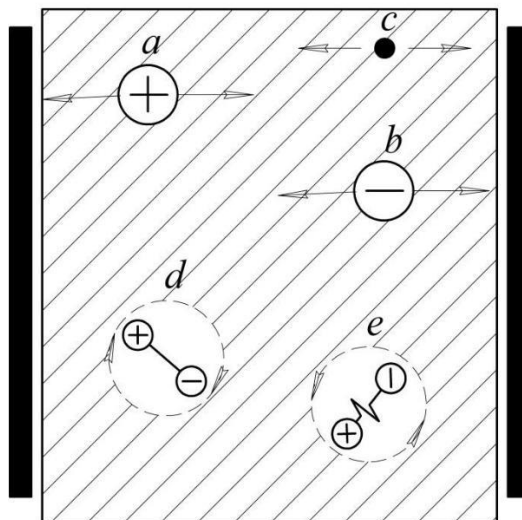


Рис. 1.8. - Поведінка матеріалів з властивостями електролітів і діелектриків поле СВЧ: *a* і *b* - позитивні і негативні іони; *c* - електрон; *d* -

жорсткий диполь; e - пружний диполь.

На схемі зображено два іона - один b з негативним, а інший - a з позитивним зарядом і електрон c . Умовно приймаємо, що одна пластина позитивно заряджена, інша має негативний заряд. Внаслідок цього іон a змушений переміщатися в бік негативно зарядженої пластини, а іон b і електрон c будуть переміщатися в зворотну сторону - в напрямку позитивно зарядженої пластини. Дане явище буде протікати і в зворотному напрямку якщо змінити заряд кожної з пластин. Даний комплекс дій визначатиме величину провідності, при цьому величина поглинання визначається супроводжуваним рухом іонів і електронів «тертям» безпосередньо під дією електричного поля всередині молекулярної середовища.

Тепер перейдемо безпосередньо до поведінки дипольних молекул. Нехай одна з пластин буде мати позитивний заряд, друга - негативно заряджена. При цьому диполі d і e змушені будуть зайняти горизонтальне положення і диполь d зробить поворот за годинниковою стрілкою, а диполь e , відповідно, в зворотному напрямку, тобто проти годинникової стрілки. Внаслідок зміни електричного заряду кожної з пластин на протилежний, диполі будуть обертатися поперемінно то в одному, то в протилежному напрямку і займати два рази горизонтальне положення за період поля. У цьому випадку «молекулярне тертя», викликане обертанням диполів, викличе перехід в теплову складову енергію електромагнітних хвиль.

Додатково варто відзначити, що пружному диполі e можливий зсув одних молекул щодо інших, що теж буде супроводжуватися тепловим ефектом.

Все вище перераховане сприяє підвищенню температури матеріалу, через тепло- і вологообмін між поверхнею матеріалу і навколишнім середовищем. Матеріал зі своєї поверхні втрачає частину тепла, і як наслідок, температура всередині матеріалу вища ніж на його поверхні. Це призводить до виникнення значного температурного градієнта між центром продукту і

його поверхнею, величина якого піддається регулюванню шляхом зміни напруженості електричного поля СВЧ, але при цьому його спрямованість при будь-яких умовах оптимальна для видалення вологи по всьому об'єму опроміненого матеріалу, чого не можна домогтися при конвекційному сушінні.

Кількість теплоти, кВт, що виділяється 1 м³ матеріалу, визначається рівнянням [16]:

$$Q = 0,556 \cdot 10^3 \cdot \nu \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot (0,5 \cdot E^2), \quad (1.7)$$

де E - амплітуда напруженості електричного поля, В/м;

ν - частота, Гц;

ε_0 - електрична постійна;

ε - відносна діелектрична проникність;

$\operatorname{tg} \delta$ - тангенс кута діелектричних втрат.

На підставі вищевикладеного напрошується висновок про те, що підвищення температури в продукті під впливом електромагнітного поля СВЧ обумовлено переорієнтацією пов'язаних зарядів і x коливальним рухом. При цьому виникає «внутрішній» нагрів продукту викликаний «внутрішнім» тертям диполів одна об одну.

Головний вплив СВЧ-енергії направлено на вологу, що знаходиться в матеріалі (це обумовлює вибірковість енерговиділення при впливі надвисоких частот), разом з тим виділяється тепла енергія, яка витрачається на нагрівання і випаровування вологи безпосередньо всередині капілярів і пор продукту і утворення в них надлишкового тиску пари, що в одночас тягне за собою активне переміщення вологи на поверхню матеріалу з внутрішніх шарів. При цьому на виділившихся поверхнях обробленого СВЧ енергією продукту волога представлена в крапельно-рідкому стані, що неможливо отримати іншими методами обробки. Тому зовнішнє вологоперенесення найбільш економічно вигідно реалізовувати за допомогою конвекційних методів, тобто застосовувати комбіновану сушку.

Окремо варто відзначити високу ефективність СВЧ сушіння. Це проявляється в тому, що при будь-якому способі сушіння, для вилучення кожної молекули води необхідно затратити певну кількість енергії, при тому дана величина енергії відносно велика. Це визначає високі витрати енергії при штучній сушці продуктів.

В даний час умовно виділяють три основних можливості підвищення енергоефективності сушильних апаратів, незалежно від конструктивних особливостей і способів проведення процесу сушіння:

- зменшення енерговитрат, не пов'язаних безпосередньо з виробництвом;
- застосування способів видалення вологи з продукту, без проведення сушіння;
- повторне використання відпрацьованої енергії.

Застосування СВЧ-випромінювання допускає реалізацію вищенаведених можливостей. Зупинимось детальніше на кожній з можливостей.

Істотною перевагою мікрохвильової сушіння, в порівнянні зі своїми аналогами, є відсутність передачі тепла від нагріваючого елемента. У той же час при застосуванні конвективного сушіння спочатку необхідно нагрівати яким-небудь способом теплоносій - повітря, і тільки після цього передати тепло від нагрітого повітря продукту. При цьому на всіх етапах: нагрівання повітря, транспортування і передача тепла матеріалом відбуватимуться тепло-втрати. Навпаки, при СВЧ сушінню джерелом тепла служить безпосередньо сам матеріал і вищевказані втрати відсутні, тобто вся енергія, вироблена мікрохвильовим генератором, поглинається в продукті. В наслідок високого значення коефіцієнта корисної дії генераторів СВЧ-випромінювання (до 85%) вважається, що до 80% споживаної електроенергії направляється на мікрохвильове видалення вологи. Частина енергії, що залишилася, не спрямована на СВЧ випромінювання, виділяється на

магнетронах у вигляді тепла, але яку можливо за допомогою повітропроводів направити на опромінюваний продукт, тим самим додатково здійснити конвекційну сушку.

Ще одним із способів підвищення ефективності сушіння є утилізація енергії парів, що відводяться, тому що молекули пари, що видаляються з продукту, володіють високим енергетичним потенціалом. Таким чином отриману знову енергію можна застосовувати для конвективного досушування матеріалу, що дозволяє без додаткових енерговитрат підвищити продуктивність апарату до 20 %. При стандартній робочій частоті магнетронів 24-50 МГц електромагнітне поле здатне проникнути всередину продукту на кілька десятків міліметрів з усіх боків, і тим самим проводити сушку цільних продуктів при поперечному перерізі до 100 мм. У класичних способах сушіння необхідне дрібне подрібнення продукту, його укладання тонким шаром і періодичне перемішування, тому що через деякий час на поверхні матеріалу утворюється кірка, яка перешкоджає подальшому відведенню вологи і як наслідок протіканню процесу.

Не можна не відзначити стерилізуючий ефект мікрохвильового випромінювання на стафілококи, кишкову паличку та інші мікроорганізми. Причина даного ефекту обумовлена діелектричним нагріванням протеїнів мікроорганізмів при швидко зростаючій температурі всередині продукту. Це явище знищення мікроорганізмів носить назву «тепловий удар».

1.6. Короткий аналіз підходів математичного моделювання руху частинок дисперсного матеріалу, а також підходів до опису впливу СВЧ-енергії на процес сушіння

Процес сушіння вологого матеріалу визначається як протіканням тепло-обміну між поверхнею оброблюваного продукту і навколишнім середовищем, випаровуванням вологи з поверхні матеріалу в навколишнє

середовище і переміщенням вологи і тепла всередині оброблюваного продукту.

При визначенні фізичної картини процесу сушіння ключовим фактором є спосіб підведення теплоти до продукту і як наслідок - визначає вид математичної моделі. Розглянемо ряд робіт, пов'язаних з моделюванням руху частинок у виважено-закрученому стані, а також моделі впливу СВЧ-енергії на ряд харчових продуктів.

В роботі Прибиткова А.В. [6] описано рух частинки в вихровій камері, яка записана на підставі 2-го закону Ньютона [3, 7, 8]:

$$\frac{d(m\vec{v})}{d\tau} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5, \quad (1.8)$$

де $\vec{F}_1 = m\vec{g}$ - сила ваги частинки;

$$\vec{F}_2 = \xi S_{m\partial} \rho_z \left| \vec{V} - \vec{U} \right| \frac{(\vec{V} - \vec{U})^2}{2} - \text{сила гідродинамічного опору}$$

частинки, $W = \vec{V} - \vec{U}$;

$$\vec{F}_3 = m\vec{g} \frac{\rho_z}{\rho_{\text{ч}}} - \text{підйомна сила Архімеда};$$

$$\vec{F}_4 = \rho_{\text{ч}} \vec{u} \int \text{rot}_n \vec{u} dS - \text{сила Магнуса};$$

$$\vec{F}_5 = f \vec{F}_n - \text{сила тертя};$$

ξ - коефіцієнт гідравлічного опору частинки

$S_{m\partial}$ - площа миделевого перетину частинки, м²;

ρ_z - щільність газу, кг / м³;

\vec{V}, \vec{U} - швидкості газу і частинки, м / с;

$\rho_{\text{ч}}$ - щільність частки, кг / м³;

f - коефіцієнт тертя частинки об стінку;

\vec{F}_n - нормальна сила при ударі частки об стінку, Н

З перерахованих сил, на рух частинки найбільший вплив надають: сила тяжіння і сила гідродинамічного опору частинки. Рівняння (1.8), записане в циліндричній системі координат і має вигляд 30, 31, 76:

$$U_z \frac{dm}{d\tau} + m \frac{dV_z}{d\tau} = -mg - \frac{1}{8} \xi \rho_z \pi d_q W \cdot W_z; \quad (1.9)$$

$$U_r \frac{dm}{d\tau} + m \left(\frac{dV_r}{d\tau} - r\omega^2 \right) = -\frac{1}{8} \xi \rho_z \pi d_q W \cdot W_r; \quad (1.10)$$

$$\omega_r \frac{dm}{d\tau} + m \left(r \frac{d\omega}{d\tau} - 2\omega U_r \right) = -\frac{1}{8} \xi \rho_z \pi d_q W \cdot W_\varphi, \quad (1.11)$$

де U_z, U_r - проекції вектора швидкості частинки на осі z, r ;

ω - кутова швидкість частинки відносно осі апарату, рад;

m - маса вологого частки, кг;

z, r, φ - циліндричні координати ;

$$U_z = \frac{dz}{d\tau}; \quad (1.12)$$

$$U_r = \frac{dr}{d\tau}; \quad (1.13)$$

$$\omega = \frac{d\varphi}{d\tau}; \quad (1.14)$$

$$W_z = U_z - V_z; \quad (1.15)$$

$$W_r = U_r - V_r; \quad (1.16)$$

$$W_\varphi = \omega r - V_\varphi; \quad (1.17)$$

$W = \sqrt{W_z^2 + W_r^2 + W_\varphi^2}$ - відносна швидкість частинки (по модулю), м/с.

Гідравлічний коефіцієнт тертя частинки визначається співвідношенням [26, 33]:

$$\xi = 0,47 + \frac{24}{Re}, \quad (1.18)$$

$$Re = \frac{Wd_q}{\nu}$$

ν - число Рейнольдса для частинки;

d_q - еквівалентний діаметр частинки, м;

ν - кінематичний коефіцієнт в'язкості повітря, м²/с.

Рівняння теплообміну для частинки має вигляд:

$$cm \frac{dT_q}{d\tau} = \alpha (T - T_q) \cdot \pi d_q^2 + H \frac{dm}{d\tau}, \quad (1.19)$$

де c - теплоємність вологої частки, Дж/(кг К);

T, T_q - температура повітря і частинки, К;

α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² К);

H - теплота випаровування води, Дж/кг.

Так як раніше записані диференціальні рівняння носять нелінійний характер, дана задача не може бути представлена в аналітичному вигляді.

Внаслідок цього завдання вирішувалася за чисельним методом Ейлера [24, 34].

Аналог диференціального рівняння (1.9) буде мати вигляд:

$$m_i \frac{U_{z,i+1} - U_{z,i}}{\Delta\tau} = -U_{z,i} \left(\frac{dm}{d\tau} \right)_i - m_i g - \frac{1}{8} \xi_i \rho_z \pi d_q^2 W_i W_{zi}; \quad (1.20)$$

тут i відноситься до теперішнього, а $i + 1$ до наступного етапу за часом;

$\Delta\tau$ - крок за часом, с.

Зі співвідношення (1.20) отримуємо формулу для обчислення проекції

$$U_{z,i+1} = U_{z,i} + \Delta\tau \cdot \left[-\frac{U_{zi}}{m_i} \cdot \left(\frac{dm}{d\tau} \right)_i - g - \frac{1}{8m_i} \xi_i \rho_z \pi d_q^2 W_i W_{zi} \right]; \quad (1.21)$$

У дисертаційній роботі Юрової І.С. [9] рівняння руху частинки в проекціях на координати осі має вигляд:

$$m \frac{dw_x}{d\tau} = \psi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho}{2} \left[(v - w_x)^2 + w_y^2 \right] \cdot \frac{v - w_x}{\sqrt{(v - w_x)^2 + w_y^2}}, \quad (1.22)$$

$$m \frac{dw_y}{d\tau} = \psi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho}{2} \left[(v - w_x)^2 + w_y^2 \right] \cdot \frac{-w_y}{\sqrt{(v - w_x)^2 + w_y^2}} + \frac{m v_x^2}{R_0}. \quad (1.23)$$

де m - маса частинки, кг;

ψ - коефіцієнт аеродинамічного опору частинки;

ρ - щільність теплоносія, кг/м

v - швидкість руху повітря в каналі, м/с;

w_x, w_y - проекції швидкості частки на осі x і y ;

R_0 - середній радіус каналу, м.

Внаслідок перетворення рівнянь (1.22-1.23) маємо наступне:

$$m \frac{dw_x}{d\tau} = \psi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho}{2} \sqrt{(v - w_x)^2 + w_y^2} \cdot (v - w_x), \quad (1.24)$$

$$m \frac{dw_y}{d\tau} = \psi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho}{2} \sqrt{(v - w_x)^2 + w_y^2} \cdot w_y + \frac{m v_x^2}{R_0}. \quad (1.25)$$

Дискретні аналоги диференціальних рівнянь (1.24-1.26) на сітці з постійним кроком мають вигляд:

$$m \frac{w_{x,i+1} - w_{x,i}}{\Delta\tau} = \psi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho}{2} \sqrt{(v - w_{x,i})^2 + w_{y,i}^2} \cdot (v - w_{x,i}), \quad (1.26)$$

$$m \frac{w_{y,i+1} - w_{y,i}}{\Delta\tau} = \psi \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho}{2} \sqrt{(v - w_{x,i})^2 + w_{y,i}^2} \cdot w_{y,i} + \frac{m v_{x,i}^2}{R_0}. \quad (1.27)$$

Звідки йдуть основні розрахункові залежності:

$$w_{x,i+1} = w_{x,i} + \frac{\Delta\tau}{m} \psi \frac{\pi d^2 \rho}{8} \sqrt{(v - w_{x,i})^2 + w_{y,i}^2} \cdot (v - w_{x,i}), \quad (1.28)$$

$$w_{y,i+1} = w_{y,i} + \Delta\tau \left[\psi \frac{\pi d^2 \rho}{8m} \sqrt{(v - w_{x,i})^2 + w_{y,i}^2} \cdot w_{y,i} + \frac{v_{x,i}^2}{R_0} \right]. \quad (1.29)$$

Координати x, y положення частинки визначаються інтегруванням

виразів для проекцій швидкості:

$$x_{i+1} = x_i + w_{x,i} \cdot \Delta\tau, \quad (1.30)$$

$$y_{i+1} = y_i + w_{y,i} \cdot \Delta\tau. \quad (1.31)$$

В роботі Баранова А.Н. [14] рух частинки гречки представлено в циліндричній системі координат: r, Z .

Основними силами, що визначають характер руху частинки є сили тяжіння G і аеродинамічний опір F_v .

Оскільки обрана система координат, є неінерціальною, до реально діючих сил, відповідно до принципу Даламбера, потрібно додати відцентрову силу інерції F_u

$$F_u = \frac{m_u \cdot v_\theta^2}{r_u} \quad (1.32)$$

де m_u - маса частинки;

R_u - радіус частинки

$$m_u = \frac{1}{6} \pi \cdot d_u^3 \cdot \rho_u \quad (1.33)$$

Диференціальні рівняння динаміки частки мають вигляд

$$m_u \cdot \frac{d\vec{u}}{d\tau} = \vec{G} + \vec{F}_v + \vec{F}_u \quad (1.34)$$

У проекціях на координатні осі воно має вигляд

$$m_u \frac{du_r}{d\tau} = \frac{1}{2} C_D \cdot (U_r - u_r) \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot U_{\text{отн}} \cdot S_M + \frac{m_u \cdot u_\theta^2}{r_u} \quad (1.35)$$

$$m_u \frac{du_\theta}{d\tau} = \frac{1}{2} C_D \cdot (U_\theta - u_\theta) \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot U_{\text{отн}} \cdot S_M \quad (1.36)$$

$$m_u \frac{du_z}{d\tau} = \frac{1}{2} C_D \cdot (U_z - u_z) \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot U_{\text{отн}} \cdot S_M - m_u g \quad (1.37)$$

де C_D - коефіцієнт аеродинамічного опору частинки;

$U_{\text{отн}}$ - швидкість теплоносія щодо частки;

S_M - площа міделевого перетину частинки.

Величина C_D може бути знайдена з виразу

$$C_D = 0,4 + \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{0,5}} \quad (1.38)$$

$Re = U_{отн} \cdot d_n / \nu_{возд}$ - число Рейнольдса

Швидкість теплоносія щодо частки можна представити у вигляді

$$U_{отн} = \sqrt{(U_z - u_z)^2 + (U_r - u_r)^2 + (U_\theta - u_\theta)^2} \quad (1.39)$$

$$S_m = \frac{\pi d_q^2}{4} \quad (1.40)$$

Координати частки в довільний момент часу визначаються з співвідношень:

$$\frac{dZ_q}{d\tau} = u_z \quad (1.41)$$

$$\frac{dZ_q}{d\tau} = u_q \quad (1.42)$$

$$\frac{d\theta_q}{d\tau} = u_\theta \quad (1.43)$$

З огляду на нелінійного характеру отриманої системи диференціальних рівнянь руху її інтегрування здійснюється чисельно методом сіток

$$\bar{U}_{отн} = \frac{1}{\tau_1} \int_0^{\tau_1} u_{отн}(\tau) \cdot d\tau \quad (1.44)$$

1.7. Основні висновки

За результатами проведеного аналізу можна зробити наступний висновок

- ефективна і якісна сушка зерна проса може бути здійснена в тепломасообмінних апаратах із закрученими потоками теплоносія зі застосуванням СВЧ-енергопідведення. Даний спосіб сушіння дозволить скоротити час

впливу на продукт високих температур, що забезпечить збереження поживної та біологічної цінності, зокрема незамінні амінокислоти, тим самим підвищити якість готового продукту. На підставі цього були сформульовані мета і завдання дослідження.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗЕРНА ПРОСА, ЯК ОБ'ЄКТА СУШІННЯ

Для обґрунтування вибору того чи іншого способу сушіння і подальшого створення сушильного обладнання на його основі необхідний сукупний аналіз властивостей вихідного дисперсного матеріалу [22]. При цьому важливе значення відводиться класифікації матеріалів як об'єктів сушіння, в основі якої будь-які вологі матеріали можна розділити на три види по відношенню до їх колоїдно-фізичним властивостям: типові колоїдні тіла, капілярно-пористі тіла, капілярно-пористі колоїдні тіла. Дослідження вихідних вологих продуктів як об'єктів сушіння є одне з головних напрямків підвищення інтенсивності процесу сушіння, яке дозволить вибирати найбільш раціональну конструкцію сушильного апарату, який гарантує необхідний для сушіння час і необхідний активний гідродинамічний режим. Властивості вихідних продуктів як об'єктів сушіння визначається набором фізико-хімічних, електро- та тепло-фізичних, структурних і технологічних показників.

Тільки знання даних показників, а також їх залежностей від часу, температури та ін., дозволить провести наукове обґрунтування раціональних методів обробки та оптимального режиму проведення процесу, інженерний розрахунок процесу і апарату з подальшим створенням сучасної системи автоматичного управління.

2.1. Дослідження фізико-механічних властивостей зерна проса

Для правильного вибору інтенсивності пневморежиму і вибору раціональної конструкції елементів сушильного апарату, що розробляється, необхідно враховувати набір наступних характеристик дисперсного матеріалу: розмір і форма частинок, щільність і пористість шару, статичний і

динамічний кути природного укусу. Отримані залежності дозволять судити про такі параметри сировини як транспортабельність, сипкість і злежуваність, а також інформацію, що зберігається [11, 23].

2.1.1. Визначення щільності.

Щільність сипучого матеріалу визначається його хімічним складом, структурою і вологістю. Визначення щільності зерна проса здійснювалося в ході експерименту пікнометром (рис. 2.1) методом гідростатичного зважування.



Рис. 2.1. - Пікнометр

Експеримент проводився на підставі ГОСТ 2252477 наступним чином. Відбирали поспіль три наважки масою по 5 г кожна. Зважували на аналітичних вагах і поміщали кожен наважку окремо в сітчасту корзину, виготовлену з білої жести товщиною 0,5 ... 0,7 мм, і закривали кришкою з того ж матеріалу. Безпосередньо до початку експерименту зважували масу кошика з підвісами. Після чого кошик опускалася в мірний циліндр, заповнений етиловим ефіром, який знаходиться в термостаті з температурою води $293 \pm 1,5$ К. Для видалення бульбашок повітря з кошика з продуктом

рідина піддавалася перемішуванням. Відзначали показання ваг за допомогою гир, що навішуються на плече коромисла.

Обсяг проса в кожній навішуванні V , m^3 вираховували за формулою

$$V = \frac{m_n - m_z}{\rho_{ж}}, \quad (2.1)$$

де m_n , m_z - маса відповідно продукту і вантажу, кг;

$\rho_{ж}$ - щільність етилового ефіру при 20 °С, kg/m^3 .

Щільність проса в кожній наважці, kg/m^3 визначали за формулою

$$\rho = \frac{m_n}{V}, \quad (2.2)$$

де m_n - маса наважки, кг;

V - об'єм наважки, m^3 .

В якості остаточного результату експерименту вибирали середньо-арифметичне за підсумками трьох паралельних вимірювань.

Залежність щільності зерна проса ρ від вологості W^c представлена на рис.2.2.

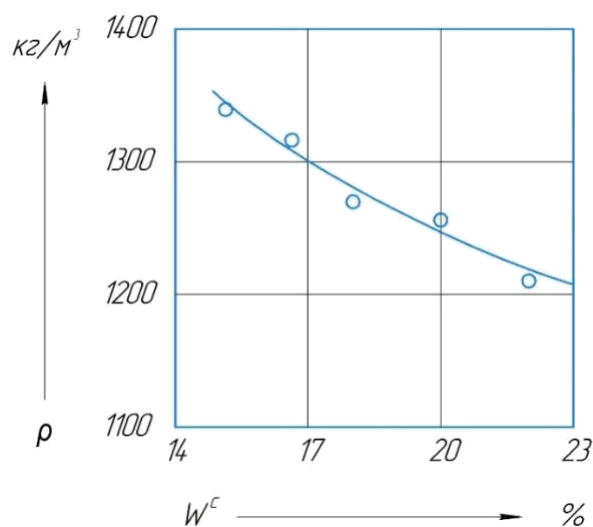


Рис. 2.2. - Залежність щільності зерна проса від вологості W^c

Отримані дані говорять про те, що при зменшенні вологості відбувається збільшення щільності, а залежність має виражений криволінійний характер. Це обумовлюється як якісним станом вологи, так і

його кількісним рівнем.

2.1.2. Вивчення насипної щільності.

