

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  
к.т.н., доцент. Токарчук О.А.

---

«\_\_» листопада 2023 р.

**ОБГРУНТУВАННЯ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ  
ПАРАМЕТРІВ СУШАРКИ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР**

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

Виконав: студент групи Маш-22-1-Маг  
Мостовик Володимир Васильович

---

Керівник: к.т.н., доцент  
Полевода Юрій Алікович

---

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

Затверджую:

зав. кафедри технологічних процесів  
та обладнання переробних  
і харчових виробництв

\_\_\_\_\_к.т.н., доцент. О.А. Токарчук  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_2022 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ  
студенту Мостовику Володимирі Васильовичу  
на тему:

«Обґрунтування конструктивно-технологічних  
параметрів сушарки зернових культур»

затверджену наказом від «02» грудня 2022 р. № 187 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. Методика економічної оцінки результатів досліджень.
6. Дані власних досліджень, одержаних в попередній період.

## Календарний план виконання магістерської роботи

Структура роботи		Обсяг сторінок	Термін підготовки	Підпис керівника
Анотація		1-2	01.03.23 р	
Вступ		2-5	23.04.23 р	
РОЗДІЛ 1	СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА	10-15	27.05.23 р	
РОЗДІЛ 2	ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗЕРНА ПРОСА ЯК ОБ'ЄКТА СУШІННЯ	10-15	10.07.23 р	
РОЗДІЛ 3	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА	10-15	01.09.23 р	
РОЗДІЛ 4	ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА	10-15	01.10.23 р	
Загальні висновки		1-2	05.11.23 р	
Список використаної літератури		2-4	07.11.23 р	

Термін подання роботи на кафедру

для попереднього захисту

«        » листопада 2023 р.

## ЗМІСТ

С

АНОТАЦІЯ

ВСТУП

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА.....	13
1.1 Загальна характеристика зерна проса.....	13
1.2 Хімічний склад зерна проса.....	17
1.3 Огляд існуючих установок для сушіння зерна проса.....	20
1.4 НВЧ-сушильні установки.....	22
1.5 Вплив НВЧ-енергії на мікробіологічний комплекс зерна.....	22
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗЕРНА ПРОСА ЯК ОБ'ЄКТА СУШІННЯ.....	23
2.1 Дослідження фізико-механічних властивостей зерна проса.....	23
2.2 Дослідження теплофізичних характеристик .....	31
2.3 Дослідження електрофізичних властивостей зерна проса.....	31
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА.....	39
3.1 Опис експериментальної установки та методика проведення експерименту...34	
3.2 Багатофакторний статистичний аналіз процесу сушіння проса в НВЧ-апараті із закрученими потоками теплоносія.....	38
3.3 Вплив основних факторів на кінетику процесу сушіння зерна проса в НВЧ- апараті із закрученими потоками теплоносія.....	38
3.4 Дослідження впливу підведеної НВЧ-потужності на процес сушіння .....	42

РОЗДІЛ 4. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА.....	46
4.1 Математична модель.....	49
4.2 Опис у моделі зерен проса.....	55
4.3 Вплив параметрів процесу сушіння на його ефективність.....	58
4.4 Вплив потужності НВЧ-випромінювання на ефективність процесу сушіння..	60
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	62
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63

## АНОТАЦІЯ

Мостовик В. В. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів сушарки зернових культур. – Рукопис.

Робота на здобуття освітнього ступеня магістр зі спеціальності 133 – «Галузеве машинобудування». – Вінницький національний аграрний університет. – Вінниця, 2023.

В магістерській роботі досліджено вплив вологості зерна проса на його фізико-механічні, теплофізичні та електрофізичні властивості, визначено енергетичні форми зв'язку вологи з матеріалом.

Запропоновано математичний опис процесу сушіння зерна проса в НВЧ-апараті із закрученим потоком теплоносія, вивчено механізм та основні кінетичні закономірності процесу сушіння зерна проса, у результаті чого обґрунтовано вибір раціональних технологічних режимів проведення процесу сушіння зерна проса в НВЧ-апараті із закрученим потоком теплоносія.

Отримано рівняння регресії, що характеризують продуктивність і питомі енерговитрати при сушінні зерна проса в апараті із закрученим потоком теплоносія. Розроблено оригінальну конструкцію високоінтенсивного сушильного апарата з НВЧ-енергопідведенням із закрученими потоками теплоносія.

*Ключові слова:* процес сушіння, зерна проса, теплоносій, надвисокочастотна обробка, закручений потік, математична модель.

#### ANNOTATION

Mostovyk V. V. Justification of the structural and technological parameters of the cereal dryer – The manuscript.

Work on obtaining educational degrees master's degree in the 133 – «Industrial engineering». – Vinnytsia National Agrarian University. – Vinnytsia, 2023.

In the master's