Величина насипної щільності зерен проса визначається відношенням одиниці маси до одиниці об'єму. Дана величина залежить від вологості зерна і його щільності, а також від форми зерен, фракційного складу і їх шорсткості. Вона необхідна при розрахунках продуктивності машин і апаратів, бункерів, будь-яких транспортних елементів і т.д. [23].

Визначення насипної щільності здійснювалося за допомогою літрової пурки, причому температура навколишнього середовища становила $293 \pm 1,5$ К [4]. Експеримент проводився під впливом сили гравітації для маси частинок. Розрахункова формула мала такий вигляд.

$$\rho_n = \frac{G}{V}, \quad (2.3)$$

де ρ_n - насипна щільність, $\text{кг}/\text{м}^3$;

G - маса зразка, кг ;

V - об'єм зразка ($0,001 \text{ м}^3$).

Результати дослідів представлені на рис. 2.3.

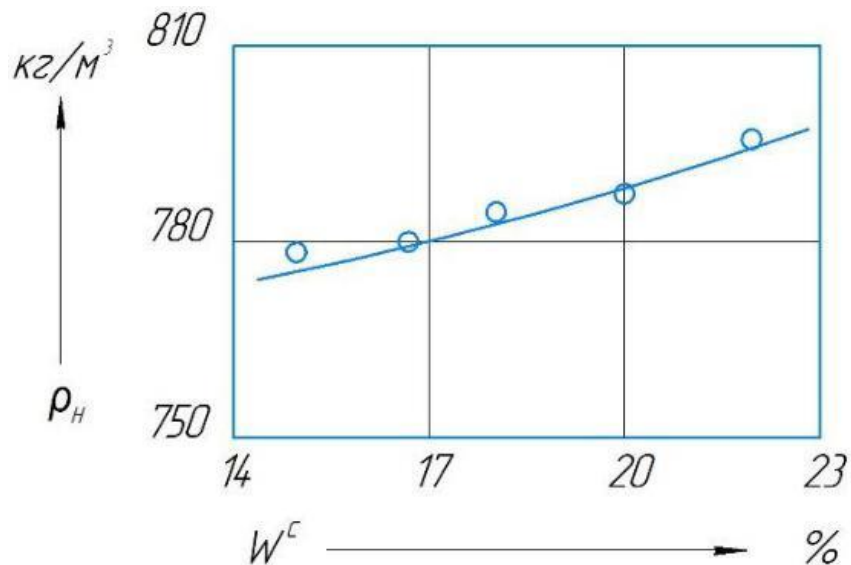


Рис. 2.3. - Залежність насипної щільності зерна проса ρ_n від вологості

W^c

Згідно з даними графіка, при зменшенні вологості W_c з 22 до 15% відбувається зменшення насипної щільності продукту.

2.1.3. Кути природного укосу.

Характеристика матеріалу, що визначається можливістю переміщення однієї частинки відносно іншої при переміщенні всього шару, є кут природного укосу. Іншими словами, це максимальний кут, який утворює вільна поверхня дисперсного продукту з горизонтальною площиною [4, 12].

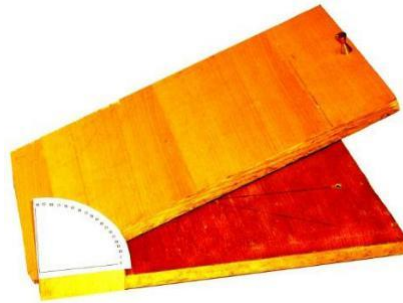


Рис. 2.4. - Установка для вимірювання кута природного укосу

Визначення кута природного укосу вимірювалася двома методами: способом обвалення (спосіб визначення статичного кута природного укосу) і способом насипання (спосіб визначення динамічного кута природного укосу) на експериментальній установці, представленій на рис. 2.4.

Спосіб обвалення вдавнив із себе наступне. Зерно проса засипалося в прямокутну ємність, після чого відбувалося видалення однієї з бічних поверхонь ємності. В результаті відбувалося обвалення маси сипучого продукту, а отриманий між горизонтальною поверхнею і схилом дисперсного матеріалу кут був статичним кутом природного укосу.

При способі насипання на горизонтальну рівну поверхню необхідно висипати дисперсний продукт, після чого відбувається зміна кута між горизонтальною поверхнею установки і його підставою до початку зсипання продукту з горизонтальної поверхні. Одержаний таким чином кут називають

динамічним кутом природного укусу.

Кожен з експериментів проводили по шість разів для забезпечення більш точних результатів. Розкид результатів кожного з вимірів від підсумкового значення знаходився в допустимих межах 10%. Підсумкове значення було визначено в результаті середньо арифметичного обчислення. Графічна інтерпретація отриманих даних представлена на рис. 2.5.

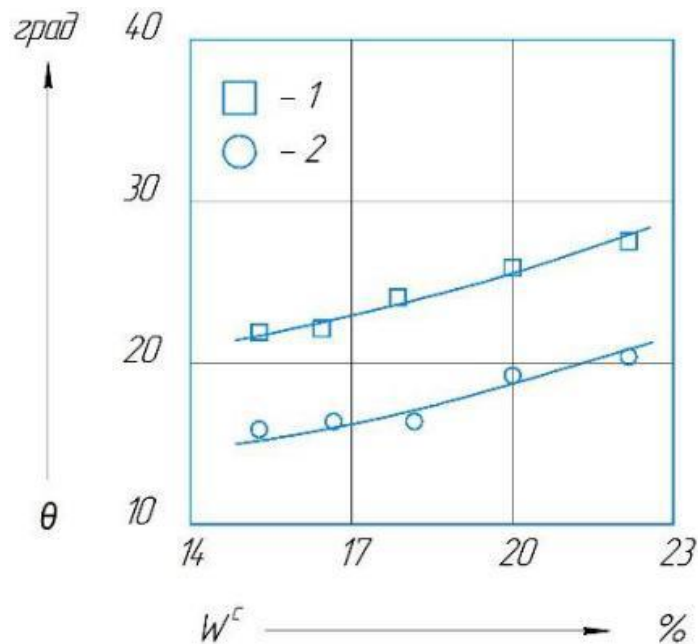


Рис. 2.5. - Залежності кутів природного укусу θ зерна проса від вологості W^c : 1 - статичного, 2 - динамічного

За графічними залежностями можна зробити наступне введення про те, що найбільше значення на величину кутів природного укусу частинок зерна проса надає вологість. Це відбувається під впливом молекулярних сил тяжіння плівковою рідиною, яка знаходиться на поверхні кожного із зерен проса. Статичний кут природного укусу в залежності від вологості W^c від 15 до 22% змінювався в межах від 21 до 28 градусів, а динамічний - від 15 до 21 градусів.

2.1.4. Визначення коефіцієнта щільності укладки.

Величина, що визначається як відношення насипної щільності

матеріалу і середньої щільності матеріалу, називається коефіцієнтом щільності укладки.

Значення коефіцієнта щільності укладки визначається за формулою

$$K = \frac{\rho_n}{\rho}, \quad (2.4)$$

де ρ_n - насипна щільність шару, кг/м³;

ρ - середня щільність зерна проса, кг/м³.

На рис. 2.6 приведена залежність коефіцієнта щільності укладки До проса від вологості W_c , яка показує, що зі збільшенням вологості зерна проса W_c від 15 до 22% коефіцієнт щільності укладки зменшується з 0,815 до 0,778.

Дана характеристика сипучих продуктів визначається способом завантаження, коефіцієнтом зовнішнього тертя і формою частинок. Окремо варто згадати, що при дії статичних і динамічних навантажень на апарат, що знаходиться в ньому маса ущільнюється.

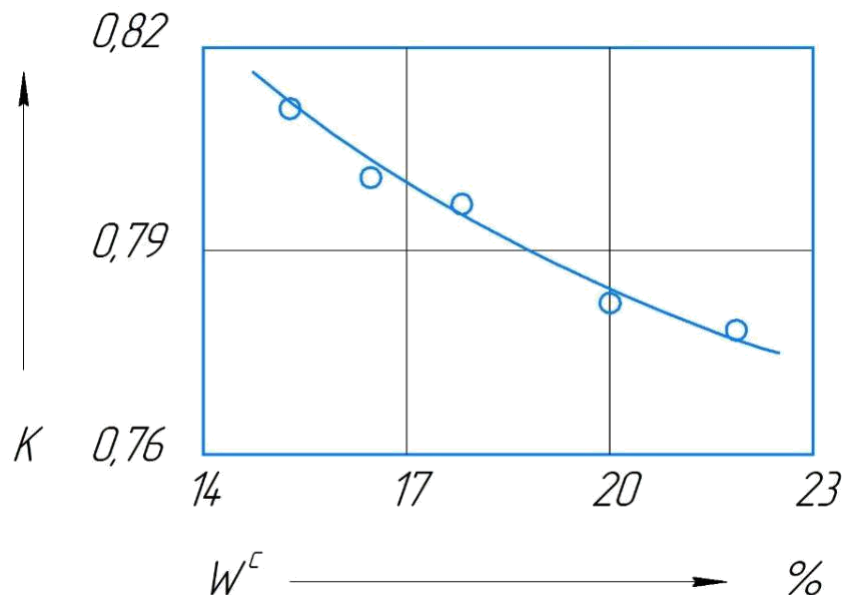


Рис. 2.6. - Залежність коефіцієнта щільності укладки зерна проса K від вологості W_c

2.1.5. Дослідження порозности шару.

Характеристика, що вдає із себе відношення обсягу пор до загального обсягу шару продукту, називається порозністю шару.

Дана величина визначається залежністю

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_n}{\rho}, \quad (2.5)$$

де ρ_n - насипна щільність продукту, кг / м³;

ρ - питома вага продукту, кг/м³.

На підставі вищевикладеного, форма і шорсткість зерен, а також фракційний склад продукту визначають порозність шару.

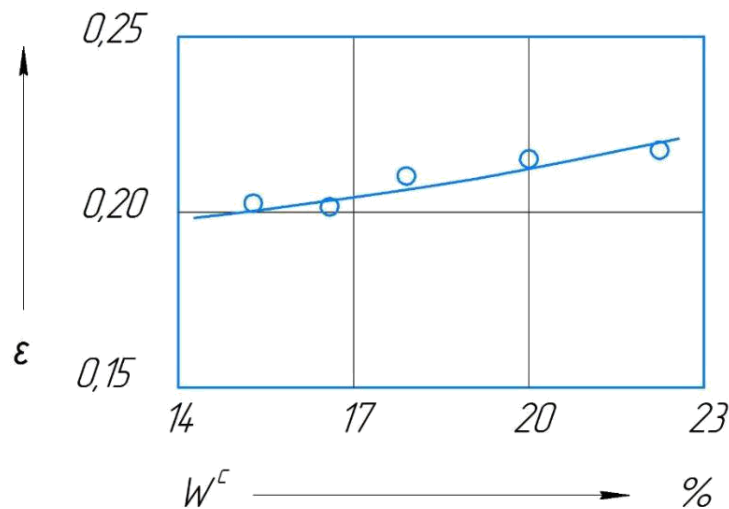


Рис. 2.7. - Залежність порозності шару зерна проса ε від вологості W^c

На рис. 2.7 приведена залежність порозності шару проса від вологості W^c , з якої випливає, що зі зменшенням вологості W^c від 22 до 15% порозність шару зменшується з 0,22 до 0,20.

2.2. Дослідження тепло-фізичних характеристик

Теплові характеристики вологих продуктів, такі як тепло-провідність, температуропровідність і теплоємність, потрібні для проведення теплових розрахунків сушильного обладнання, тому що від них залежить вибір раціонального режиму сушіння продукту. Фактично, підтвердження здійсненності проведення процесу сушіння для кожного конкретного дисперсного матеріалу в апаратах з активним гідродинамічним режимом

визначається як здатність сприйняття необхідного для сушіння кількості тепла, так і дифузійного опору, що залежить від внутрішньої пористої структури продукту [4, 5, 9]. Крім цього, знання величин теплових характеристик дозволить проводити обробку експериментальних результатів процесу тепло- і масообміну, встановити механізм перенесення тепла у вологому продукті, проаналізувати форми і види зв'язку вологи в матеріалі і т.д. [18].

Тепло-фізичні характеристики сировини є функціями стану і властивостей речовини, що залежать від багатьох чинників, до яких слід віднести хімічний склад і структуру. Найбільший інтерес представляють із себе залежності тепло-фізичних характеристик від температури і вологості продукту, які роблять найбільший вплив на теплопровідність, температуропровідність і теплоємність.

Так як в ході літературного огляду значення вищеназваних характеристик зерна проса відрізняються, слід уточнити їх в ході експериментів.

Існуючі на даний момент методи вимірювання тепло-фізичних характеристик продуктів можна розділити на два типи: стаціонарного та нестаціонарного теплового потоку. Методи, засновані на статичності температурного поля, яке проходить через досліджуваний матеріал під час всього експерименту, називають методами стаціонарного теплового потоку [18]. Характерною особливістю даного методу є тривале проведення експерименту і «жорстке» виконання граничних умов. Способи нестаціонарного потіку тепла характеризуються зміною температурного режиму в досліджуваному зразку, при цьому тепловий вплив на продукт короткочасний, а градієнт температури досить малий. Як перевагою нестаціонарних методів слід зазначити таке: простота, швидка швидкість проведення досвіду, і несуттєвий вплив температурного градієнта на гідродинамічне перебування матеріалу.

Для того щоб визначити тепло-фізичні характеристики нами був застосований метод нестационарного теплового режиму, що базується на вирішенні задачі теплопровідності для початкової стадії процесу, а саме метод двох температурочасових точок, розроблений В.С. Волькенштейном, що дозволяє встановити значення коефіцієнтів температуропровідності і теплопровідності, а також величину питомої теплоємності з [18].

Початкова стадія охоплює малі проміжки часу, що характеризуються числом Фур'є $F_0 \leq 0,55$ [8]. При використанні даної теорії теплопровідності, тобто на початковому етапі, експеримент протікає досить швидко, але це дозволяє позбутися від впливу ефекту термовологопровідності на досліджувані тепло-фізичні характеристики.

Завдання зводиться до спільного вирішення диференціальних рівнянь теплопровідності для одновимірного потоку:

для досліджуваного матеріалу:

$$\frac{\partial T_M(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_M \frac{\partial^2 T_M(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (0 < x < h), \quad (2.6)$$

для еталона:

$$\frac{\partial T_E(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_E \frac{\partial^2 T_E(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (h < x < \infty), \quad (2.7)$$

де x - поточна координата;

h - висота шару досліджуваного матеріалу;

τ - будь-який момент часу;

T_M - температура досліджуваного матеріалу, К;

T_E - температура зразка, К.

Початкові і граничні умови цього завдання виражаються наступною системою рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} T_M(x, 0) &= T_Э(x, 0) = T_0 \\ T_M(h, \tau) &= T_Э(h, \tau) \\ \lambda_M \frac{\partial T_M(h, \tau)}{\partial x} &= \lambda_Э \frac{\partial^2 T_Э(h, \tau)}{\partial x} \\ T_M(0, \tau) &= T_H = const \\ T_Э(\infty, \tau) &= T_0 \end{aligned} \right\}, \quad (2.8)$$

де T_H - температура нагрівача, К;

T_0 - температура досліджуваного зразка і еталону в початковий момент часу, К.

Для температури T в місці стику зразка і еталона (коли $x = h$) рішення рівнянь (2.11), (2.12) урахуванням (2.13) дається у вигляді нескінченного ряду:

$$\frac{T}{T_H} = (1 + \alpha) \cdot [\operatorname{erfc}(y) - \alpha \cdot \operatorname{erfc}(3y) + \dots], \quad (2.9)$$

де:

$$\alpha = \frac{\lambda_M \cdot \sqrt{\alpha_Э} - \lambda_Э \cdot \sqrt{\alpha_M}}{\lambda_M \cdot \sqrt{\alpha_Э} + \lambda_Э \cdot \sqrt{\alpha_M}}; \quad y = \frac{h}{2\sqrt{\alpha \cdot \tau}}$$

$$\operatorname{erfc}(y) = 1 - \operatorname{erf}(y)$$

$$\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\pi} \int_0^y e^{-y^2} \cdot dy$$

- інтеграл ймовірності Гаусса.

Для малих значень рішення рівняння (2.9) обмежується першим рішенням членом ряду. У цьому випадку рішення має вигляд:

$$\frac{T}{T_H} = (1 + \alpha) \cdot [1 - \operatorname{erfc}(y)], \quad (2.10)$$

Вирішуючи рівняння (2.6) і (2.7) з урахуванням (2.8), можна визначити для зерна проса:

$$\alpha_M = \frac{h^2}{4y_1^2 \tau_1}, \quad (2.11)$$

$$\lambda_M = b \cdot \varepsilon \sqrt{\alpha_M}, \quad (2.12)$$

$$c_M = \frac{\lambda_M}{\alpha_M \cdot \rho_M}, \quad (2.13)$$

де y і ε - деякі безрозмірні множини, які визначаються за таблицями, виходячи зі знайдених досвідчених співвідношень;

τ_2/τ_1 ; τ_1 - час, протягом якого температура на границі зіткнення еталонного тіла досліджуваного зразка досягне $\Delta T1 = k1 \Delta T$;

τ_2 - час, протягом якого ця температура досягне $\Delta T2 = k2 \Delta T$;

k_1 і k_2 - завчасно задані значення, рівні 0,75 і 0,5;

ΔT - різниця між температурою нагрівача T_H і температурою в місці стику досліджуваного матеріалу і еталона T , тобто $T = T_H - T$;

ρ_M - щільність досліджуваного матеріалу, кг/м³.

Визначення тепло-фізичних характеристик зерна проса відбувалося на вимірювальному пристрої Coesfeld RT1394H (рис. 2.8).

Базис вимірювальної установки (рис. 2.9) являє собою два коаксіально розташованих циліндра 1 і 2.

Внутрішній циліндр 1 з капролона за допомогою підшипників 9 встановлений співвісно по відношенню до зовнішнього циліндру 2 і складається з трьох коаксіальних циліндричних шарів.

На зовнішній поверхні внутрішнього коаксіального циліндричного шару по спіралі намотані мідним дротом термоперетворювач опору і манганіновим проводом електричний нагрівач 3.

Висновки від термоперетворювача опору і електричного нагрівача пропущені через канал на зовнішній поверхні циліндра і підключені до гнізда 8.

Термоперетворювач опору і нагрівач відокремлені від аналізованого продукту гільзою з капролона 4.

Нижній торець 5 внутрішнього циліндра виготовлений у вигляді півсфери. Зовнішній циліндр (показаний на рисунку в спрощеному вигляді)

виконаний з бронзи. До нижньої його частини прикріплено підставу, також з бронзи, що має напівсферичне поглиблення.

Таким чином, зазор між внутрішнім і зовнішнім циліндрами в нижній частині дорівнює зазору між бічними поверхнями циліндрів. До бічної поверхні зовнішнього циліндра прикріплена водяна сорочка 10 з нержавіючої сталі, призначена для термостатування зовнішнього циліндра і підтримки граничних умов першого роду відповідно до фізичної і математичної моделі вимірювального пристрою.

Функціональна схема вимірювального пристрою за визначенням реологічних і тепло-фізичних характеристик харчових продуктів зображена на рис. 2.10.



Рис. 2.8. - Вимірювальна установка для визначення реологічних і тепло-фізичних характеристик Coesfeld RT1394H

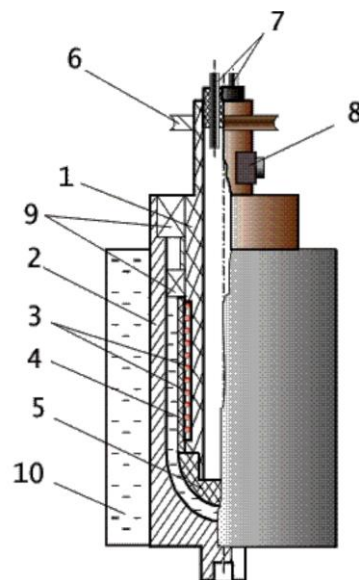


Рис. 2.9. - Конструкція

Контроль за ходом проведення випробувань, а також обробка отриманої інформації відбувалася за допомогою віртуального приладу, створеного в програмному середовищі LabView 7.0.

При проведенні досліджень початкова температура продукту і еталона

протягом всього досліду підтримувалися постійно. Еталон 6 перетином 70 x70 мм і довжиною 150 мм виготовлений з органічного скла і має наступні характеристики: $a_e = 15,7 \text{ м}^2/\text{с}$, $e = 0,1839 \text{ Вт/м К}$, $c_e = 10,88 \text{ Дж/кг К}$, $E = 1075 \text{ кг/м}^3$.

В ході експерименту фіксується час 1 та 2, протягом якого температура на кордоні розділу еталонного тіла і досліджуваного зразка досягне заданого значення ΔT_1 і ΔT_2 відповідно.

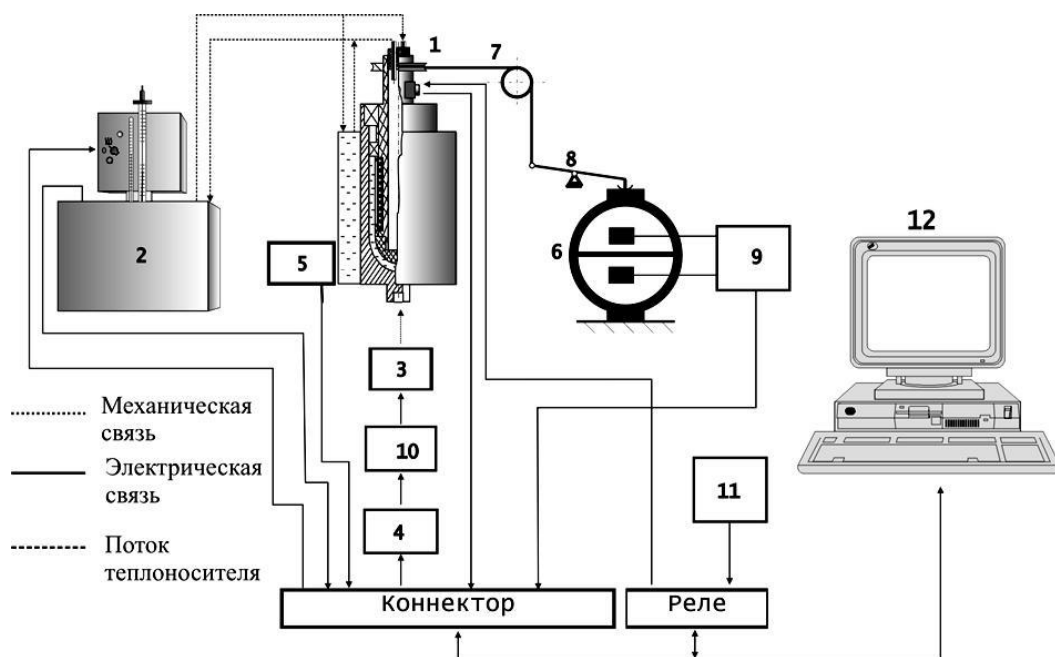


Рис. 2.10. - Функціональна схема вимірювальної установки: 1 - вимірювальний пристрій; 2 - рідинний термостат; 3 - електродвигун постійного струму; 4 - підсилювач потужності У-13Н; 5 - перетворювач кутової швидкості обертання зовнішнього циліндра; 6 – віброчастотний перетворювач сили; 7 - трос; 8 - система важеля; 9 - підсилювач; 10 - випрямляч; 11 - блок живлення; 12 - ПК, оснащений багатифункціональною платою збору даних PCI MIO-16E-1

Значення коефіцієнтів температуропровідності і теплопровідності були визначені по емпіричних залежностях, які були отримані в результаті рішення системи диференціальних рівнянь, складених для даної системи

двох тіл, при цьому одне з тіл має невідомі теплові властивості. Таким чином, потрібно вирішити отриману систему диференціальних рівнянь з результатами проведених експериментів.

Температуропровідність досліджуваних зразків зерен проса визначалася за емпіричним рівнянням

$$a_m = \frac{x^2}{4(z'')\tau_2}, \quad (2.14)$$

де x - товщина шару зерен проса, м;

z'' - інтеграл Гаусса, який визначається за графіком (рис. 2.11) в залежності від ставлення τ_2/τ_1 .

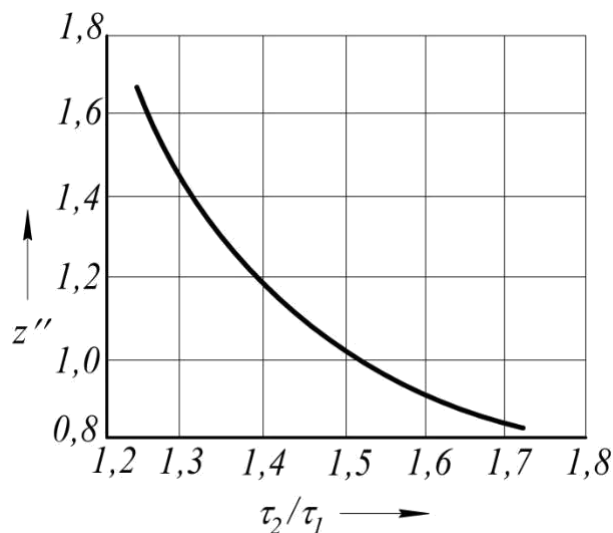


Рис. 2.11. - Залежність зміни інтеграла Гаусса від симплекса τ_2/τ_1 .

Теплопровідність (Вт/(м К)) досліджуваних зразків зерен проса визначається за емпіричною формулою

$$\lambda_m = \lambda_e \frac{1-h}{1+h} \sqrt{\frac{a_m}{a_e}}, \quad (2.15)$$

де λ_m , a_m - відповідно теплопровідність і температуропровідність зразка досліджуваного харчового продукту;

$\lambda_e = 0,184$ Вт/(м К), $a_e = 15,7 \cdot 10^{-8}$ м²/с - відповідно теплопровідність і температуропровідність еталона;

h - допоміжна величина, яка визначається за формулою:

$$h = \frac{t''}{t_{zp} [1 - \Phi(z'')] } - 1, \quad (2.16)$$

де t'' - температура в площині зіткнення зразка продукту і еталона, що визначається за отриманою діаграмою, °С;

t_{zp} - температура гриючої поверхні, що визначається за отриманою діаграмою аналогічно, °С;

$\Phi(z'')$ - функція Гаусса.

Питома теплоємність харчового продукту (Дж/(кг К)) визначається за залежністю:

$$c_m = \lambda_m / (a_m \rho_m)$$

де ρ_m - щільність харчового продукту, кг/м³.

Відносні похибки визначення α і λ не перевищували 1%. Результати обробки експериментів представлені на рис. 2.12-2.17 [7].

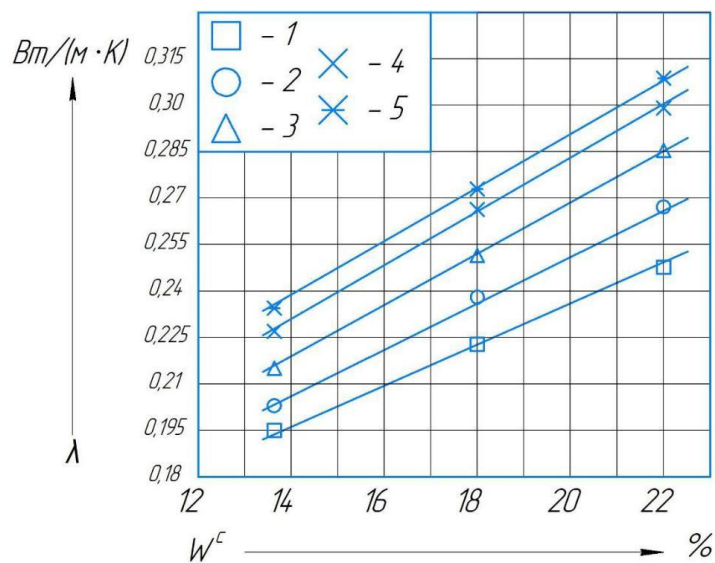


Рис. 2.12. - Залежність коефіцієнта теплопровідності λ , Вт/(м · К), від вологості W^c при: 1 - $T = 293$ К; 2 - $T = 313$ К; 3 - $T = 333$ К; 4 - $T = 353$ К; 5 - $T = 373$ К

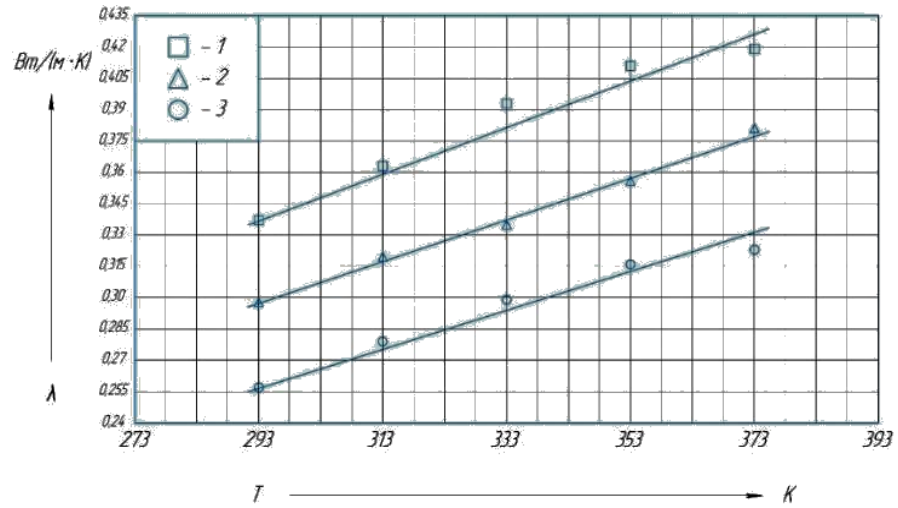


Рис. 2.13. - Залежність коефіцієнта теплопровідності λ , Вт/(м · К), від температури T при: 1 - $W^c = 23\%$; 2 - $W^c = 19\%$; 3 - $W^c = 15\%$

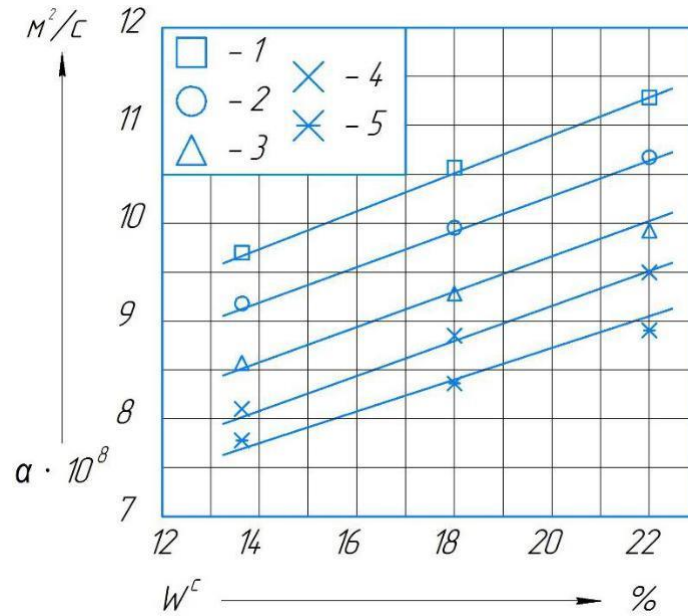


Рис. 2.14. - Залежність коефіцієнта температуропровідності $a \cdot 10^8$, м²/с, від вологості W^c при: 1 - $T = 293$ К; 2 - $T = 313$ К; 3 - $T = 333$ К; 4 - $T = 353$ К; 5 - $T = 373$ К

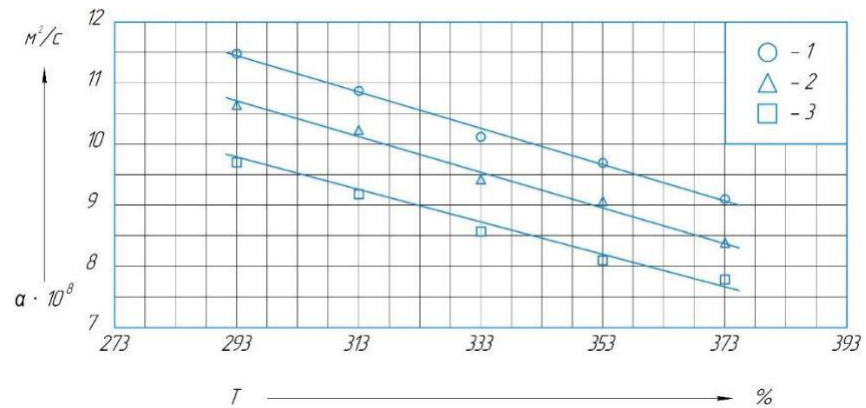


Рис. 2.15. - Залежність коефіцієнта температуропровідності $a \cdot 10^8$, $\text{м}^2/\text{с}$, від температури T при: 1 - $W^c = 23\%$; 2 - $W^c = 19\%$; 3 - $W^c = 15\%$

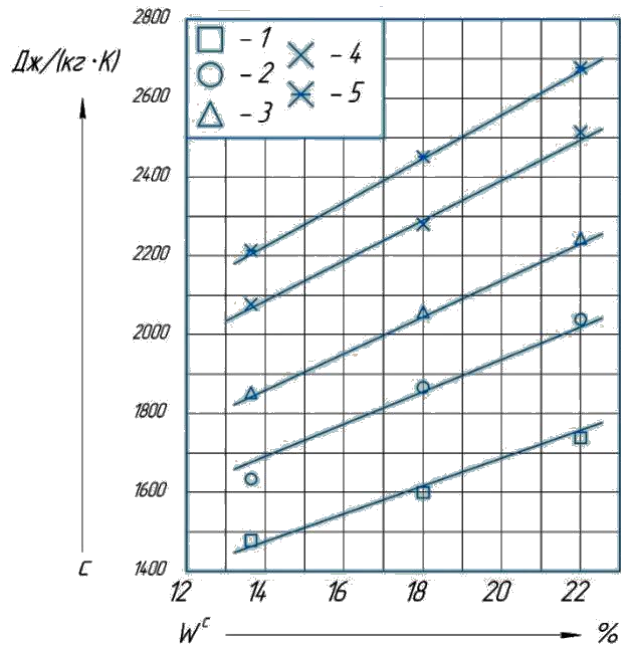


Рис. 2.16. - Залежність коефіцієнта питомої теплоємності c , $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, від вологості W^c при: 1 - $T = 293 \text{ К}$; 2 - $T = 313 \text{ К}$; 3 - $T = 333 \text{ К}$; 4 - $T = 353 \text{ К}$; 5 - $T = 373 \text{ К}$

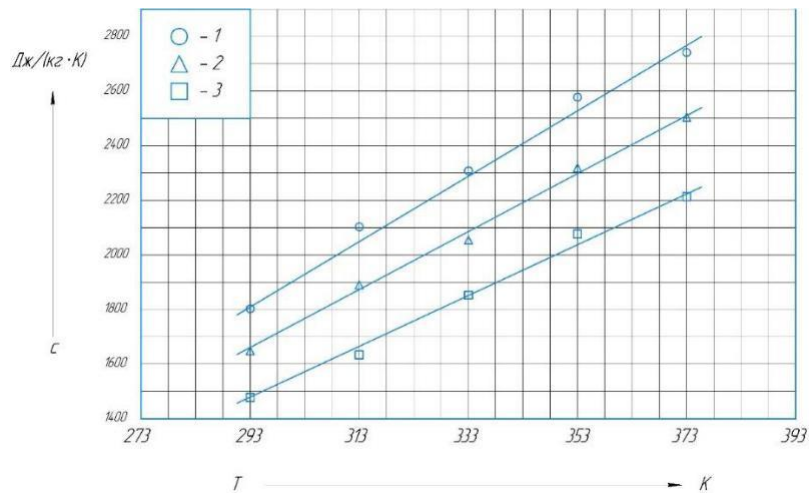


Рис. 2.17. - Залежність коефіцієнта питомої теплоємності c , $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, від температури T при: 1 - $W^c = 23\%$; 2 - $W^c = 19\%$; 3 - $W^c = 15\%$

З графіків видно, що при збільшенні температури, коефіцієнт теплопровідності λ і питома теплоємність c монотонно зростають, а коефіцієнт температуропровідності a - монотонно убиває.

Дані експерименту були оброблені за допомогою програмного середовища «Table Curve 3D», що дозволяє отримати залежності 2.17-2.19 тепло-фізичних характеристик від вмісту вологи в інтервалі 15-23% і діапазоні температур 293-373 К.

$$\alpha = 250,12 - 76,69 \cdot \ln T + 0,58 \cdot W_0^c + 6 \cdot (\ln T)^2; \quad (2.17)$$

$$\lambda = (0,17 + 1,23 \cdot T + 1,95 \cdot W_0^{c^2}) / (1 + 7,18 \cdot T^2); \quad (2.18)$$

$$c = 28433,55 - 260,19 \cdot T - 142,96 \cdot W_0^c + 0,8 \cdot T^2 - \\ - 1,06 \cdot W_0^{c^2} + 1,05 \cdot T \cdot W_0^c \quad (2.19)$$

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА В АПАРАТІ ІЗ ЗАКРУЧЕНИМИ ПОТОКАМИ ТЕПЛОНОСІЯ І СВЧ-ЕНЕРГОВОДВОДОМ

При вивченні процесів, які відбуваються в сушильних апаратах, потрібно розумне поєднання отриманих в ході експериментів даних і методів математичного моделювання. У даній роботі нами запропоновано оригінальне технічне рішення для проведення процесу сушіння зерна проса, а також підтвердження математичної моделі процесу, яке полягає в синтезі активного гідродинамічного режиму за допомогою організації закручених потоків теплоносія в сушильній камері і застосування електромагнітного поля СВЧ. Дане технічне рішення реалізовано нами в апараті з закрученими потоками теплоносія і СВЧ - енергоподводом.

3.1. Опис експериментальної установки і методика проведення експерименту

Схема експериментальної установки для дослідження процесу сушіння зерна проса представлена на рис. 3.1.

Основною частиною експериментальної сушильної установки служить циліндро-конічна камера 1, до якої за допомогою патрубків 3 і 4 здійснюється підведення сушильного агента, відповідно, тангенціального і осьового потоків. Сушильним агентом в даній установці є повітря, нагрівання якого здійснюється калориферами 7 і 8. Також відмінною рисою даної установки є спосіб завантаження зерна проса в циліндро-конічну камеру, а саме безпосередньо через патрубок подачі тангенціального потоку сушильного агента.

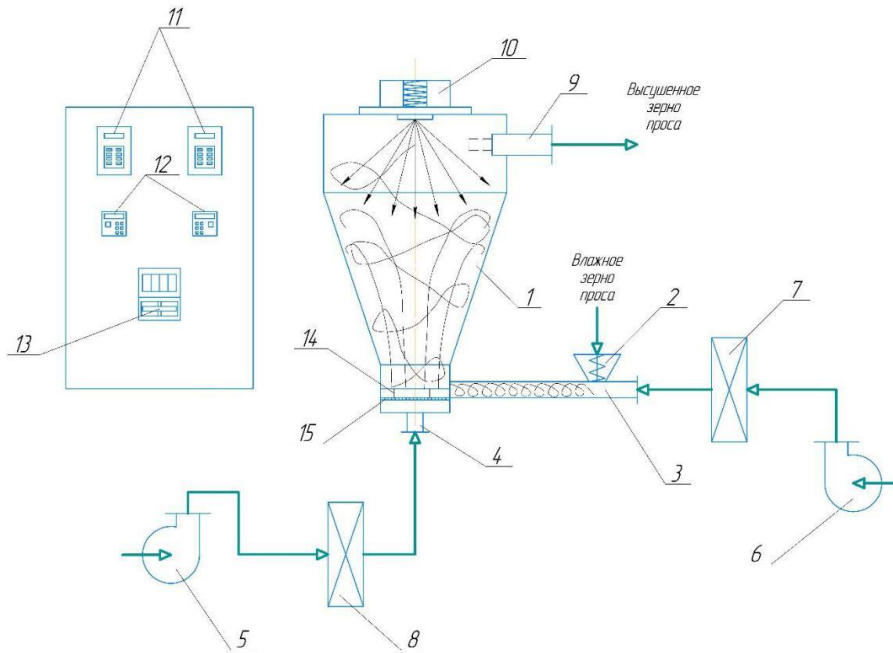


Рис. 3.1. - Схема експериментальної установки для сушіння зерна проса в апараті з закрученими потоками теплоносія і СВЧ-енергоподводом: 1 - циліндро-конічна камера, 2 - пристрій живлення, 3, 4 - патрубки, 5, 6 - вентилятори, 7, 8 - калорифери, 9 - розвантажувальний патрубок, 10 - СВЧ блок, 11 - частотні перетворювачі, 12 - терморегулятори, 13 - електролічильник, 14 - пристрій завихрення, 15 - решітка

Організація експериментальної установки полягає в наступних заходах.

Перед початком сушіння установку необхідно вивести на технологічний режим. Для цього необхідно здійснити прогрів установки. За допомогою терморегуляторів 12 встановлюється необхідна температура, як правило 325 К, включаються частотні перетворювачі 11, регулюються на швидкість руху теплоносія 2 м/с, що дозволить забезпечити циркуляцію повітря і запобігти перегріву калориферів 7 і 8.

Після прогріву сушильної установки зерно проса початкової вологості $W^c = 22\%$ завантажують в пристрій живлення 2. За допомогою частотних перетворювачів встановлюємо необхідне співвідношення швидкостей осьового і тангенціального потоків теплоносія. Співвідношення швидкостей встановлювалося відповідно до попередньо проведеним експериментам, яка

забезпечує знаходження шару зерна у зважено-закрученому стані.

Після проведення всіх заходів установка повністю готова до роботи, відкривається пристрій живлення 2 і зерно проса починає переміщення по патрубку 3. В цей же час включається СВЧ блок 15 із заданою потужністю СВЧ.

У нижній частині циліндро-конічної сушильної камери розташований пристрій завихрення 14, який прикріплено до грат 15, що служить для утримування зерна проса в разі екстреної зупинки експериментальної установки і рівномірного розподілу осьового потоку. Основним завданням пристрою завихрення 14 є формування закрученого потоку зерна проса на початковому етапі роботи установки. Просо потрапляючи в пристрій завихрення під вплив осьового і тангенціального потоків сушильного агента починає підйом по висоті циліндро-конічної камери 1, при цьому чим вище піднімається зерно проса, тим менше його поточна вологість і тим більший вплив виявляється на нього СВЧ-енергією випромінюваної з СВЧ-блоку .

Вивантаження висушеного зерна проса здійснюється через розвантажувальний патрубок 9.

Задана температура теплоносія, що підводиться в сушильну установку, підтримується автоматично за допомогою одноканальних ПД регуляторів вимірювачів ОВЕН ТРМ10, вимірювання швидкості повітря на вході і виході з сушильної камери вироблялося багатофункціональним приладом SKYWATCH ATMOS. Регулювання витрати повітря здійснюється частотними перетворювачами Веспер Е2-8300.

Дослідження кінетики сушіння зерна проса проводилося в стаціонарному режимі, параметри агента сушіння в кожному експерименті підтримувалися на одному рівні в інтервалі значень: витрата осьового потоку змінювалася від 100 до 200 м³/год; витрата тангенціального потоку від 50 до 100 м³/год; температура на вході в камеру - від 318 К до 333 К.

3.2. Багатофакторний статистичний аналіз процесу сушіння проса в СВЧ-апараті з закрученими потоками теплоносія

3.2.1. Обґрунтування вибору і меж зміни вхідних факторів.

Для вивчення взаємодії різних факторів, що впливають на проведення процесу сушіння проса в СВЧ-апараті з закрученими потоками теплоносія, нами були застосовані математичні методи планування експерименту [3, 17, 25]. При цьому математична модель має вигляд рівняння регресії 3.1.

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^N a_i x_i + \sum_{i=1}^N a_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j}^N a_{ij} x_i x_j, \quad (3.1)$$

де a_0 - вільний член рівняння, рівний середній величині відгуку за умови, що чинники, які розглядаються, знаходяться на середніх, «нульових» рівнях;

x - масштабовані значення факторів, які визначають функцію відгуку і варіюються в процесі експериментальних досліджень;

i, j - індекси факторів;

a_i коефіцієнти при лінійних членах;

a_{ij} - коефіцієнти межфакторних взаємодій, що показують, характер зміни ступеня впливу одного фактора при зміні множини іншого;

a_{ii} коефіцієнти квадратичних взаємодій, що визначають відхилення від лінійності вихідного параметра при впливі розглянутих факторів;

N - число факторів в матриці планування експерименту.

Основними факторами, що впливають на проведення процесу сушіння проса в сушильному апараті з СВЧ енергопідводом, були обрані: T_e -

температура повітря, що подається в сушарку, K ; $\frac{V_{oc}}{V_{\tau}}$ - відношення швидкості осьового потоку повітря, що подається в сушильну установку до швидкості тангенціального потоку повітря; початкова вологість зерна проса по відношенню до абсолютно сухої речовини W^h , %; $q_{y\delta}$ - потужність підведення СВЧ енергії віднесена до одного кілограму продукту,

завантаженого в сушарку, кВт/кг.

Дані фактори сумісні і некорельовані між собою. Провівши аналіз їх взаємного впливу на процес, можна підібрати оптимальні режими процесу сушіння проса в сушильній установці з закрученими потоками теплоносія і СВЧ енергопідводом. Межі зміни досліджуваних факторів, представлені в табл. 3.1., брали виходячи з технологічної можливості сушильної установки, попереднього експерименту і літературних даних

Таблиця 3.1.

Межі зміни входних факторів

Умови планування	Значення факторів в точках плану			
	Тв, К	$\frac{V_{oc}}{V_{\tau}}$	$W^h_c, \%$	$q_{уд},$ кВт/кг
Основний рівень (0)	325,5	1,5	19,2	0,08
Інтервал варіювання (Δ)	7,5	0,5	2,8	0,06
Верхній рівень (+1)	333,0	2,0	22,0	0,14
Нижній рівень (-1)	318,0	1,0	16,4	0,02

При переході від форми запису входних факторів в натуральній розмірності до їх кодованого вигляду, основні чинники відповідно записувалися через x_1, x_2, x_3 і x_4 . Перерахунок від значень факторів в натуральній розмірності до значення в кодованому вигляді та навпаки здійснювали за такими формулами:

$$x_i = (D - D_0) / l_i; \quad D = x_i l_i + D_0, \quad (3.2)$$

де D - значення фактора в натуральній розмірності;

D_0 - центр експерименту в натуральній розмірності;

l_i інтервал варіювання фактора в натуральній розмірності

x_i - значення фактора в кодованому вигляді.

Температура проса на виході з сушильного апарату і його кінцева вологість змінювалися в межах, відповідно, 330 ... 332 К, 15,6 ... 22,0 %, що

свідчить про протікання процесу сушіння в області стандартних технологічних властивостей продукту.

Ступінь заповнення сушильної камери приймалася постійною величиною, на яку припадало 17,0 %.

Вибір інтервалів зміни факторів обумовлений технологічними особливостями процесу сушіння проса і технічними характеристиками сушильної установки з СВЧ підведенням енергії. Критеріями оцінки впливу різних вхідних факторів на процес сушіння проса були обрані: Y_1 - кінцева вологість зерна проса по відношенню до абсолютно сухої речовини, %; Y_2 - напруга обсягу сушильної камери по випареній волозі, $\text{кг}_{\text{вл}}/(\text{м}^3 \cdot \text{год})$.

Напруга обсягу сушильної камери по кВт/кг є важливим техніко-економічним показником оцінки роботи сушильних установок різних типів [5, 7, 18]. З його допомогою легко визначали продуктивність установки по вологому і сухому продукту.

Величину Y_2 знаходили за формулою

$$Y_2 = \frac{U}{\tau_{\text{ц}} \cdot V} \quad (3.3)$$

де $U = G_1 - G_2$ - маса вологи, що випаровується, кг;

G_1, G - маса однієї партії зерна проса відповідно до і після сушіння, кг;

$\tau_{\text{ц}}$ - тривалість циклу сушіння зерна проса, с;

V - об'єм сушильної камери, м^3 .

Програма досліджень була закладена в матрицю планування експерименту (табл. 3.2).

Для вивчення процесу сушіння зерна проса було застосовано планування експерименту і обраний план Боксу на кубі 2^4 другого порядку, що володіє досить хорошими статистичними характеристиками і включає невелике число експериментальних точок. Порядок проведення дослідів здійснювали відповідно до таблиці випадкових чисел, з метою підвищення чистоти експерименту і виключення впливу неконтрольованих параметрів на результати експериментального дослідження.

Після обробки підсумків експериментальних досліджень використовували наступні статистичні критерії: перевірку однорідності дисперсій критерієм згоди Кохрена, значимість коефіцієнтів рівнянь регресії критерієм Стьюдента, перевірку адекватності рівнянь регресії здійснювали за допомогою критерію Фішера.

Таблиця 3.2.

Матриця планування і результати експериментального дослідження

№ дослідження	Кодовані значення факторів				$Y_1, \%$	$Y_2, \text{кг}_{\text{вп}}/(\text{м}^3 \cdot \text{год})$
	x_1	x_2	x_3	x_4		
1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	10,767	17,230
2	-1	1	1	1	9,347	10,132
3	1	-1	1	1	12,830	18,433
4	-1	-1	1	1	11,132	13,106
5	1	1	-1	1	10,901	13,788
6	1	-1	-1	1	9,517	7,152
7	1	1	-1	1	13,021	14,536
8	-1	-1	-1	1	11,359	9,670
9	1	1	1	-1	9,846	61,258
10	-1	1	1	-1	8,845	56,331
11	-1	-1	-1	-1	11,098	31,598
12	-1	-1	-1	-1	9,818	28,442
13	1	1	-1	-1	9,109	66,302
14	-1	-1	-1	-1	8,143	61,836
15	1	1	-1	-1	10,417	36,186
16	-1	1	1	-1	9,173	33,491
17	1	0	0	0	12,002	36,160

18	-1	0	0	0	9,338	26,368
19	0	1	0	0	8,786	41,011
20	0	-1	0	0	11,880	13,869
21	0	0	1	0	10,421	30,434
22	0	0	-1	0	9,910	32,042
23	0	0	0	1	11,716	31,992
24	0	0	0	-1	8,609	33,856

Статистична обробка експериментальних даних дозволила отримати регресивні рівняння, які адекватно описують процес сушіння в діапазоні досліджуваних факторів:

$$Y_1 = 11,828 + 0,732x_1 - 0,668x_2 + 1,567x_3 - 0,842x_4 - 0,0695x_1x_2 + 0,042x_1x_3 + 0,104x_1x_4 + 0,067x_2x_3 - 0,203x_2x_4 - 1,027x_3x_4 + 0,137x_1^2 + 0,053x_2^2 + 0,304x_3^2 + 0,012x_4^2; \quad (3.4)$$

$$Y_2 = 29,432 + 3,304x_1 + 5,939x_2 - 0,281x_3 - 1,203x_4 + 0,442x_1x_2 + 0,543x_1x_3 + 0,543x_1x_4 - 0,537x_2x_3 - 7,716x_2x_4 + 10,001x_3x_4 + 0,029x_1^2 - 0,926x_2^2 + 0,512x_3^2 - 0,304x_4^2. \quad (3.5)$$

Провівши аналіз рівнянь регресії (3.4) (3.5) дозволяє визначити фактори, які мають найбільший вплив на досліджуваний процес. Ставлення коефіцієнтів, що стоять перед лінійними членами, що показує значимість параметрів, показало, що кінцева вологість зерна проса в найбільшій мірі залежить від початкової вологості вихідного зерна і в найменшій від відношення швидкостей потоків теплоносія, що подається в сушарку при заданих параметрах процесу. Ступінь впливу параметрів відносно один одного $a_3 : a_2 = 2,345$, при цьому негативний знак перед коефіцієнтом при лінійних членах вказує на те, що при збільшенні вхідного параметра значення вихідного параметра зменшується.

На напругу обсягу сушильної установки по випареній волозі найбільший вплив роблять кінетичні особливості закрученого потоку

теплоносія, які оцінюються ставленням швидкостей осьового потоку повітря до тангенціального потоку теплоносія, що подається, а найменше - початкова вологість зерна проса.

Ставлення коефіцієнтів, що стоять перед лінійними членами, що показують ступінь впливу параметрів відносно один одного, виявилися рівними: $a_2: a_3 = 21,135$.

В результаті цього нами була отримана достатньо повна інформація про вплив досліджуваних факторів на процес сушіння і побудована її регресійна математична модель, що дозволяє розрахувати кінцеву вологість висушеного зерна проса і напруга обсягу сушильної камери по випареній волозі всередині обраних інтервалів варіювання вхідних факторів.

3.2.2 Вибір оптимальних рішень задачі сушіння проса в СВЧ апараті з закрученими потоками теплоносія

Для визначення оптимальної області зміни режимних параметрів при проведенні процесу сушіння проса найбільший інтерес представляло дослідження поверхні відгуку по рівняннях (3.4) і (3.5).

В результаті цього сформували завдання оптимізації: забезпечити максимум множини напруги обсягу сушильної камери по випареній волозі при стандартних значеннях кінцевої вологості зерна проса. Загальна математична постановка задачі оптимізації представлена у вигляді моделі, що описується виразом 3.6:

$$\begin{aligned}
 q &= q(y_1, y_2) \xrightarrow{x \in D} \text{opt} \\
 D: y_1(x_1, x_2, x_3, x_4) &\xrightarrow{x \in D} \text{min} \\
 y_2(x_1, x_2, x_3, x_4) &\xrightarrow{x \in D} \text{max} \\
 y_i &\geq 0, i = \overline{1, 2}; \quad x_j \leq [-2; 2], j = \overline{1, 4}
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Як припущення уявімо, що отримані рівняння регресії (3.4) і (3.4) описують деякі поверхні в багатовимірному просторі, а коефіцієнти канонічної форми визначають вигляд цих поверхонь.

Координати центру x_{is} знаходили із системи рівнянь, отриманих в результаті диференціювання рівнянь регресії (3.4) (3.5) по x_1, x_2, x_3 і x_4 і прирівнюючи похідні нулю. Знаючи координати центру x_{is} по рівняннях (3.4) (3.5) визначили відповідні їм значення параметрів оптимізації y_{is} . Чисельні результати обробки представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3.

Координати центру поверхні відгуку

y_i	x_{1s}	x_{2s}	x_{3s}	x_{4s}	y_s
y_1	2,431	11,576	1,520	0,065	19,567
y_2	18,559	9,310	13,884	0,471	161,576

Для знаходження канонічних коефіцієнтів A_i по рівняннях (3.4) і (3.5) становили характеристичний поліном, який прирівнювали до нуля згідно 3.7:

$$\begin{vmatrix} (a_{11}-A) & 0,5a_{12} & 0,5a_{13} & 0,5a_{14} \\ 0,5a_{21} & (a_{22}-A) & 0,5a_{23} & 0,5a_{24} \\ 0,5a_{31} & 0,5a_{32} & (a_{33}-A) & 0,5a_{34} \\ 0,5a_{41} & 0,5a_{42} & 0,5a_{43} & (a_{44}-A) \end{vmatrix} \quad (3.7)$$

де A - канонічний коефіцієнт.

В результаті підстановки значень коефіцієнтів рівнянь регресії (3.4) (3.5) в матрицю і рішення нелінійних рівнянь 4-го ступеня отримували канонічні коефіцієнти. Проведений аналіз отриманих канонічних рівнянь показав, що досліджувані тіла в чотиривимірному просторі відносяться до типу "мінімакса": при русі в напрямку осей, у яких x_i позитивні, від центру оптимізації значення вихідних параметрів збільшуються, а в напрямку осей, для яких x_i негативні зменшуються; так як знаки коефіцієнтів канонічних рівнянь протилежні, то поверхні відгуку представляють собою один або двосмуговий гіперболоїд.

Для виявлення оптимальних режимів застосовували метод «рідж-аналіз», який базується на методі невизначених множників. Для вибору

оптимального режиму за рівняннями регресії (3.4) і (3.5) становили наступну систему рівнянь

$$\begin{cases} (a_{11} - \lambda)x_1 + 0,5a_{12}x_2 + 0,5a_{13}x_3 + 0,5a_{14}x_4 + 0,5a_1 = 0 \\ 0,5a_{21}x_1 + (a_{22} - \lambda)x_2 + 0,5a_{23}x_3 + 0,5a_{24}x_4 + 0,5a_2 = 0 \\ 0,5a_{31}x_1 + 0,5a_{32}x_2 + (a_{33} - \lambda)x_3 + 0,5a_{34}x_4 + 0,5a_3 = 0 \\ 0,5a_{41}x_1 + 0,5a_{42}x_2 + 0,5a_{43}x_3 + (a_{44} - \lambda)x_4 + 0,5a_4 = 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

де λ - невизначений множник Лагранжа.

На величину λ накладається обмеження, яке визначається параметром Хорли.

$$\lambda' = 2(A_{\max} - a_{kk}), \quad (3.9)$$

де A_{\max} - максимальний або мінімальний (в залежності від формулювання завдання) канонічний коефіцієнт;

a_{kk} - коефіцієнт регресії при k квадратичному члені.

В даному випадку допустимі значення лежали в межах:

- для кінцевої вологості зерна проса в перерахунку на абсолютно суху речовину

$$0 < \lambda < 5,0; \quad (3.10)$$

- для напруги обсягу сушильної камери по випареній волозі

$$-5,0 < \lambda < -3,4. \quad (3.11)$$

Переймаючись значеннями з інтервалів (3.10) (3.11), по рівняннях (3.8) обчислювали оптимальні режими процесу сушіння проса у вихровий сушарці з СВЧ енергопідводом для кінцевої вологості зерна проса в перерахунку на абсолютно суху речовину і напруги обсягу сушильної камери по випареній волозі.

Результати розрахунків оптимальних інтервалів зміни напруги обсягу по випареній волозі представлені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4.

Оптимальні значення кінцевої вологості зерна проса в перерахунку на абсолютно суху речовину

λ	x_1	x_2	x_3	x_4	$Y_1, \%$
0,0	2,609	-0,239	1,311	-0,360	11,910
0,5	-0,412	0,268	-0,009	0,657	9,882
1,0	-0,182	0,118	0,024	0,356	10,181
1,5	-0,114	0,04	0,024	0,244	10,294
2,0	-0,083	0,053	0,021	0,186	10,352
2,5	-0,065	0,042	0,018	0,150	10,388
3,0	-0,053	0,034	0,016	0,126	10,412
3,5	-0,045	0,029	0,014	0,108	10,429
4,0	-0,039	0,025	0,013	0,095	10,442
4,5	-0,035	0,022	0,012	0,085	10,452
5,0	-0,031	0,20	0,011	0,076	10,46

При виборі оптимальних значень кінцевої вологості зерна проса необхідно виходити з мінімально допустимих значень при обмеженнях на незалежні змінні згідно (3.6). Для такого режиму $\lambda = 0,5$, тобто $x_1 = 0,412$; $x_2 = 0,268$; $x_3 = 0,009$, $x_4 = 0,657$, або, переходячи від кодованих значень x_i до натуральних, маємо температуру повітря, що подається в сушильну установку $x_1 = 322,41 \text{ K}$; відношення швидкості осьового потоку повітря, що подається в сушильну установку до швидкості тангенціального потоку повітря $x_2 = 1,63$; початкову вологість зерна проса в перерахунку на абсолютно суху речовину $x_3 = 19,17 \%$; питома потужність СВЧ підведення енергії $x_4 = 0,12 \text{ кВт/кг}$.

В цьому випадку кінцева вологість зерна проса в перерахунку на абсолютно суху речовину $Y_1 = 9,882 \%$.

Як видно з табл. 3.4, аналізу підлягає діапазон зміни $[0,5; 5,0]$ в якому

значення параметрів x_i лежали в наступних інтервалах: $x_1 = 322,41 \dots 325,24$ К; $x_2 = 1,51 \dots 1,63$; $x_3 = 19,17 \dots 19,23\%$; $x_4 = 0,08 \dots 0,12$ кВт/кг. При таких значеннях параметрів кінцева вологість зерна проса перебувала в діапазоні $y_1 = 9,882 \dots 10,452$ %. Зазначені інтервали зміни незалежних змінних для параметра оптимізації Y_1 були прийняті за оптимальні.

Результати розрахунків оптимальних інтервалів зміни напруги обсягу сушильної установки по випареній волозі представлені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5.

Оптимальні значення напруги обсягу сушильної установки по випареній волозі

λ	x_1	x_2	x_3	x_4	$Y_2, \text{кг}_{\text{вл}}/(\text{м}^3 \cdot \text{год})$
-5,0	1,267	-0,722	-0,460	1,238	27,703
-4,84	0,417	-0,673	-0,231	0,176	40,081
-4,68	0,478	-0,708	-0,248	0,216	39,629
-4,52	0,536	-0,747	-0,268	0,259	39,056
-4,36	0,601	-0,791	-0,290	0,305	38,333
-4,20	0,676	-0,840	-0,315	0,354	37,424
-4,04	0,760	-0,894	-0,343	0,407	36,284
-3,88	0,858	-0,956	-0,375	0,465	34,852
-3,72	0,969	-1,027	-0,411	0,527	33,053
-3,56	1,099	-1,108	-0,452	0,595	30,783
-3,40	1,250	-1,202	-0,50	0,670	27,906

Як було зазначено раніше, при виборі оптимальних параметрів зміни напруги обсягу сушильної установки по випареній волозі необхідно виходити з їх максимально допустимих значень.

Такими значеннями в даному випадку є $\lambda = 4,84$, тобто $x_1 = 0,427$; $x_2 = 0,673$; $x_3 = 0,231$, $x_4 = 0,176$, або, переходячи від кодованих значень x_i до

натуральних, маємо температуру повітря, що подається в сушильну установку $x_1 = 326,40 \text{ K}$; відношення швидкості осьового потоку повітря, що подається в сушильну установку до швидкості тангенціального потоку повітря $x_2 = 1,16$; початкову вологість зерна проса в перерахунку на абсолютно суху речовину $x_3 = 18,55 \%$; питому потужність підведення СВЧ енергії $x_4 = 0,09 \text{ кВт/кг}$.

У цьому випадку значення напруги обсягу сушильної установки по випареній волозі складуть $y_2 = 40,081 \text{ кг}_{\text{вл}}/(\text{м}^3 \cdot \text{год})$.

В інтервалі зміни $[4,84; 3,88]$ значення незалежних змінних x_i лежали в наступних діапазонах: $x_1 = 328,7 \dots 331,94 \text{ K}$; $x_2 = 1,02 \dots 0,16$; $x_3 = 18,55 \dots 20,50\%$; $x_4 = 0,09 \dots 0,11 \text{ кВт/кг}$.

При таких значеннях параметрів напруга обсягу сушильної установки по випареній волозі становили $y_2 = 34,852 \dots 40,081 \text{ кг}_{\text{вл}}/(\text{м}^3 \cdot \text{год})$.

Зазначені інтервали зміни незалежних змінних для параметра оптимізації Y_2 прийняті оптимальними.

У табл. 3.6 зведені вибрані оптимальні інтервали зміни параметрів x_i для всіх досліджуваних вихідних факторів.

Таблиця 3.6.

Оптимальні інтервали зміни вхідних параметрів і вихідних факторів

у	$x_1, \text{ K}$		x_2		$x_3, \%$		$x_4, \text{ кВт/кг}$	
	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>
Y_1	322,41	325,24	1,51	1,63	19,17	19,23	0,08	0,12
Y_2	326,40	331,94	1,02	1,16	18,55	20,50	0,09	0,11

Згідно з прийнятим критерієм оптимізації (3.5) для формалізації остаточного рішення, спрямованого на вибір оптимальних режимів функціонування сушильного апарату із закрученими потоками теплоносія і СВЧ підведенням енергії, слід вирішити компромісну задачу, накладаючи

оптимальні, виділені в табл. 3.6, інтервали параметрів x_i один на одного.

В області допустимих значень $x \in [-1; 1]$ при накладенні оптимальних інтервалів по кожному y_i для всіх x_i один на одного, бачимо, що виділені для критеріїв Y_1 і Y_2 інтервали зміни x_1 відповідно до табл. 3.6 близькі один до одного. Тому для параметра x_1 - температури повітря, що подається в сушильну установку за оптимальний інтервал можна прийняти інтервал $x_1 = 325,0 \dots 327,0 \text{ K}$.

Аналізуючи область допустимих значень $x \in [-1; 1]$ і, накладаючи оптимальні інтервали по кожному y_i для всіх x_i один на одного, бачимо, що для критеріїв Y_1 і Y_2 інтервал зміни x_3 для критерію Y_1 частково накладається на інтервали x_3 для Y_2 . Тому для параметра x_3 - початкову вологість зерна проса в перерахунку на абсолютно суху речовину за оптимальний інтервал можна прийняти $x_3 = 19,17 \dots 20,51 \%$.

В області допустимих значень $x \in [-1; 1]$ при накладенні оптимальних інтервалів по кожному Y_i для всіх x_i один на одного, бачимо, що інтервал зміни x_4 для критерію Y_2 лежить всередині інтервалів x_4 для Y_1 . Тому для параметра x_4 питомої потужності підведення СВЧ енергії за оптимальний інтервал можна прийняти $x_4 = 0,09 \dots 0,11 \text{ кВт/кг}$.

Параметр x_2 вступає в конфлікт за всіма критеріями оптимізації: Y_1 - кінцевої вологості зерна проса в перерахунку на абсолютно суху речовину і Y_2 - напруги обсягу сушильної камери по випареній волозі.

Розглядаючи тепер область допустимих рішень $x \in [1; +1]$ бачимо, що критерії y_i конфліктують.

Цей конфлікт відображається в певну область в просторі критеріїв $\{y\}$ (рис. 3.2), яке є, так званим, величиною Парето.

Властивості цієї множини залежать від властивостей критеріїв оптимізації та області допустимих рішень D .

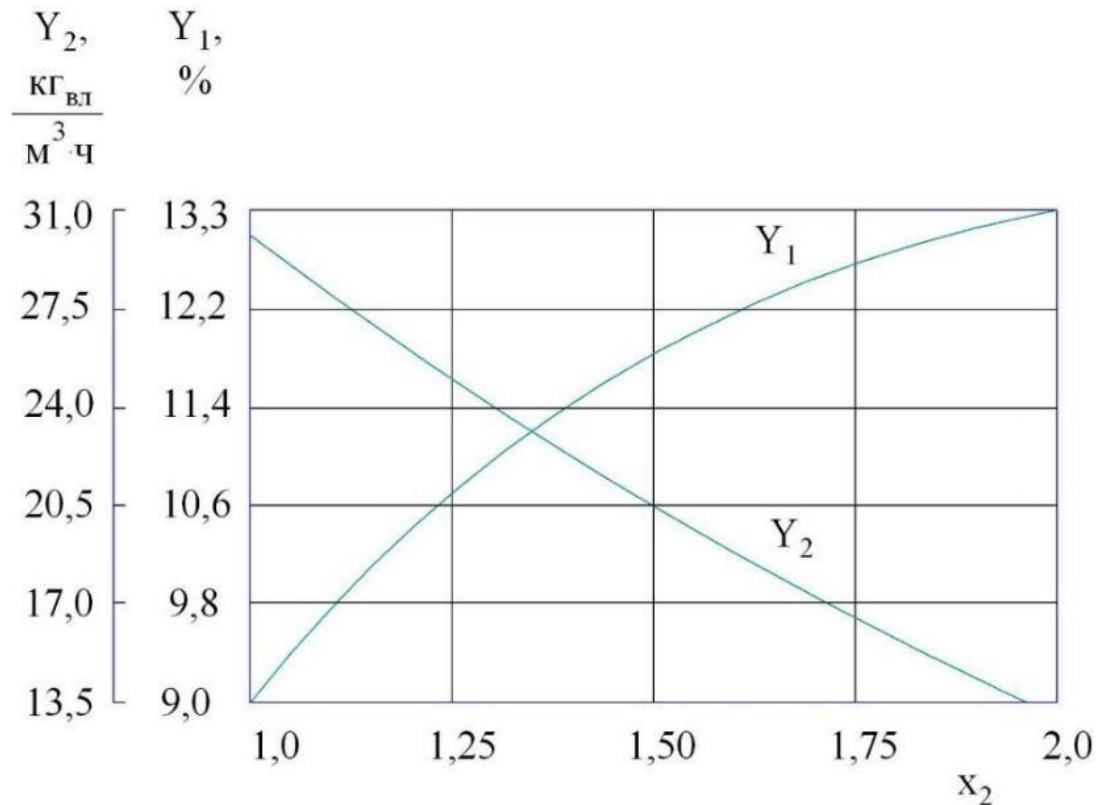


Рис. 3.2. - Поведінка критеріїв оптимізації $Y_1(x_2)$ і $Y_2(x_2)$ X_1 [1; 2]

Позначимо безліч рішень через M_0 . У загальному випадку для векторної оптимізації, що має місце в цьому дослідженні, для вирішення подібних завдань вводиться правило, що дозволяє оцінити рішення - безумовний критерій переваги (БКП). Будемо вважати, що рішення x_2 безумовно краще рішення x_1 (x_2 краще; в сенсі краще), якщо $y_i(x_2) \geq y_i(x_1)$ для всіх i і хоча б одна нерівність суворе. Якщо все $y_i(x_2) = y_i(x_1)$, то рішення $x_2 \sim x_1$ (\sim еквівалентно). Тобто, з усієї множини D допустимих рішень БКП необхідно виділити величину M_0 конфлікуючих між собою, що визначають величину Парето. Іншими словами, оператор БКП реалізує принцип оптимальності по Парето.

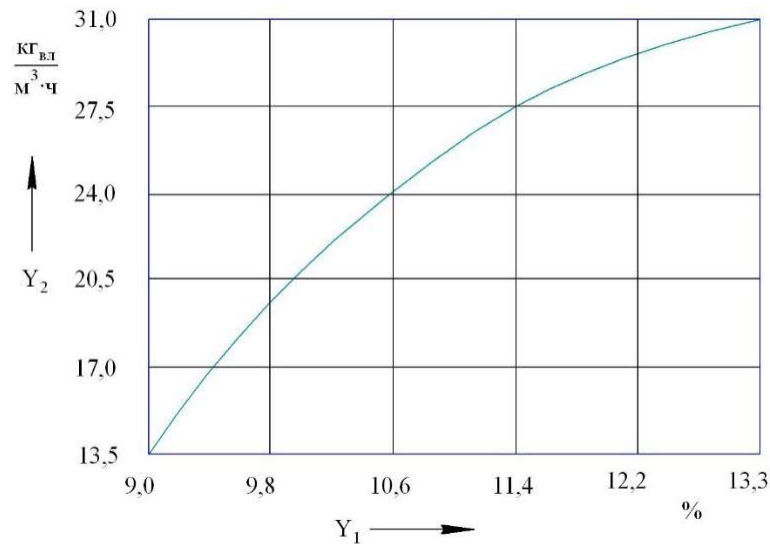


Рис. 3.3. - Величина Парето для простору критеріїв $Y_1(x_2)$ від $Y_2(x_2)$

В окремих випадках для цих цілей використовуються два наступні завдання:

- для опуклих D і опуклих $y_i(x)$, $i = 1, s$

$$\text{Par} = \left\{ y(x^*) : \sum_{i=1}^s \alpha_i y_i(x^*) = \min_{x \in D} \sum_{i=1}^s \alpha_i y_i(x) \right\}, \quad (3.12)$$

- для неопуклих задач

$$\text{Par} = \left\{ y(x^*) \max_i \alpha_i y_i(x^*) = \min_{x \in D} \max_i \alpha_i y_i(x); y_i(x) \rightarrow 0 \right\} \quad (3.13)$$

при всіх

$$\alpha \in A = \left\{ (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_s) : \sum_{i=1}^s \alpha_i = 1, \alpha_i > 0 \right\}, \quad (3.14)$$

де A - інтервал зміни.

Результат у вигляді множини M_0 допускає цілу безліч рішень. Природно припустити, що остаточні рішення слід шукати серед елементів множини M_0 . Тому актуальним завданням є звуження множини M_0 , видача для оцінки фахівцям обмеженого числа рішень. Природно, звуження призводить до втрати інформації про множини M_0 і тільки ціною цих втрат можна його описати. Найбільш простим способом у вирішенні зазначеної проблеми є покриття множини M_0 мережею з деяким кроком по критеріям з

тим, щоб в кожному отриманому розбивкою гіперпаралелепіпедом залишити по одному елементу множини M_0 . Більш загальним є використання алгоритмів розпізнавання образів. Найчастіше для отримання одного конкретного рішення з множини Парето користуються зведенням задачі векторної оптимізації до скалярної оптимізації шляхом виділення одного критерію (головного) і перекладом інших в розряд обмежень або побудови глобального критерію у вигляді згортки цільових критеріїв [6].

У даній роботі застосовувався ваговий метод, ідея якого полягає в синтезі скалярного критерію

$$q(x) = q(q_1, q_2, \dots, q_k), \quad (3.15)$$

як функція вихідних критеріїв, причому мінімум його відповідає рішенню багатокритеріальної задачі. Тоді рішення зводиться до звичайної оптимізації

$$q(x) \xrightarrow{\bar{x} \in D} \min \quad (3.16)$$

Функція $q(x)$ представлена у вигляді згортки критеріїв

$$q(\bar{x}) = \sum_{i=1}^k \alpha_i \frac{q_i(\bar{x}) - q_{i\min}}{q_{i\max} - q_{i\min}}, \quad (3.17)$$

$$(0 \leq \alpha_i \leq 1, \sum_{i=1}^k \alpha_i = 1);$$

де i - вага i -го критерію

$q_{i\max}, q_{i\min}$ - мінімальне і максимальне значення критеріїв якості $q_i(x)$.

Множина Парето в даному випадку було отримано методом ψ - перетворення, шляхом варіювання вагового коефіцієнта α_i в інтервалі $[0; 1]$

$$\left(\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1 \right).$$

В результаті застосування зазначеного методу були отримані субоптимальні інтервали зміни параметра $x_2 = 1,27 \dots 1,55$.

Для підтвердження правильного значення отриманих результатів був поставлений ряд паралельних експериментів, отримані значення потрапляли в розраховані довірчі інтервали за всіма критеріями якості. При цьому

середньоквадратична помилка не перевищувала 7,4 %. Таким чином, рішення задачі з векторним критерієм оптимізації здійснюється в два етапи це виділення області компромісів (рішень, оптимальних за Парето) і подальше її звуження на основі деякої схеми компромісу. Підсумковий вибір рішення здійснювався виходячи з фізичного змісту досліджуваного процесу сушіння в інтервалі оптимальних значень вихідних факторів.

При цьому слід зауважити, що оптимальний режим відповідає фіксованому значенню початкової вологості по відношенню до загальної маси $W_n = 18,5 \%$ з відхиленням $0,5 \%$. Однак в період масового збирання початкова вологість зерна проса змінюється в широких межах. Тому виникає необхідність у вирішенні оптимізаційної задачі, в якій кожної сукупності числових функцій технологічних параметрів однозначно ставляться у відповідність чисельні значення початкової вологості зерна проса при обмеженнях на якісні показники з урахуванням економічних показників процесу.

3.3. Дослідження впливу основних факторів на кінетику процесу сушіння зерна проса в СВЧ апараті з закрученими потоками теплоносія

Зміна середньої температури і вологості продукту з плином часу прийнято вважати кінетикою проведення процесу сушіння. Отримані кінетичні закономірності дозволять провести розрахунок кількості випареної вологи продукту, а також визначить витрату тепла на проведення процесу.

В результаті застосування методу статистичного планування експерименту нами проводилися дослідження кінетики процесу сушіння проса в експериментальній вихровий СВЧ сушарці (рис. 3.1). В результаті отриманих даних було визначено час сушіння проса, відповідне певної вологості W^c зерна проса

3.3.1. Дослідження залежності кінетики процесу сушіння від температури теплоносія

Найбільшою актуальністю при створенні технології сушіння термочутливих продуктів, була задача по встановленню однозначних залежностей між вологістю і температурою матеріалу в процесі видалення вологи. Відмінною особливістю при вивченні кінетики процесу сушіння для багатьох харчових продуктів в залежності від температури є обмеженість температурного інтервалу, в діапазоні якого можна збільшувати тепло- і масоперенесення, в наслідок небезпеки погіршення якості готового продукту в зв'язку з його перегрівом. Тому доводиться враховувати безліч параметрів при виборі максимально допустимих значень температур при проведенні процесу.

Кінетичні закономірності процесу сушіння зерна проса і термограми в залежності від температури представлені на рис. 3.4 і рис. 3.5.

Аналіз отриманих закономірностей свідчить про те, що при сушінні зерна проса відсутній період постійної швидкості сушіння в основній своїй масі, відбувається видалення адсорбційної вологи. Також, можна стверджувати, що температура в обраному діапазоні дослідження 318-333 К надає вплив на процес сушіння пропорційний вплив, і зі збільшенням температури процес сушіння протікає більш інтенсивно.

Термограми процесу сушіння зерна проса показують, що збільшення температури відбувається практично одночасно, а характер кривих по досягненні заданої температури носить лінійний характер, а також набір температури відбувається рівномірно, незалежно від необхідного значення.

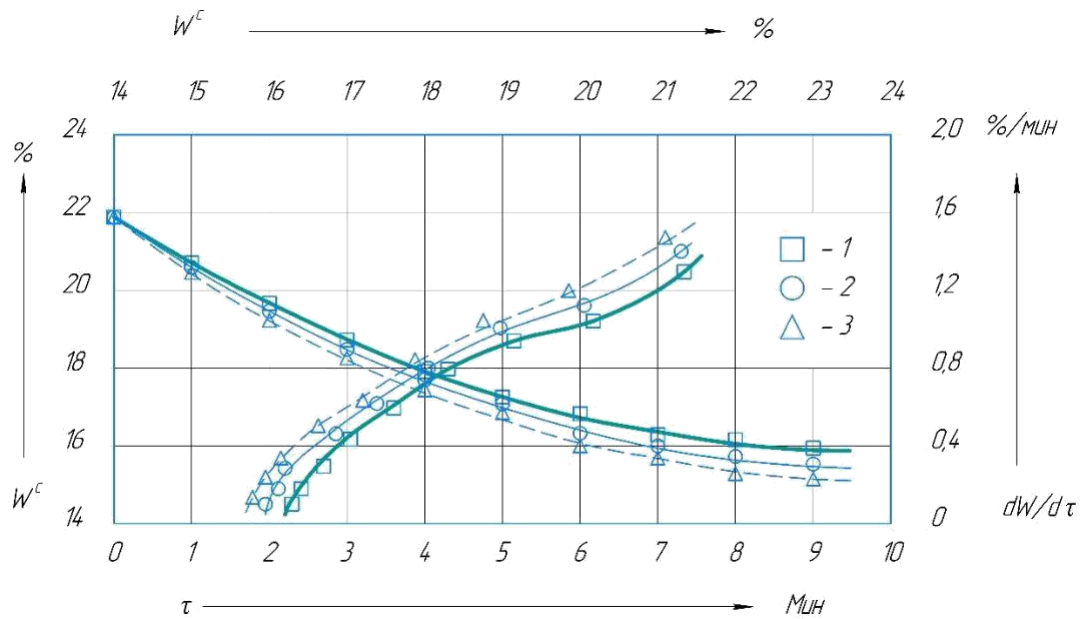


Рис. 3.4. - Криві сушіння і швидкості сушіння зерна проса при $W^c = 22\%$, $V_{oc} / V_{\tau} = 1,5$ та $P_{СВЧ} = 550$ Вт в залежності від температури: 1 - $T = 333$ К; 2 - $T = 325$ К; 3 - $T = 318$ К

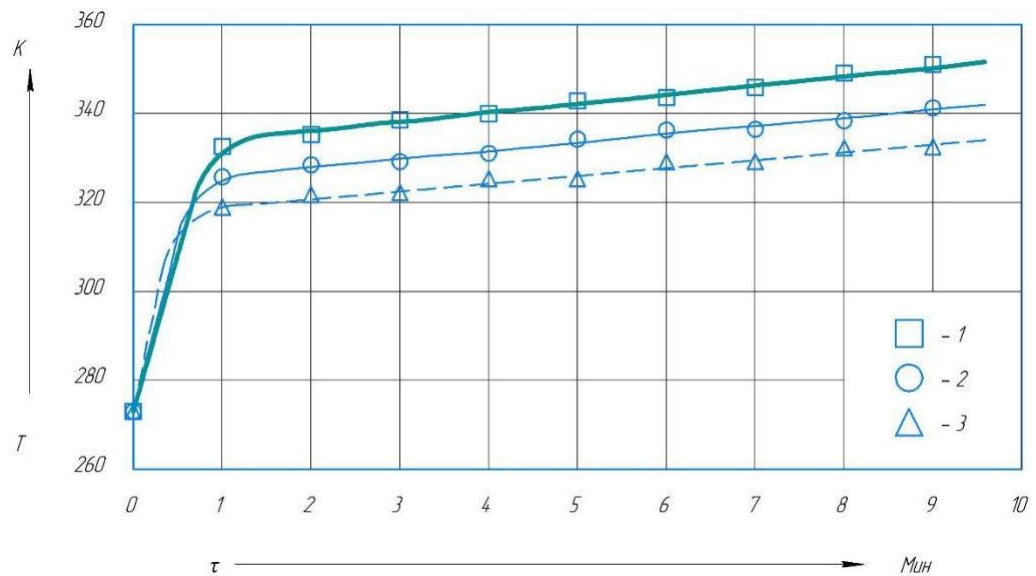


Рис. 3.5. - Термограми зерна проса при $W^c = 22\%$, $V_{oc} / V_{\tau} = 1,5$ і $P_{СВЧ} = 550$ Вт в залежності від температури: 1 - $T = 333$ К; 2 - $T = 325$ К; 3 - $T = 318$ К

Відзначимо, що застосування високих температур при сушінні зерна проса можливе руйнування оболонки внаслідок різкого переходу вологи всередині продукту в газоподібний стан.

3.3.2. Дослідження впливу кінетики на сушіння зерна проса швидкостей осьового і тангенціального потоків теплоносія

Вплив відношення швидкості осьового і тангенціального потоків теплоносія на кінетику процесу сушіння зерна проса представлені на рис. 3.6 і 3.7.

З кривих видно, що співвідношення осьового і тангенціального потоків значно впливає на перебіг процесу. Це виражається в наступному: при відносно $V_{oc}/V_{\tau} = 1$ зерно проса досягає необхідної вологості через 8 хвилин, але при цьому не відбувається віднесення зерна з сушильної камери. При $V_{oc}/V_{\tau} = 2$ спостерігається зворотне явище, тобто відбувається винесення зерна проса з сушильної камери без досягнення необхідної вологості.

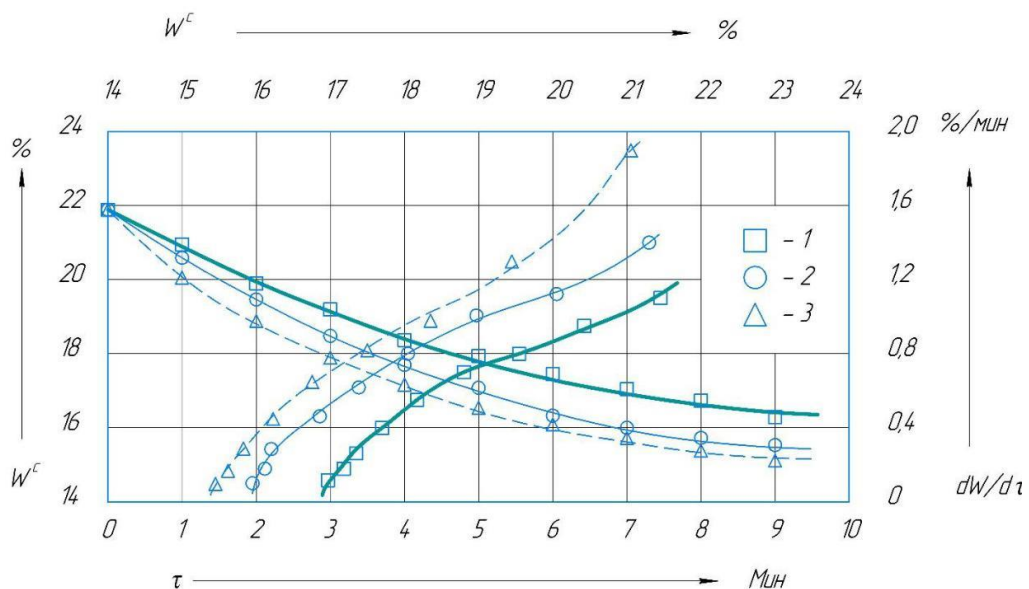


Рис. 3.6. - Криві сушіння і швидкості сушіння зерна проса при $W^c = 22\%$, $T = 325\text{ K}$ і $P_{СВЧ} = 550\text{ Вт}$ в залежності від ставлення осьового і тангенціального потоків теплоносія: 1 - $V_{oc}/V_{\tau} = 1,0$; 2 - $V_{oc}/V_{\tau} = 1,5$; 3 - $V_{oc}/V_{\tau} = 2,0$

Аналізуючи термограми процесу сушіння зерна проса залежно від ставлення осьового і тангенціального потоків теплоносія можна відзначити наступне: при співвідношенні $V_{oc}/V_{\tau} = 2,0$ продукт набирає температуру повільніше, ніж при співвідношенні $V_{oc}/V_{\tau} = 1,0$. Це обумовлюється досить

швидким відведенням тепла від продукту, тому що в першому випадку відведення тепла відбувається більш інтенсивно в зв'язку з більшою швидкістю повітря, ніж у другому випадку.

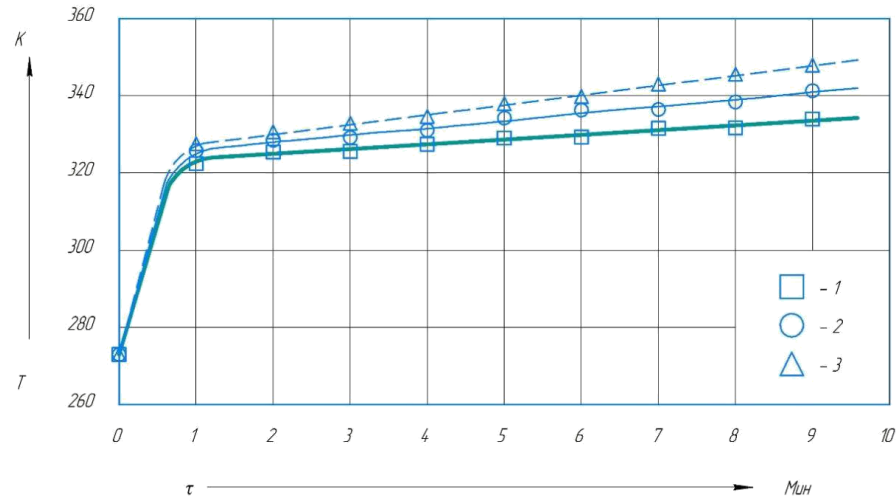


Рис. 3.7. - Термограми зерна проса при $W^c = 22\%$, $T = 325$ К і $P_{СВЧ} = 550$ Вт в залежності від ставлення осьового і тангенціального потоків теплоносія: 1 - $V_{oc}/V_{\tau} = 2,0$; 2 - $V_{oc}/V_{\tau} = 1,5$; 3 - $V_{oc}/V_{\tau} = 1,0$

3.3.3. Дослідження впливу СВЧ-потужності, що підводиться, на процес сушіння

Кінетичні закономірності сушіння зерна проса залежно від СВЧ-потужності, що підводиться, і представлені на рис. 3.8.

З графіків видно, що СВЧ - потужність надає найбільш значний вплив на кінетику сушіння, як і температура теплоносія.

Характерною особливістю впливу СВЧ - енергії від впливу температури теплоносія на матеріал служить те, що СВЧ – потужність, що підводиться, забезпечує швидке перенесення вологи від центру продукту до його поверхні.

Зі зниженням вологості проса відбувається зменшення коефіцієнта діелектричних втрат, що призводить до зниження кількості теплоти, що генерується в продукті, однак відповідно до закону Джоуля-Ленца

ефективність перетворення енергії змінного електромагнітного поля (ЕМП) в тепло пропорційна квадрату напруженості ЕМП, тому збільшення СВЧ – потужності, що підводиться, сприяє збільшенню ККД процесу трансформації СВЧ - енергії.

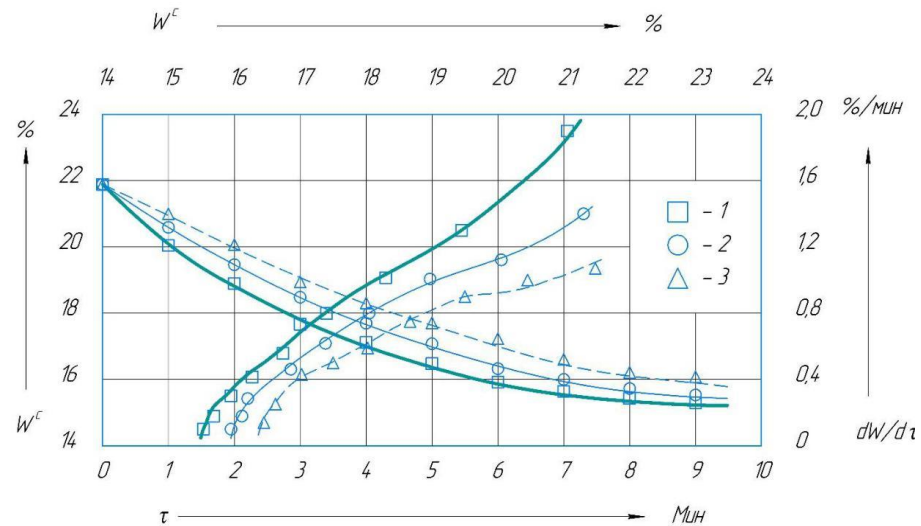


Рис. 3.8. - Криві сушіння і швидкості сушіння зерна проса при $W^c = 22\%$, $T = 325\text{ K}$ і $V_{oc}/V_\tau = 1,5$ в залежності від СВЧ потужності: 1 - $P_{СВЧ} = 1000\text{ Вт}$; 2 - $P_{СВЧ} = 550\text{ Вт}$; 3 - $P_{СВЧ} = 150\text{ Вт}$

Термограма процесу представлена на рис. 3.9.

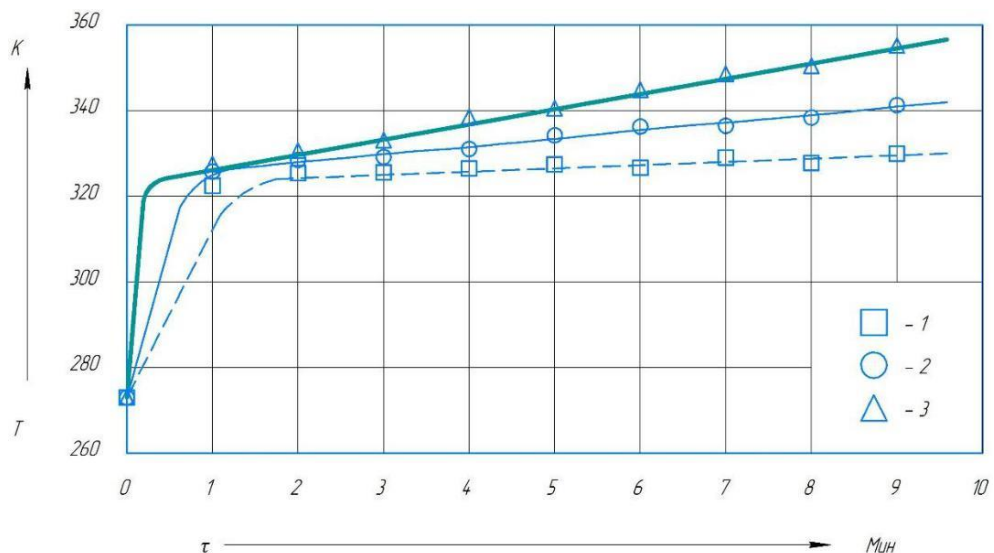


Рис. 3.9. - Термограми зерна проса при $W^c = 22\%$, $T = 325\text{ K}$ і $V_{oc}/V_\tau = 1,5$ в залежності від СВЧ потужності: 1 - $P_{СВЧ} = 1000\text{ Вт}$; 2 - $P_{СВЧ} = 550\text{ Вт}$; 3 - $P_{СВЧ} = 150\text{ Вт}$

Слід зазначити, що при підвищенні потужності СВЧ відбувається більш інтенсивний набір температури продукту, що при її істотному підвищенні можливий перегрів продукту.

РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА У СВЧ-АПАРАТІ З ЗАКРУЧЕНИМИ ПОТОКАМИ ТЕПЛОНОСІЯ

4.1. Математична модель

Процес СВЧ-сушіння зерна проса у зважено-закрученому шарі є надзвичайно складним з точки зору фізико-математичного опису. Модель повинна відтворювати механічний рух двох різних середовищ (газоподібне середовище - теплоносій і сипуче середовище - зерна проса), взаємодія середовищ один з одним і з робочими поверхнями сушильної камери, тепло- і масообмінні процеси в насінні проса.

У багатьох відомих моделях аналогічних процесів сушіння використовують суттєві спрощення (сферична або циліндрична симетрія, зведення до процесів тільки в одному плоді) [12, 13]. Однак, спираючись на можливості сучасної обчислювальної техніки з'являється можливість створити комплексну високоадекватну модель процесу.

В результаті цього в нашій роботі поставлена задача розробити математичну модель процесу СВЧ-сушіння зерен проса у зважено-закрученому шарі, що володіє високою деталізацією і високою адекватністю, що базується на класичних методах моделювання і фізико-математичного опису, але використовує в повній мірі обчислювальні можливості сучасних комп'ютерів [3].

Модель, що розробляється повинна описувати цілий ряд фізичних процесів, що протікають при СВЧ сушці зерна проса у зважено-закрученому шарі:

- механічна поведінка теплоносія в сушильній камері;
- механічна поведінка системи зерен проса, як сипучого середовища;
- внутрішній тепло- і волого обмін всередині зерна проса.
- тепло- і волого обмін з теплоносієм і сусідніми зернами проса.

Кожен процес в запропонованій моделі описується відповідними диференціальними рівняннями і алгебраїчними залежностями.

4.1.1. Опис в моделі зерен проса

Кількість зерна проса, що одночасно знаходяться в сушильній камері становить близько 104. Для моделювання механічної поведінки системи зерен проса, як сипучого середовища, використовується метод динаміки частинок, який в останні десятиліття широко застосовується в різних напрямках наукової та технічної думки [26]. Метод полягає у вирішенні рівнянь руху безлічі окремих сферично-симетричних частинок (зерен проса), які відчувають силовий вплив з боку сусідніх частинок, потоку теплоносія, стінок сушильної камери (рис. 4.1).

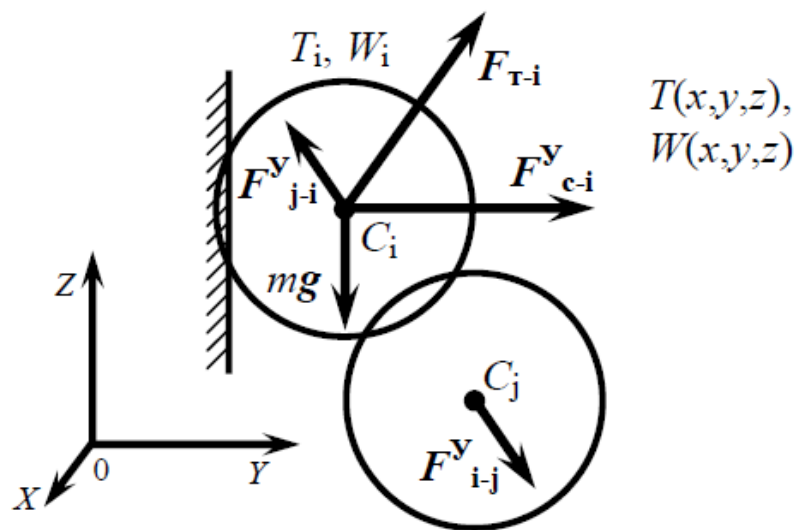


Рис. 4.1. - Сили, що діють на зерно проса в сушильній камері

Рівняння руху зерен проса складаються на основі другого закону Ньютона:

$$\left\{ \begin{array}{l}
m_c \frac{d^2 x_i}{dt^2} = k_m (v_{xm}(x_i, y_i, z_i) - v_{xi}) + \begin{cases} c_{\Pi} \left(\frac{d_c}{2} - r_{i-\Pi} \right) \frac{(x_i - x_{i-\Pi})}{r_{i-\Pi}} + k_{\Pi} \left(r_{i-\Pi} - \frac{d_c}{2} \right) v_{xi}, & r_{i-\Pi} < \frac{d_c}{2}; \\
0, & r_{i-\Pi} \geq \frac{d_c}{2}; \end{cases} + \\
+ \sum_{j=i}^{N_c} \left(\begin{cases} c(d_c - r_{ij}) \frac{(x_i - x_j)}{r_{ij}} + k_s (r_{ij} - d_c) (v_{xi} - v_{xj}), & r_{ij} < d_c; \\
0, & r_{ij} \geq d_c; \end{cases} \right); \\
m_c \frac{d^2 y_i}{dt^2} = k_m (v_{ym}(x_i, y_i, z_i) - v_{yi}) + \begin{cases} c_{\Pi} \left(\frac{d_c}{2} - r_{i-\Pi} \right) \frac{(y_i - y_{i-\Pi})}{r_{i-\Pi}} + k_{\Pi} \left(r_{i-\Pi} - \frac{d_c}{2} \right) v_{yi}, & r_{i-\Pi} < \frac{d_c}{2}; \\
0, & r_{i-\Pi} \geq \frac{d_c}{2}; \end{cases} + \\
+ \sum_{j=i}^{N_c} \left(\begin{cases} c(d_c - r_{ij}) \frac{(y_i - y_j)}{r_{ij}} + k_s (r_{ij} - d_c) (v_{yi} - v_{yj}), & r_{ij} < d_c; \\
0, & r_{ij} \geq d_c; \end{cases} \right); \\
m_c \frac{d^2 z_i}{dt^2} = k_m (v_{zm}(x_i, y_i, z_i) - v_{zi}) + \begin{cases} c_{\Pi} \left(\frac{d_c}{2} - r_{i-\Pi} \right) \frac{(z_i - z_{i-\Pi})}{r_{i-\Pi}} + k_{\Pi} \left(r_{i-\Pi} - \frac{d_c}{2} \right) v_{zi}, & r_{i-\Pi} < \frac{d_c}{2}; \\
0, & r_{i-\Pi} \geq \frac{d_c}{2}; \end{cases} + \\
+ \sum_{j=i}^{N_c} \left(\begin{cases} c(d_c - r_{ij}) \frac{(z_i - z_j)}{r_{ij}} + k_s (r_{ij} - d_c) (v_{zi} - v_{zj}), & r_{ij} < d_c; \\
0, & r_{ij} \geq d_c; \end{cases} \right) - m_c g,
\end{array} \right. \quad (4.1)$$

де i - номер зерна;

m_c і d_c - маса і діаметр i -го зерна;

x_i, y_i, z_i - декартові координати зерна;

t - час;

k_m - коефіцієнт лінійного в'язкого тертя при русі насіння в потоці теплоносія;

v_{xm}, v_{ym}, v_{zm} - компоненти вектора швидкості теплоносія в місці знаходження i -го насіння;

c і k_s - коефіцієнти жорсткості і в'язкості взаємодії зерен з поверхнею сушильної камери;

N_c - кількість зерен;

j - номер зерна, можливо контактує з i -м насінням;

c і k_s - коефіцієнти жорсткості і в'язкості взаємодії зерен між собою;

$r_{i-\Pi}$ - відстань від центру i -го зерна до поверхні сушильної камери;

x_{i-P} , y_{i-P} , z_{i-P} - декартові координати точки дотику зерна поверхні сушильної камери;

r_{ij} - відстань між центрами зерен i і j ;

v_{xi} , v_{yi} , v_{zi} - декартові складові швидкості i -го насіння;

g - прискорення вільного падіння.

Відстань r_{ij} між центрами зерен розраховується на кожному кроці інтегрування через координати центрів по теоремі Піфагора:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}.$$

Рівняння (4.1) є диференціальне рівняння другого порядку і вирішуються в процесі моделювання чисельним методом - методом Рунге-Кутта другого порядку [28]:

$$\begin{aligned} x_i^{\tau+1} &= x_i^{\tau} + v_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{xi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; & v_{xi}^{\tau+1} &= v_{xi}^{\tau} + a_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t; \\ y_i^{\tau+1} &= y_i^{\tau} + v_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{yi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; & v_{yi}^{\tau+1} &= v_{yi}^{\tau} + a_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t; \\ z_i^{\tau+1} &= z_i^{\tau} + v_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{zi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; & v_{zi}^{\tau+1} &= v_{zi}^{\tau} + a_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t, \end{aligned} \quad (4.2)$$

де i - номер насіння проса;

τ і $\tau + 1$ - індекси поточного і наступного тимчасового кроку;

t - крок інтегрування за часом;

(x_i, y_i, z_i) , (v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}) і (a_{xi}, a_{yi}, a_{zi}) - положення, швидкість, прискорення насіння.

4.1.2. Опис в моделі теплоносія

Теплоносій в рамках запропонованої моделі вважається суцільним середовищем, сильно стискаючою, і яка має внутрішньої в'язкістю. В цьому випадку, базовими рівняннями, що описують механічну поведінку середовища, є рівняння Нав'є Стокса, які в тривимірному випадку можна записати в такий спосіб [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{\partial v_x}{\partial t} = -v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} + F_x - \frac{\alpha}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \\
 + \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial x \partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right); \\
 \frac{\partial v_y}{\partial t} = -v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} + F_y - \frac{\alpha}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \\
 + \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial y} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y \partial z} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right); \\
 \frac{\partial v_z}{\partial t} = -v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} - v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} - v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + F_z - \frac{\alpha}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z} + \\
 + \frac{\lambda}{\rho} \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right); \\
 \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} - v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} - v_z \frac{\partial \rho}{\partial z},
 \end{array} \right. \quad (4.3)$$

де v_x , v_y , v_z - компоненти вектора швидкості середовища в обраній точці;

t - час;

F_x , F_y , F_z - компоненти вектора масової щільності об'ємних сил, що діють на суцільне середовище (сила в розрахунку на одиницю маси);

α - коефіцієнт пропорційності щільності теплоносія і тиску (в наближенні про лінійної їх зв'язку);

ρ - щільність теплоносія на потрібній точці;

λ - коефіцієнт стисливості середовища;

μ - коефіцієнт внутрішнього тертя.

Оскільки рівняння Нав'є Стокса для складних систем не можуть бути виражені аналітично, з цієї причини безпосередньо будемо орієнтуватися на їх чисельне рішення із застосуванням методу дискретизації простору і кінечно-разносних схем [9, 31]. Поставлену задачу будемо вирішувати в тривимірному просторі XYZ . Для чисельного рішення рівнянь Нав'є Стокса

область моделювання, що охоплює сушильну камеру дискретизуємо кубічною сіткою. Область моделювання містить 20 x 20 x 20 осередків з розміром осередку d (рис. 4.2).

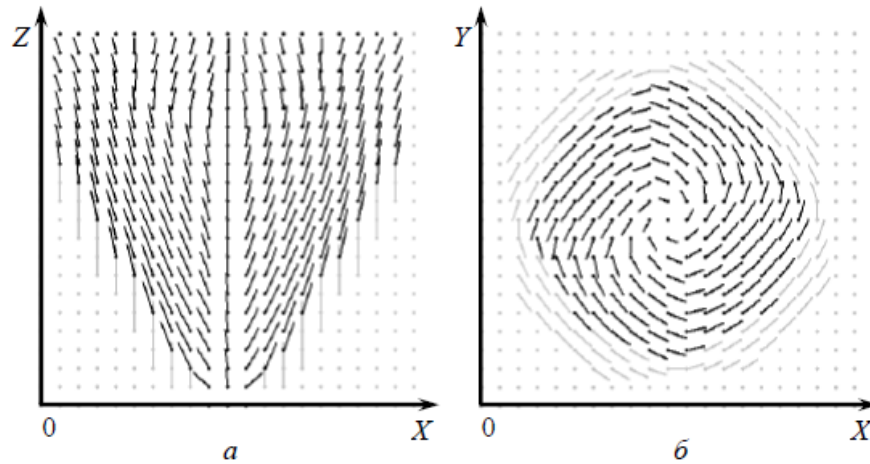


Рис. 4.2. - Поля швидкостей руху теплоносія в сушильній камері у вертикальному осьовому зрізі (*a*) і в поперечному зрізі на середині висоти камери (*б*). Чорними точками представлена внутрішня область сушильної камери, сірими точками - область поза сушильної камери

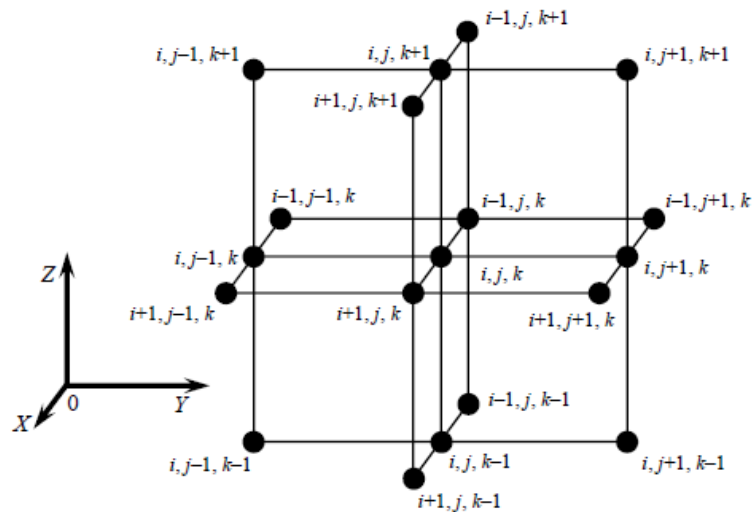


Рис. 4.3. - Індексація вузлів, що оточують базовий вузол (i, j, k) , які використовуються для чисельного визначення перших і других похідних при сітковому вирішенні рівнянь Нав'є Стокса

Під час чисельного рішення рівнянь Нав'є Стокса на квадратній сітці

необхідно для кожного вузла (i, j, k) потрібно виявити перші і другі приватні похідні по кожній з координат x, y, z . Для визначення похідних потрібно застосовувати значення функцій $v_x(i, j, k)$, $v_y(i, j, k)$, $v_z(i, j, k)$ і $\rho(i, j, k)$ в шістнадцяти вузлах, що оточують вузол (i, j, k) (рис. 4.3).

Не розписуючи всю систему (4.1) в конічно-разносній формі, уявімо на окремих прикладах, як обчислюються перші і другі похідні:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \approx \frac{\rho^{\tau+1} - \rho^{\tau}}{\Delta t}; \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} \approx \frac{\rho_{i+1,j,k} - \rho_{i-1,j,k}}{2d}; \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} \approx \frac{v_{x,j+1,j,k} + 2v_{x,j,j,k} - v_{x,j-1,j,k}}{d^2}; \quad (4.6)$$

$$\frac{\partial^2 v_x}{\partial x \partial y} \approx \frac{v_{x,j+1,j+1,k} - v_{x,j+1,j-1,k} - v_{x,j-1,j+1,k} + v_{x,j-1,j-1,k}}{4d^2}, \quad (4.7)$$

де знак \approx означає заміну похідною в рівняннях Нав'є-Стокса чисельної оцінкою похідною;

τ і $\tau + 1$ - поточний і наступний кроки інтегрування за часом;

t - величина кроку інтегрування за часом;

d - розмір осередку сітки дискретизації простору.

4.1.3. Опис в моделі основних процесів тепло- і вологоперенесення і СВЧ-нагрівання

Для опису процесів тепло- і масоперенесення всередині насіння проса під дією комбінованого нагріву (конвективного і СВЧ) використовується математичний апарат, розроблений в [29].

Використовується припущення про сферичності насіння проса, про симетричність щодо центру насіння вологовміту і температури, нехтуємо малими градієнтами тиску пара в насінні. Тоді можна записати наступні диференціальні рівняння тепло- і вологоперенесення з початковими ($t = 0$) і

граничними ($R = 0$; $R = R_c$) умовами (завдання Коші):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial W}{\partial t} = A_{1.1} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial W}{\partial R} \right) + A_{1.2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \right); \\ \frac{\partial T}{\partial t} = A_{2.1} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial W}{\partial R} \right) + A_{2.2} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial R^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{q}{c\rho}; \\ W(t=0, R) = W_0; \\ T(t=0, R) = T_0; \\ \lambda_m \frac{\partial W}{\partial R} \Big|_{R=R_c} = -a_m (W(t, R=R_c) - W_{TH}); \\ \lambda_q \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=R_c} = -a_q (T(t, R=R_c) - T_{TH}); \\ \frac{\partial W}{\partial R} \Big|_{R=0} = 0; \\ \frac{\partial T}{\partial R} \Big|_{R=0} = 0, \end{array} \right. \quad (4.8)$$

де W і T - вміст води і температура в даній точці насіння проса;

t - час; вираження в дужках - оператор Лапласа для центрально-симетричної задачі;

R - відстань від центру насіння;

R_c - радіус насіння проса;

$A_{1.1}$, $A_{1.2}$, $A_{2.1}$, $A_{2.2}$ - коефіцієнти перенесення, які виражаються через параметри насіння проса наступним чином: $A_{11} = a_m$; $A_{12} = a_m \delta$; $A_{21} = r\varepsilon/c$ · a_m ;

a_m - коефіцієнт дифузії води всередині насіння, в загальному випадку, як і інші перераховані далі параметри, що залежить від розташування точки відносно центру насіння;

δ - коефіцієнт термодифузії (відносний);

r - питома теплота конденсації пари;

$\varepsilon = a_{m1}/a_m$ - відносний коефіцієнт дифузії пари;

a_{m1} - коефіцієнт дифузії пари всередині насіння;

c - теплоємність насіння;

a_q - коефіцієнт температуропровідності;
 q - об'ємна інтенсивність теплових джерел;
 W_0 і T_0 - початкова вологість і температура зерна проса;
 λ і λ_q - коефіцієнти вологопровідності і теплопровідності насіння проса;
 W_{TH} і T_{TH} - вологість і температура теплоносія на межі з насінням, в загальному випадку залежать від положення насіння в просторі і від часу.

Рішення системи диференціальних рівнянь (4.8) дозволяє для кожного насіння проса отримати залежності вмісту води $W_i(t, R)$ і температури $T_i(t, R)$ від часу t і від відстані від центру R . Для того, щоб отримати універсальне і гнучке рішення задачі Коші далі використовуються чисельні, а не аналітичні методи. Система рівнянь (4.8) вирішується на дискретній сітці «час» «радіус». Крок за часом становить $\Delta t = 0,01$ с, крок по радіальній координаті $\Delta R = 0,01$ мм.

У сітчастій формі диференціальні рівняння разом з початковими і граничними умовами набувають такий вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{W_{k,i+1} - W_{k,i}}{\Delta t} = A_{1,1} \left(\frac{W_{k,i+1} - 2W_{k,i} + W_{k,i-1}}{(\Delta R)^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{W_{k,i+1} - W_{k,i-1}}{2\Delta R} \right) + \\
 + A_{1,2} \left(\frac{T_{k,i+1} - 2T_{k,i} + T_{k,i-1}}{(\Delta R)^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{T_{k,i+1} - T_{k,i-1}}{2\Delta R} \right); \\
 \frac{T_{k,i+1} - T_{k,i}}{\Delta t} = A_{2,1} \left(\frac{W_{k,i+1} - 2W_{k,i} + W_{k,i-1}}{(\Delta R)^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{W_{k,i+1} - W_{k,i-1}}{2\Delta R} \right) + \\
 + A_{2,2} \left(\frac{T_{k,i+1} - 2T_{k,i} + T_{k,i-1}}{(\Delta R)^2} + \frac{2}{R} \cdot \frac{T_{k,i+1} - T_{k,i-1}}{2\Delta R} \right) + \frac{q}{c\rho}; \\
 W_{0,i} = W_0; \\
 T_{0,i} = T_0; \\
 \lambda_m \frac{W_{k,i_c} - W_{k,i_c-1}}{\Delta R} = -a_m (W_{k,i_c} - W_{TH}); \\
 \lambda_q \frac{T_{k,i_c} - T_{k,i_c-1}}{\Delta R} = -a_q (T_{k,i_c} - T_{TH}); \\
 \frac{W_{k,1} - W_{k,0}}{\Delta R} = 0; \\
 \frac{T_{k,1} - T_{k,0}}{\Delta R} = 0,
 \end{array} \right. \quad (4.9)$$

де k - номер кроку за часом (індекс вузла сітки в напрямку «час»);

i - номер кроку по радіальній координаті R (індекс вузла сітки в напрямку «радіус»);

$i_c = [R_c / \Delta R]$ - індекс, що відповідає радіусу насіння (квадратні дужки означають виділення цілої частини числа).

Розписавши завдання Коші в стчастій формі, отримуємо ітераційні формули, які дозволяють обчислити значення функцій W і T на наступних кроках за часом $k + 1$ і координаті $i + 1$ за відомими значеннями на поточному кроці (k, i) і попередньому кроці $(k-1, i-1)$.

Після ітераційного рішення і заповнення таблиць W_k, i, T_k, i можна визначити середню вологість W_{cp} і температуру T_{cp} насіння проса в будь-який момент часу шляхом чисельного інтегрування функцій по радіальній координаті:

$$W_{cp} = \frac{3\Delta R}{2R_c^3} \sum_{i=0}^{i_c-1} (W_{k,i} R_i^2 + W_{k,i+1} R_{i+1}^2) \quad (4.10)$$

$$T_{cp} = \frac{3\Delta R}{2R_c^3} \sum_{i=0}^{i_c-1} (T_{k,i} R_i^2 + T_{k,i+1} R_{i+1}^2) \quad (4.11)$$

Так як моделюється сушка не одного, а безлічі зерен проса, диференціальні рівняння сушіння (2.7) вирішуються для кожного насіння. Це вимагає великого обсягу обчислень, і відповідно тривалого розрахунку на комп'ютері (близько години на комп'ютері з середніми параметрами для 2019 р) проте дозволяє отримати високодеталізовану і високоадекватну модель процесу сушіння і руху системи зерен в розробленому апараті.

Щоб забезпечити узгодження трьох підсистем моделі (тепло-масообмінна, механічна, аеродинамічна), крок інтегрування за часом $t = 0,01$ с обраний одним і тим же для чисельного інтегрування всіх систем диференціальних рівнянь: тепло-масообмінних, механічних, аеродинамічних.

У моделі прийнято, що СВЧ-випромінювання, що підводиться у вигляді потужності P , перерозподіляється в системі зерен проса пропорційно

їх вологості W_i :

$$P_i = P_c \frac{W_i}{\sum_{i=1}^{N_c} W_i} \quad (4.12)$$

де P_i - потужність, що підводиться до i -го насіння проса;

c_i - питома теплоємність насіння проса;

P_c - загальна потужність СВЧ-випромінювання, що витрачається на нагрів зерен.

4.2. Вплив параметрів процесу сушіння на її ефективність

Для обґрунтування оптимальних параметрів процесу сушіння зерна проса необхідно виявити взаємозв'язок комплексу процесів, що протікають:

- тепло- і вологоперенесення;
- аеродинамічного руху потоків теплоносія;
- механічного руху системи зерен в потоках теплоносія із взаємодією зерен між собою і стінками сушильної камери;
- впливу СВЧ-випромінювання.

Перш за все розглянемо кінетику сушіння з найбільш типовими технологічними параметрами. Потім вивчимо вплив на ефективність сушіння основних технологічних параметрів

4.2.1 Кінетика СВЧ-сушіння зерна проса

Крива сушіння $W(t)$ в цілому має експонентний вигляд (рис. 4.6, а). Відхилення від експоненціального закону спостерігається в інтервалі часу 2 ... 6 хвилин і відбувається завдяки додатковому нагріванню зерна СВЧ випромінюванням. Завдяки СВЧ нагріванню температура зерна швидко підвищується до максимально допустимої (350 К, рис. 4.4, в), що дозволяє швидко довести влагообменін до максимально ефективного рівня. Після

цього температура зерна поступово знижується, так як втрачаючи вологість насіння менше нагрівається під дією СВЧ-випромінювання, а відведення температури потоком теплоносія залишається на колишньому рівні (рис. 4.4, в).

Тому використання СВЧ нагрівання дозволяє змінити експонентний характер кривої сушіння до лінійного в діапазоні 0 ... 5 хвилин, що забезпечує прискорення сушіння і кращу керованість процесу. В інтервалі часу 5 ... 8 хвилин відбувається остаточна сушка зерна з 16 % до 15,5 % по практично експоненціальним законом (рисунк 4.4, а).

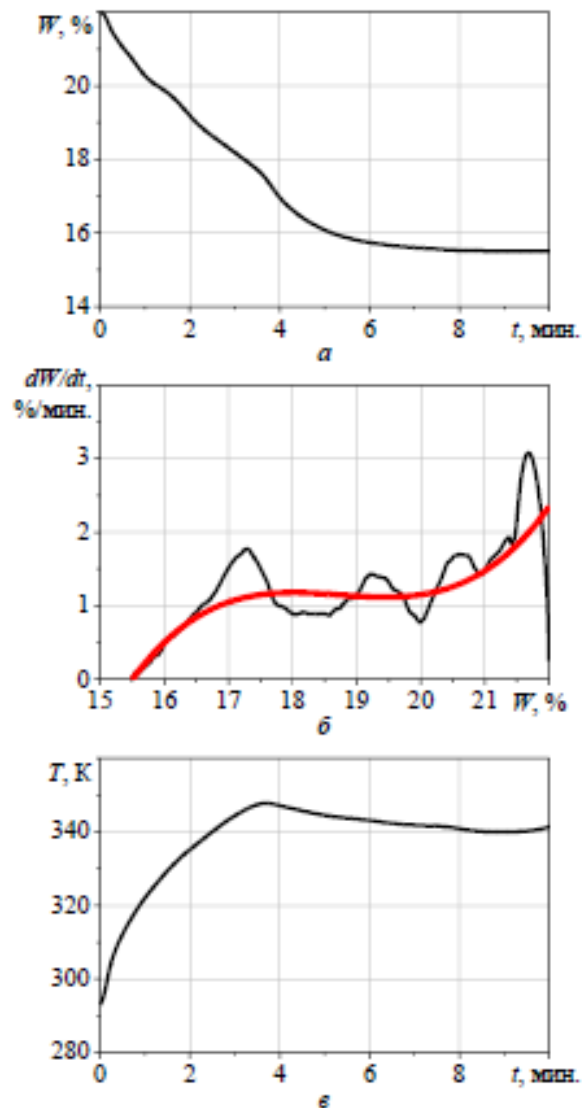


Рис. 4.4. - Зміна в процесі сушіння проса: а - вологості; б - швидкості сушіння; в - температури

Графік залежності швидкості сушіння dW/dt від вологості W має характерний для таких процесів S - подібний вид (рис. 4.4, б). Через те, що даний процес сушіння складається з безлічі окремих взаємопов'язаних процесів, залежність dW/dt (W) має кілька максимумів і мінімумів (рис. 4.4, б, чорна крива), проте усереднена (шляхом варіювання технологічних параметрів) залежність має плавний S - подібний вид (рис. 4.4, б, світла крива).

4.2.2. Вплив потужності СВЧ-випромінювання на ефективність процесу сушіння

Додаткове нагрівання зерна проса за допомогою СВЧ-випромінювання дозволяє швидше підвищити температуру зерен, і тим самим знизити час сушіння. Крім того, можна знизити енергетичні витрати шляхом зниження температури теплоносія і прогріву зерна до необхідної температури СВЧ випромінюванням. З іншого боку, через використання СВЧ-випромінювання насіння можуть нагріватися до несприятливої температури вище 60 ... 80 °С, при якому втрачається частина їх важливих харчових властивостей.

Для вивчення впливу потужності СВЧ-випромінювання на ефективність процесу сушіння проведена серія комп'ютерних експериментів з розробленою моделлю сушіння. У серії з п'яти експериментів питома потужність СВЧ становила 0,6, 0,9, 1,1, 1,3, 1,6 кВт/кг.

Виявлено, що зі збільшенням потужності СВЧ-випромінювання крива сушіння набуває все більш виражений лінійний характер. Якщо у відсутності, або при слабкому СВЧ нагріванні, сушка відбувається по практично експоненціальним законом, то при сильному СВЧ нагріванні крива сушіння стає практично лінійною: вологість зменшується з 22 до 16% практично лінійно протягом інтервалу часу 4,5 хвилин.

Однак графік залежності температури зерна від часу T (t) показує, що

при високій потужності СВЧ-випромінювання відбувається нагрівання зерна до несприятливої температури: до 363 К при питомій потужності 1,6 кВт/кг. При цьому, з огляду на широкий розкид зерен по температурі близько 30 % зерен виявляться нагріті до температури 370 ... 380 К.

Тому існує певний оптимальний діапазон потужності СВЧ-випромінювання, який інтенсифікує процес сушіння, але не викликає перегрівання зерен. Оптимальний діапазон P_{yd} визначено за графіками впливу P_{yd} на час сушіння t_c і максимальну температуру в процесі сушіння T_m .

Поставивши собі за граничним значенням часу сушіння 9 хвилин, за графіком $t_c(P_{yd})$ можна встановити, що при потужності СВЧ-випромінювання вище 0,83 кВт / кг час сушіння буде становити менше 9 хвилин. Поставивши собі за граничним значенням 350 К максимально допустимої температури зерен, за графіком $T_m(P_{yd})$ можна встановити, що при потужності менш 1,16 кВт/кг температура зерен не перевищує 350 К.

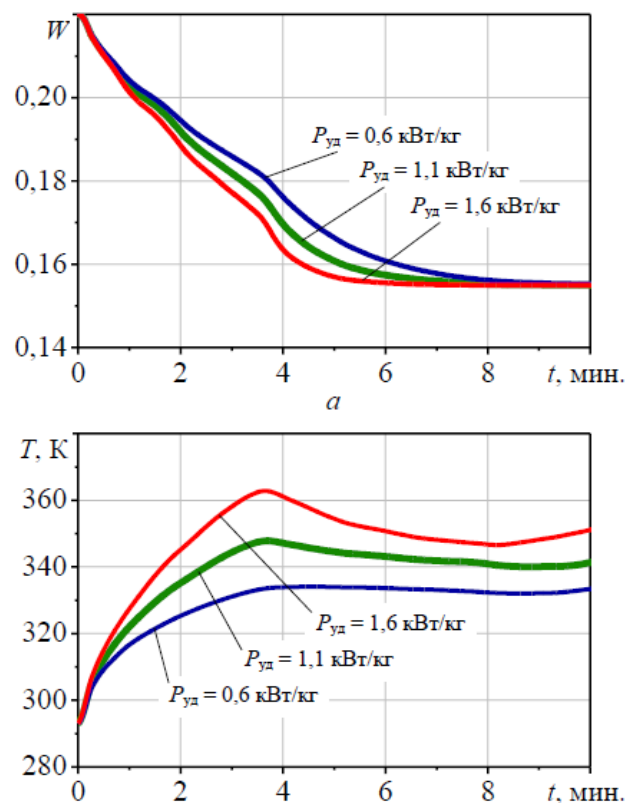


Рис. 4.5. - Зміна в процесі сушіння проса вологості (а) і температури (б) при різній потужності СВЧ-випромінювання P_{yd}

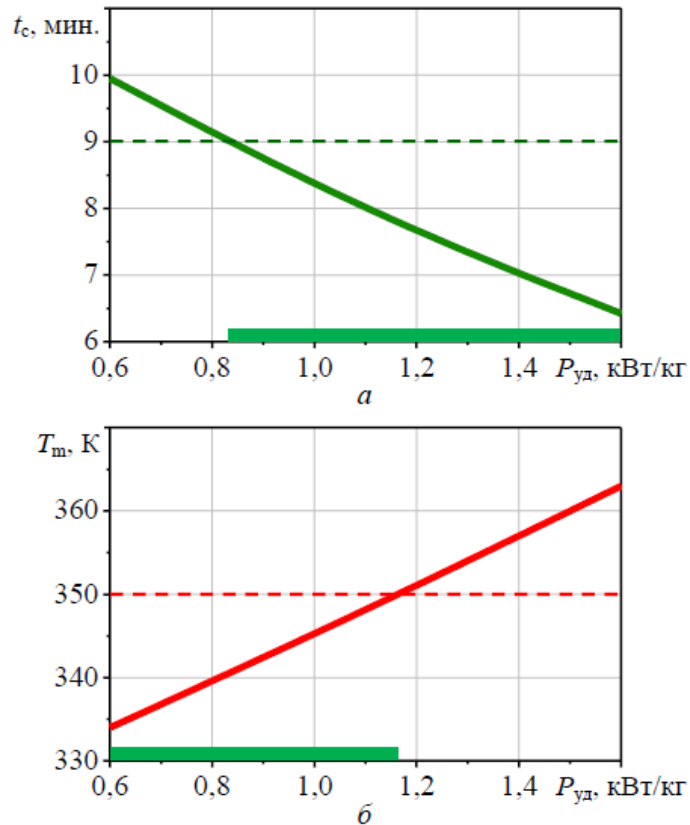


Рис. 4.6. - Вплив потужності СВЧ-випромінювання $P_{уд}$ на час сушіння t_c (а) і максимальну температуру в процесі сушіння T_m (б)

Таким чином, оптимальний діапазон питомої потужності СВЧ-випромінювання 0,83 ... 1,16 кВт/кг. При цьому час сушіння не перевищує 9 хвилин, а максимальна температура зерен не перевищує 350 К.

4.2.3. Вплив температури теплоносія на ефективність процесу сушіння

Важливою перевагою розробленого апарату є можливість використовувати низьку температуру теплоносія, і частково виробляти нагрів СВЧ випромінюванням, і відповідно зменшити енергетичні втрати на нагрів теплоносія. Для вивчення питання, наскільки можна знизити температуру теплоносія без втрати ефективності сушіння, нами проводилася серія з п'яти комп'ютерних експериментів температуру теплоносія в яких ставили на рівнях 310, 317, 325, 332, 340 К.

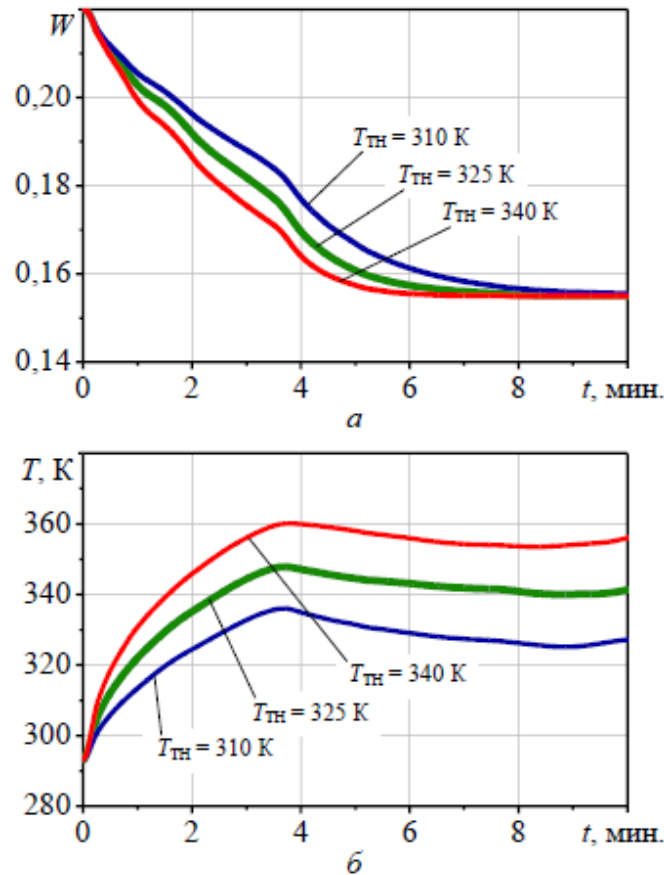


Рис. 4.7 - Зміна в процесі сушіння проса вологості (а) і температури (б) при різній температурі теплоносія T_{TH}

При низькій температурі теплоносія сушка займає тривалий час: більше 12 хвилин при $T_{TH} = 310$ К (рис. 4.7, а, 4.8, а). Щоб забезпечити час сушіння не більше 9 хвилин температура теплоносія повинна бути не нижче 320 К (рис. 4.8, а).

При високій температурі теплоносія відбувається несприятливий перегрів зерна, так як СВЧ випромінювання виробляє додатковий нагрів зерна на 20 ... 25 К. При цьому треба враховувати, що в ході сушіння розкид температури в системі зерен становить близько 20 К (рис. 4.9, б), тому значна частина зерен прогрівається вище середньої температури на 5 ... 10 градусів. Тому максимально допустима температура теплоносія, яка не викликає нагрів зерен вище 350 К становить 327 К.

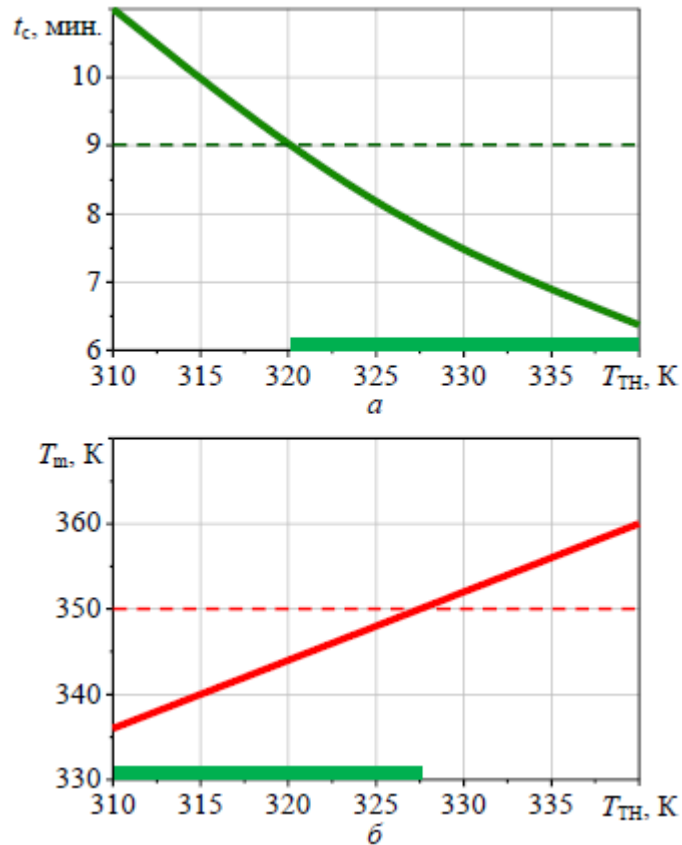


Рис. 4.8 - Вплив температури теплоносія T_{TH} на час сушіння t_c (а) і максимальну температуру в процесі сушіння T_m (б)

4.2.4. Вплив характеру обертання потоку теплоносія на ефективність процесу сушіння

Використання закрученого потоку теплоносія для підйому і утримання зерна дозволяє значно інтенсифікувати процес сушіння. Тому одним з найбільш важливих параметрів апарату є ставлення осьової швидкості потоку теплоносія до дотичній v_{oc}/v_{τ} , що задають характер вихрового руху теплоносія на вході в апарат. Для аналізу впливу відносини v_{oc}/v_{τ} на ефективність сушіння проводилася серія з п'яти комп'ютерних експериментів, при яких відношення v_{oc}/v_{τ} брало значення 1,0, 1,2, 1,4, 1,6, 1,8.

При низькому значенні осьової швидкості по відношенню до дотичної потік добре закручував систему зерен, але слабо піднімав вгору, в результаті чого в сушильній камері формувалося вузьке рухаюче кільце зерна. При

цьому, через скупчення зерен сушка відбувалася досить тривалий час.

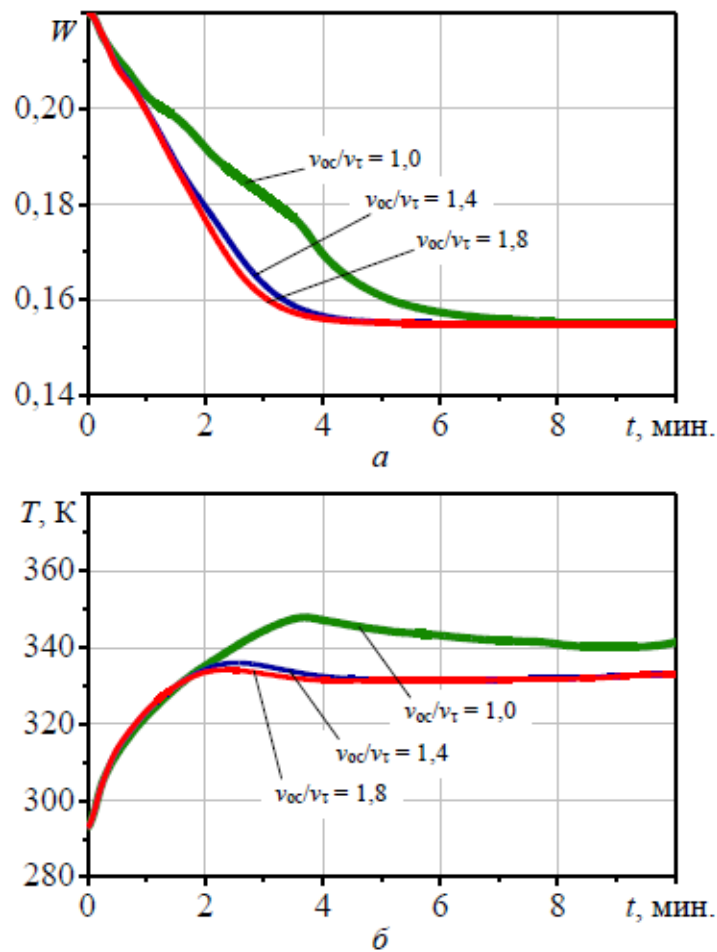


Рис. 4.9. - Зміна в процесі сушіння проса вологості (а) і температури (б) при різному співвідношенні компонентів швидкості потоку v_{oc}/v_{τ}

При збільшенні ж відносини v_{oc}/v_{τ} вище 1,2, система зерен піднімалася у верхню, циліндричну, частина сушильної камери і з високою рівномірністю розподілялася в просторі. При цьому час сушіння істотно знижувався: з 8 до 5 ... 6 хвилин.

У всьому досліджуваному діапазоні v_{oc}/v_{τ} від 1,0 до 1,8 час сушіння було меншим від прийнятого раніше порогового значення 9 хвилин, а максимальна температура зерна не піднімалася вище порогового значення 350 К. Тому за цими критеріями ефективності процесу сушіння відношення компонентів потоку в даному діапазоні є оптимальним.

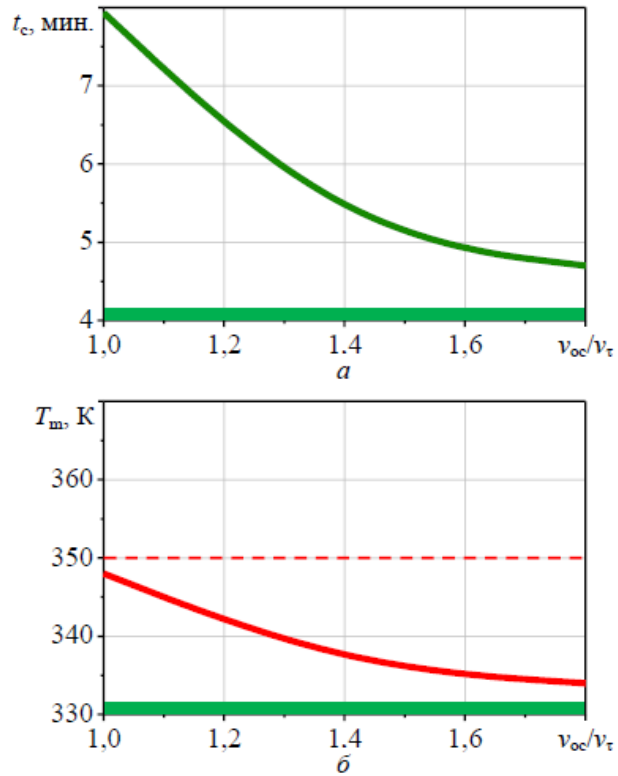


Рис. 4.10. - Вплив відносин компонентів швидкості потоку теплоносія v_{oc}/v_{τ} на час сушіння t_c (а) і максимальну температуру в процесі сушіння T_m (б)

Однак, v_{oc}/v_{τ} менше 1,2 використовувати не доцільно, так як при цьому система зерен збирається у вузьке рухаюче кільце. З іншого боку, не доцільно використовувати відношення v_{oc}/v_{τ} більше 1,6, так як насіння занадто сильно захоплюються потоком теплоносія і може інтенсивно нестися з сушильної камери.

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАУКОВИХ І ПРОЕКТНО-ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

5.1. Організація машинної технології комплексної переробки зерна проса

Провівши детальний аналіз отриманої інформації, літературного огляду техніки переробки зерна проса і результатів отриманих наукових досліджень нами розроблена нове машино-апаратурне оформлення технологічної лінії безвідходної переробки зерна проса.

На рис. 5.1. зображена схема технологічної лінії безвідходної переробки проса.

Технологічна лінія безвідходної переробки зерна проса має наступне обладнання на відповідних технологічних ділянках: комплекс первинної обробки і сушіння зерна проса I - каменевідбірна машина 1, ваги автоматичні порційні 2 і 6, магнітний сепаратор 3, сушарка 4, накопичувальний бункер 5, циклон 7; комплекс сепарування і просіювання II - сепаратор для первинного очищення зерна 8, повітряно-ситові сепаратори 10 і 12, магнітні сепаратори 9,11 і 13, бункер для дрібної фракції 14, крупо-сортирувальна машина 15, аспіратор для дрібної фракції 16, аспіратор для великої фракції 17, просівають машина 18, бункер для зернових відходів 19, бункер для великої фракції 20; комплекс лушення III – шелушильно-відцентрові машини 21 і 29, магнітний сепаратор 22 і 31, аспіраційна колона 23, 26, 27 і 32, також контрольні решета 24 і 33, просіючі машина 25, накопичувальний бункер 28, пневмотранспорт 30 і 34, батарея циклонів 35; комплекс шліфування IV - шліфувальна машина 36, блок циклонів 37, магнітні сепаратори 38 і 46, пневмотранспорт 39, аспіраційна колона 40, машина контролююча мучку 41, накопичувальний бункер 42, контрольні решета 43 і 44, аспіратор 45, накопичувальний бункер 47; комплекс виробництва варено-сушених круп V - ваги автоматичні порційні 48, підвісний бункер 49, мийна машина 50,

варильний апарат 51, бункер розпушувач 52, стрічкова конвеєрна сушарка 53, вальцьовий верстат 54, стрічкова ІК-сушарка 55, крупо-сортування 56, магнітний сепаратор 57, бункер накопичувач 58, фотосепаратор 59; комплекс отримання масла VI - магнітний сепаратор 60 і 62, п'ятівальцьовий верстат 61, прес 63.

Продукт переміщається по магістралях і в залежності від технологічної операції має наступне позначення: 0.2 - вихідне просо, 0.21 - висушене просо, 0.22 - просіяне просо, 0.221 - дрібна фракція просіяного проса, 0.222 - велика фракція просіяного проса, 0.223 - несортное просо, 0.23 - луццне просо, 0.24 – просо, яке відсортували, 0.25 - подрібнене просо, 0.26 - шліфоване просо, 0.27 - ядро проса, 0.28 - очищене просо, 0.29 - провіяне просо, 0.3 - мучка, 0.7 - мінеральні домішки, 0.71 - суміш проса і зернових домішок, 0.72 - легкі і летючі домішки, 0.73 - зернові домішки, 0.74 - макуха, 0.8 - феромагнітні домішки, 0.81 - пил, 0.9 - варена пшоняна крупа, 0.91 – варено-сушена пшоняна крупа, 0.92 - випадкові домішки у варено-сушеної крупі, 0.97 - просяне масло, 1.1 - вода питна, 3.4 - теплоносій.

Технологічна лінія комплексної переробки зерна проса працює наступним чином.

Початкове просо підвищеної вологості зі складів проміжного зберігання потрапляє в каменевідбірну машину 1 в якій відбувається відділення мінеральних домішок. Потім вихідне просо надходить на зважування на автоматичних вагах 2, з яких воно прямує на магнітний сепаратор 3 для відділення феромагнітних домішок. Далі просо надходить в сушильний комплекс, основною одиницею якого є СВЧ-сушарка 4, що використовує закручений потік теплоносія. Початкове просо живильником подається в патрубок подачі тангенціального потоку теплоносія. Потім вихідне просо надходить в нижню частину СВЧ-сушарки куди також за допомогою патрубка підведення осьового потоку теплоносія направляється гарячий теплоносій, де відбувається закручування потоків теплоносія.

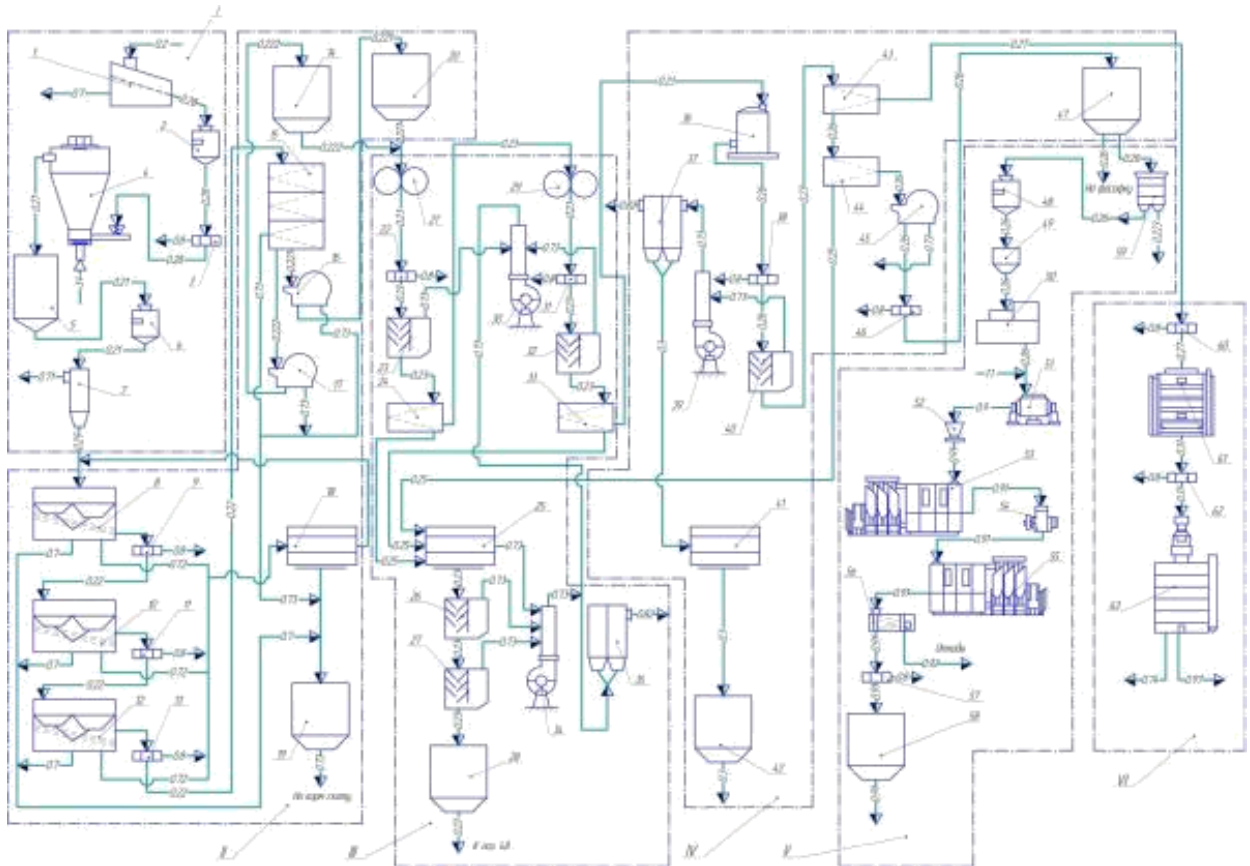


Рис. 5.1. - Технологічна лінія безвідходної переробки зерна проса

Теплоносій разом з просом починає здійснювати складне циркуляційне переміщення по всьому профілю сушильного апарату, збільшуючи при цьому свою швидкість. Тангенціальна швидкість зерен обумовлює виникнення відцентрової сили, яка відкидає зерна проса від центру сушильної камери до її стінок, утворюючи закручений шар, що представляє собою кільце, що обертається. При цьому процес сушіння протікає при високих відносних швидкостях проса і теплоносія.

В наслідок цього зерно проса в міру його висихання піднімається в циліндричну частину апарату, де відбувається інтенсифікація тепломасообміну в процесі сушіння за рахунок впливу СВЧ-енергії на просо.

Таким чином просо досушується до необхідної вологості ($W^c = 15,6\%$). З сушильної камери висушене просо направляється в накопичувальний бункер 5, ємністю не менше ніж на 24 години роботи зерноочисного відділення.

Потім висушене просо зважується автоматичними вагами 6 і надходить в циклон відділення легких домішок 7, подається на триразове послідовне просіювання спочатку в сепаратор для первинного очищення зерна (СПО-100М) 8, що володіє підвищеним рівнем очищення грубих і зернових домішок, з діаметрами отворів у ситах від 4,0 до 3,5 мм і 1,5x20 мм, в якому проводять очищення проса від великих, дрібних і легких домішок. На приймальному ситі сепаратора відокремлюються великі домішки, такі як солома, камені, тріска та ін., які надходять в бункер для зернових відходів 19, на сортувальному - зернові та інші домішки крупніше зерна. Проходом через сходові сита відділяються домішки дрібніше зерна. З сепаратора для первинного очищення зерна (СПО-100М) 8 просо надходить в магнітний сепаратор 9. Дана обробка повторюється на повітряно-ситовому сепараторі 10 з діаметрами отворів в ситах від 3,5 до 3,0 мм і 1,5x20 мм, після яких просо проходить через магнітний сепаратор 11, і на повітряно-ситовому сепараторі 12 з діаметрами отворів в ситах від 3,0 до 2,8 мм і 1,5x20 мм, з якого просо проходить через магнітний сепаратор 13.

Зернові та інші домішки крупніше зерна з повітряно-ситових сепараторів 8,10 і 12 надходять в просіючу машину 18, в якій відбувається поділ фракцій. Зернові та інші домішки крупніше зерна надходять в бункер для зернових відходів 19.

Просіяне просо з повітряно-ситового сепаратора 12 надходить на дворазову крупно-сортування через крупно-сортувальну машину 15 з діаметром сит 2,8 мм і 2,0 мм, де відбувається сортування його по фракціях на дрібну і велику, а також додаткове виділення зернових домішок які надходять в бункер для зернових відходів 19. Потoki дрібної і крупної фракції просіяного проса надходять, відповідно, в аспіратори для дрібної 16 і для великої 17 фракції, де відбувається відділення легких і зважених домішок, які надходять в бункер для зернових відходів 19. Потoki дрібної і крупної фракції надходять в бункери-накопичувачі для дрібної 20 і великої 14 фракції,

необхідні для зберігання проса і його подальшої пофракційної обробки.

Залежно від технологічних потреб виробляють по черзі обробку дрібною і крупною фракції проса. Сортувати просо з бункерів-накопичувачів 20 і 14 надходить на дворазове послідовне луцення на шелушильну відцентрову машину (МШ-1Р) 21, яка дозволяє мінімізувати кількість зруйнованого проса при обробці. Потім потік шелушеного проса проходить через магнітний сепаратор 22, з якого він прямує в аспіраційну колонку 23, де відбувається виділення легких летючих домішок. Легкі леткі домішки через пневмотранспортер 30, потрапляють в батарею циклонів 35 для очищення. Потік шелушеного проса з аспіраційної колонки 23 надходить на контрольні решета 24 з діаметром отворів 1,8 мм, на яких відбувається відділення дробленого проса. Подрібнене просо направляється на просіючу машину 25. У просіючій машині подрібнене просо проходить послідовну очистку на аспіраційних колонках 26 і 27, звідки пневмотранспортером 34 летючі домішки потрапляють в батарею циклонів 35. Очищене подрібнене просо потрапляє в бункер-накопичувач дробленого проса 28.

Паралельно відсортоване луцення просо з контрольних сит 24 надходить на шелушильну відцентрову машину (МШ-1Р) 29 для луцення. Далі потік шелушеного проса надходить на магнітний сепаратор 31 для відділення феромагнітних домішок. Потім лущене просо направляється в аспіраційну колонку 32, де відбувається виділення легких летючих домішок. Легкі леткі домішки спрямовуються в пневмотранспортер 30, з якого вони потрапляють в батарею циклонів 35. Потік шелушеного проса з аспіраційної колонки 32 надходить на контрольні решета 33 з діаметром отворів 1,8 мм, на яких відбувається поділ дробленого і шелушеного проса. Подрібнене просо направляється на просіючу машину 25 і цикл очищення дробленого проса повторюється.

Луцення проса з контрольних сит 33 потрапляє в шліфувальна машина (УКР-2) 36, яка дозволяє виробляти шліфування з мінімальною кількістю

дробленого проса і зменшити відходи при виробництві, звідки суміш шліфованого, дробленого проса і ядра через магнітний сепаратор 38 потрапляє в аспіраційну колонку 40, де відокремлюються летючі домішки. Летючі домішки через пневмотранспортер 39 потрапляють в блок циклонів 37, в якому розділяється мучка і пил. Борошно є побічний продукт переробки проса, який утворюється переважно в процесі шліфування і складається з тонко подрібнених частинок всіх анатомічних частин зернівки (плодової і насінної оболонки та крохмальних зерен з прикріпленими до них частинками білкової матриці). Борошно з блоку циклонів 37 надходить в машину контролю мучки 41, для визначення її складу. Далі мучка направляється в бункер-накопичувач мучки 42.

Суміш шліфованого, дробленого проса і ядра з аспіраційної колонки 40 потрапляє на контрольні решета 43 з діаметром отворів 1,8 мм, де відбувається виділення ядра, яке йде на ділянку отримання масла.

При виробництві проса масла нами був використаний метод пресування, який в порівнянні з екстракційним методом, більш металоемний і вимагає менше енерговитрат, що особливо актуально при виробництві масла в порівняно невеликих обсягах.

Ядро проса з контрольних сит 43 проходить через магнітний сепаратор 60, звідки воно потрапляє на п'ятивальцьовий верстат 61, де відбувається його подрібнення з отриманням мятки.

Отримана мятка знову проходить через магнітний сепаратор 62, а потім надходить в прес 63, в якому здійснюється теплова обробка мятки, в результаті якої утворюється макуха і відбувається виділення масла. Отримане масло надходить на очистку та фасування.

Суміш шліфованого і дробленого проса з контрольних сит 43 потрапить в контрольні решета 44 для їх поділу. Подрібнене просо потрапляє в просіючу машину 25. Шліфоване просо через аспіратор 45, де відокремлюються зернові відходи. Далі шліфоване просо направляється в

магнітний сепаратор 46, з якого шліфоване просо потрапляє в бункер-накопичувач 47. Залежно від поточних потреб шліфоване просо відправляють на фасовку або в ділянку виробництва вареної крупи.

Шліфоване просо з бункера-накопичувача 47 потрапляє на фотосепаратор 59 для визначення якості, далі придатне шліфоване просо і подрібнене просо з бункера-накопичувача 28 проходить зважування на автоматичних вагах 48 потрапляючи у підвісний бункер 49 над мийної машиною 50, в якій видаляють з їх поверхні бруд, пил, лузгу і органічне сміття.

З мийної машини 50 суміш шліфованого і дробленого проса потрапляє у варильний апарат 51.

Варіння крупи здійснюють під тиском 0,15 ... 0,20 МПа при наявності води протягом 30 ... 45 хв. Необхідна кількість води обумовлено ступенем гідратації крупи. Згідно з нормативними даними при варінні допускається застосовувати не більше 10% дробленого проса.

Зварена до готовності крупа направляється в бункер-розрихлювач 52 і звідти для подальшої сушіння до необхідної вологості 25 ... 27% - в стрічкову конвеєрну сушарку 53. Після чого підсушена крупа направляється для проведення плющення на вальцьовому верстаті 54, який має валки з рифленням. Потім крупу досушують теплоносієм у стрічковій ІК-сушарці 55 при температурі середовища 120 °С до вологості 9,0 ... 9,5 %. Після проведення вищевказаних операцій з крупи видаляють грудочки і випадкові домішки, потім проводять фінішний контроль на наявність металевих домішок на магнітному сепараторі 57 і здійснюють закладку на виробниче зберігання в бункерах 58. Залежно від потреб підприємства крупу направляють на наступний технологічний процес або, якщо крупа призначена для іншого підприємства, упаковують в спеціальні мішки і відправляють замовнику.

5.2. Апарат для сушіння дисперсних матеріалів з закрученими потоками теплоносія і СВЧ- енергопідведенням

Базовими напрямками інтенсифікації та ефективності процесів тепломасообміну є вдосконалення гідродинамічної обстановки в сушильних апаратах зваженого шару, а також застосування комбінованого енергопідведення як одного з прогресивних методів інтенсифікації процесу сушіння. В даний час активним чином відбувається створення конструкцій сушильних апаратів, принцип дії яких заснований на застосуванні активного гідродинамічного режиму.

На рис. 5.2 зображений загальний вигляд апарата для сушіння зерна проса з закрученими потоками теплоносія і СВЧ- енергопідведенням, а також вид А апарату на рис 5.3. На рис. 5.4 зображена 3D модель апарат.

Сушильний СВЧ-апарат складається з циліндро-конічної сушильної камери 1, в нижній частині якої розташований пристрій, конструктивно виконаний вигляді равлика 2, який має в своєму розпорядженні живильник 3, патрубк 4 подачі тангенціального потоку теплоносія і ділянкою розгону 5 для отримання газосуспензії, патрубком 6 для підведення осьового потоку теплоносія, виконаним по осі камери і концентрично встановленими в ньому завихрювачем 7. Над завихрювачем встановлені ґрати 8. Циліндрична частина 9 циліндро-конічної сушильної камери 1 містить вікно 10 і патрубок 11 для виведення висушеного матеріалу і відпрацьованого теплоносія. Над циліндричною частиною 9 концентрично встановлений СВЧ випромінювач (магнетрон) 12 таким чином, щоб найбільша щільність потоку електромагнітної енергії була зосереджена в зоні обертового кільцевого шару висушуваних частинок дисперсного матеріалу.

Утримуюча решітка 8 служить для запобігання зсипання зерен проса в повітропровід при виникненні необхідності в зупинці сушарки під час її роботи.

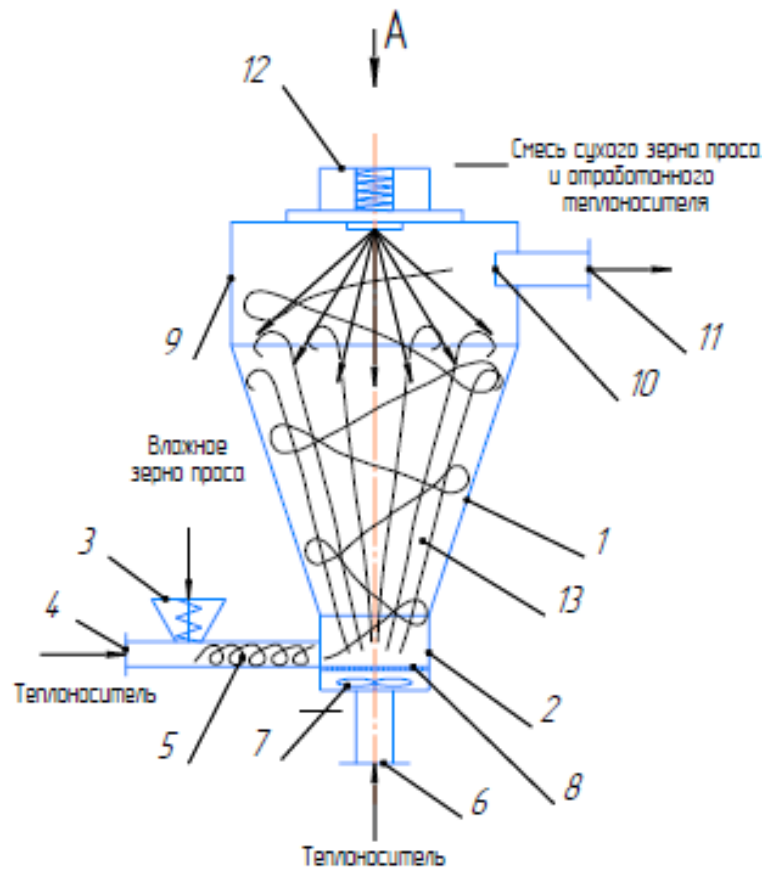


Рис. 5.2. - Схема аппарата для сушіння дисперсних матеріалів в закрученому потоці теплоносія з СВЧ- енергопідведенням

Вид А

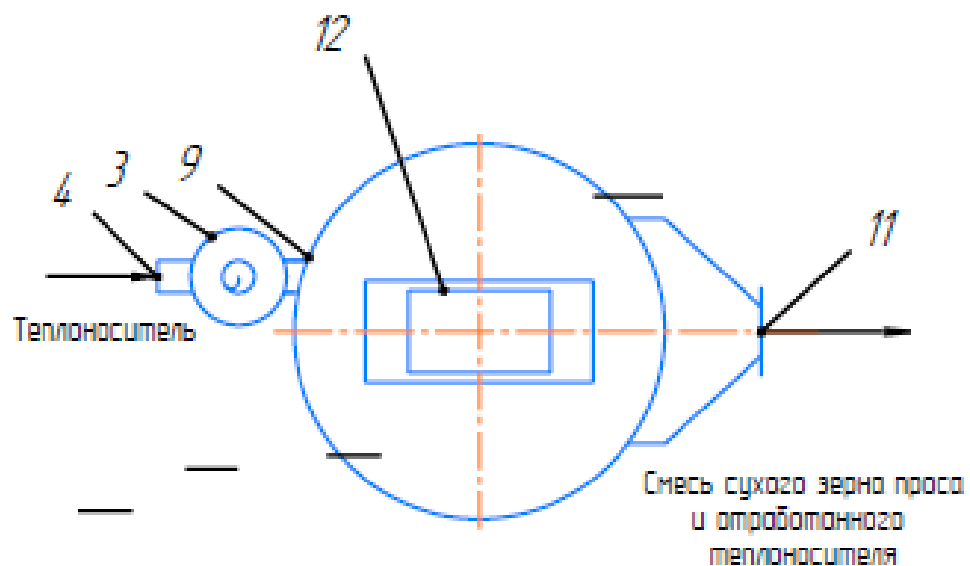


Рис. 5.3. - Вид А аппарата для сушіння дисперсних матеріалів в закрученому потоці теплоносія з СВЧ-енергопідводом

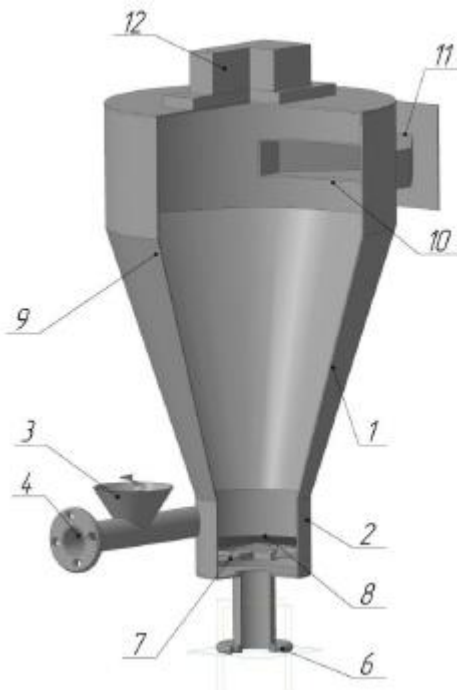


Рис. 5.4. - 3 D модель апарату

Напрямок теплоносія, отриманий шляхом змішування осьового і тангенціального потоків, умовно показані лініями 13.

Робота сушильного апарату здійснюється наступним чином. Початкове вологе зерно проса 3 подається в ділянку розгону 5. В цей же час через патрубок 4 подачі тангенціального потоку теплоносія в ділянку розгону 5 також починає надходити нагрітий теплоносій.

Отримана газозвись зерна проса і теплоносія направляється до равлика 2. Одночасно з газосуспензією в равлик 2 починає надходити осьової потік теплоносія з патрубка 6. Необхідно також відзначити, що равлик 2 має завіхрювач 7, який необхідний для посилення закрученого потоку до необхідної закрутки.

Зерна проса в міру зниження вологості піднімаються у верхню циліндричну частину 9 камери 1 сушильного апарат, де під впливом СВЧ-випромінювання відбувається значне підвищення тепломасообміну процесу сушіння. СВЧ-випромінювання забезпечується магнетроном 12, який встановлений з розрахунком на те, щоб максимум щільності потоку

електромагнітної енергії було направлено на утворений рухом закручених потоків теплоносія кільцевий шар зерна проса в сушильній камері, що дозволяє знизити температуру теплоносія від 20 до 40 °С у порівнянні з чисто конвективними способами підведення тепла.

Швидкості потоків теплоносія та їх відношення потрібно підібрати таким чином, щоб сухе зерно проса і відпрацьований теплоносій видалялися з апарату через вікно 10 і патрубок 11 для виведення висушеного зерна і відпрацьованого теплоносія. Кінцева вологість зерна проса після сушіння регулюється швидкістю осьового і тангенціального потоків теплоносія, а також їх ставленням. За рахунок зміни тангенціальної складової потоку теплоносія можна домогтися максимального рівномірного закручування потоку зерна і теплоносія, а змінюючи осьову складову потоку теплоносія, можна регулювати час перебування зерна в апараті, тим самим значно інтенсифікувати тепломасообмінні процеси при інших рівних параметрах сушіння.

У разі екстреної зупинки апарату дисперсний матеріал затримується на решітці 8.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Досліджено вплив вологості зерна проса на її фізико-механічні, тепло-фізичні та електрофізичні властивості, визначені енергетичні форми зв'язку вологи з матеріалом.

2. Запропоновано математичний опис процесу сушіння зерна проса в СВЧ-апараті з закрученим потоком теплоносія.

3. Вивчено механізм і основні кінетичні закономірності процесу сушіння зерна проса, в результаті чого обґрунтований вибір раціональних технологічних режимів проведення процесу сушіння зерна проса в СВЧ-апараті з закрученим потоком теплоносія.

4. В результаті статистичної обробки експериментальних даних отримані рівняння регресії, що характеризують продуктивність і питомі енерговитрати при сушінні зерна проса в апараті з закрученим потоком теплоносія.

5. Пошук раціональних режимів процесу показав, що для вихідних параметрів як раціональних необхідно керуватися такими інтервали значень: температура теплоносія $T = 325$ К, потужність СВЧ-випромінювання $P_{СВЧ} = 700$ Вт, співвідношення швидкостей осьового і тангенціального потоків теплоносія $V_{oc}/V_{tan} = 1,5$.

6. Розроблена лінія комплексної переробки зерна проса.

7. Розроблено оригінальну конструкцію високоінтенсивного сушильного апарату з СВЧ-енергоподводом з закрученими потоками теплоносія.

8. Запропоновано спосіб автоматичного управління процесом сушіння дисперсних матеріалів в закрученому потоці теплоносія з СВЧ-енергоподводом.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Воскобойников, ВА Сушеные овощи и фрукты [Текст] /ВА Воскобойников, ВН Гуляев, ЗА Кац, ОА – М: Пищевая пром-сть, 1980 – 187 с
2. Паламарчук ІІ Тепломасообмінні процеси та обладнання переробного та харчового виробництва Том 2 Навчальний посібник/ ІІ Паламарчук, ІС Берник, ЗА Стецько, ВВ Яськов, ІА Зозуляк // Львів: Видавництво „Бескид Біт”, 2006 – 368 с
3. Назаренко ІІ Основи проектування і конструювання машин та обладнання переробних виробництв Навчальний посібник/ ІІ Назаренко, ІМ Берник // Затверджено міністерством освіти і науки, молоді та спорту України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів(лист № 1/11-14407 від 12092012р) Видавництво «Аграр Медіа Груп»,- К:- 2013-544 ISBN 978-617-646-144-9
4. Берник ІІ С Анализ конструкций вибрационных сушилок для сыпучей сельскохозяйственной продукции / ІІ С Берник, ІІ П Паламарчук, ІА Зозуляк // Вибрации в технике и технологиях : Всеукраин НТЖ – Вінниця, 1998 – № 2 (6) – С 14–21
5. Bandura V Description of heat exchange in the similarity theory of vibrating drying process of sunflower / V Bandura, I Zozuliak, V Palamarchuk – Ukrainian Journal of Food Science, 2014 Vol 2 Issue 2 305-311
6. Хиппель, А Диэлектрики и волны [Текст] / А Хиппель – М: Наука, 1990 – 360 с
7. Зозуляк ІА Обґрунтування конструкції вібромашини для сушіння гранульованих і зернистих матеріалів/ІА Зозуляк// Східно-європейський журнал передових технологій ISSN 1729-3774 - 2014-№1/7(67)-С15-19
8. Burdo O Using of the wave technologies in intensification processes of heat and mass transfer / O Burdo, V Bandura, A Zykov, I Zozulyak, J Levtrinskaya, E Marenchenko // EUREKA: Physics and Engineering – 2017 – № 4 – С 18–24

9. Бурдо ОГ Электротехнологии адресной доставки энергии при обработке пищевого сырья / ОГ Бурдо, ВН Бандура, ЮО Левтринская // «Электронная обработка материалов» №3 (53) 2017 – С 64-72
10. Бандура ВМ Обробка експериментальних даних процесу екстрагування рослинних олій мікрохвильовим полем/ ВМ Бандура, ЛМ Коляновська // Наукові праці ОНАХТ Випуск 43 том2 мОдеса 2013- С 66-70
11. Явчуновская СВ Повышение качества сушки плодоовощной продукции малой и средней влажности за счет создания и использования электрических конвейерных установок микроволной сушки: Дисс канд техн наук Саратов, 1998 - 234 с
12. Паламарчук ІІ Обґрунтування конструктивної схеми вібраційної фільтраційно-осмотичної сушарки / ІІ Паламарчук, ОВ Зозуляк, ІА Зозуляк// Збірник наукових праць ВНАУ Серія: Технічні науки – 2011 – № 9 – С 173–182
13. Паламарчук ВІ, Бандура ВМ, Цуркан ОВ Экспериментальное исследование технологических параметров процесса инфракрасной сушки движущегося шара сырья масличных культур MOTROL Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – 2015 Vol 17, №4 211-214
14. Бандура Валентина, Цуркан Олег, Паламарчук Владислав Экспериментальное исследование технологических параметров процесса инфракрасной сушки движущегося шара сырья масличных культур/ Валентина Бандура, Олег Цуркан, Паламарчук Владислав // MOTROL Commission of Motorization and Energetics in Agriculture – Lublin, Vol 17, No 4, 2015 – p 211-215
15. Янович Л П Визначення оптимальних робочих параметрів вібраційної машини для сушіння зерна / Л П Янович, І А Зозуляк, В П Янович // Зб наук пр Вінн держ аграр ун-ту – 2013 – № 12 (75) – С 152–157
16. Цуркан ОВ Математична модель вібраційної сушарки з маятниковими механізмами вільного ходу / ОВ Цуркан, ЛД Величко, ДВ Присяжнюк //

Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях» №1 (84) 2017 – С 110 – 120

17. Palamarchuk Igor Modeling of vibrocentrifugal electric osmotical dehydrating of with high humidity food seeds gourds / Igor Palamarchuk, Oksana Zozuliak, Igor Zozuliak, Novgorodska Nadia // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» №2 (98) 2017 – С112-118

18. Котов Бі Розрахунок кінетики сушіння неоднорідних рослинних матеріалів / Бі Котов, АВ Спирін, ІА Зозуляк, АВ Півнюк // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» №1 (96) 2017 – С93-95

19. Спирін АВ Розрахунок кінетики сушіння неоднорідних рослинних матеріалів / АВ Спирін, Бі Котов, ІА Зозуляк, АВ Півнюк // Техніка, енергетика, транспорт АПК – Вінниця, 2016 – №4, С52-54

20. Паламарчук Ві Дослідження конкурентоздатності віброхвильової конвеєрної інфрачервоної сушарки для післязбиральної обробки зерна / Ві Паламарчук, ІП Паламарчук, ОВ Цуркан, СО Харченко // Східно-Європейський журнал передових технологій, № 2/7(80), 2016 – С 79 – 85

21. Рогов, И А Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов [Текст] / И А Рогов, СВ Некрутман - М: Агропромиздат, 1986 – 351 с

22. Пазюк ВМ Теплонасосні сушильні установки в процесах сушіння зерна /ВМ Пазюк// Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» №2 (94) 2016 – С53-57

23. Пазюк ВМ Створення нових теплотехнологій отримання якісних фолатовмісних функціональних порошків / ЮФСнежкін, ЖО Петрова, ВМ Пазюк, ВВ Дуб //Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб наук пр – Харків : ХДУХТ, 2016 – Вип 1 (23) с 80-89

24. Сажин, Б С Основы техники сушки [Текст] / Б С Сажин – М : Химия, 1984 – 320 с
25. Пазюк ВМ Енергозберігаючі режими сушіння насінневого зерна та реалізація їх у вібраційній зерносушарці / ВМ Пазюк, ОД Пазюк, МД Романенко // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Вібрації в техніці та технологіях» №3 (83) 2016 – С202-206
26. Паламарчук ІП Обґрунтування конструктивно-технологічної схеми інфрачервоної віброхвильової конвеєрної сушарки для післязбиральної обробки сипкої сільськогосподарської продукції / ІП Паламарчук, ОВ Цуркан, ВІ Паламарчук // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету Серія: Технічні науки - 2015 - Вип № 1(89) Том 1 - С 117-123
27. Бандура ВМ Сушіння насіння соняшнику в електромагнітному полі / ВМ Бандура, ОІ Маренченко, ЄО Пилипенко // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» №2 (98) 2017 – С63-68
28. Орловский МА, Кукушкина ТН Оборудование сушильных производств М: Пищевая промышленность, 1973 — 237 с
29. Левтринская ЮО Микроволновые технологии интенсификации массообменных и тепловых процессов при переработке растительного сырья / ЮО Левтринская, НВ Ружицкая, ТА Резниченко, ВН Бандура // Наукові праці ОНАХТ - №1 (80) 2017 – С 67-73
30. Гинзбург, А С Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности [Текст] / А С Гинзбург – М: Агропромиздат, 1985 – 336 с
31. Бандура ВМ Перспективи застосування інфрачервоного та мікрохвильового поля в процесі переробки олійних культур / ВМ Бандура // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» №3 (95) 2016 – С94-101

32. Паламарчук ІП Електромеханічна модель адаптивної вібровідцентрової електроосмотичної сушарки / ІП Паламарчук, ОВ Зозуляк, ІА Зозуляк, РВ Чубик // Вісник харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка – 2015 – Випуск 166 – С226 – 235
33. Лыков, АВ Тепло- и массообмен в процессах сушки [Текст] / А В Лыков – М-Л: Госэнергоиздат, 1956 – 464 с
34. Паламарчук ІП Дослідження конкурентоздатності віброхвильової конвеєрної інфрачервоної сушарки для післязбиральної обробки зерна / Паламарчук ІП, Цуркан ОВ, Паламарчук ВІ, Харченко СО // Восточно-европейський журнал передових технологій – 2016 - № 2/7(80) – С 79 – 85
35. Бандура ВМ Розвиток інфрачервоної техніки для обробки зерна / ВМ Бандура, ОО Кірієнко // ВНТЖ Техніка, енергетика, транспорт АПК – 2015 - №3(92)– С53-58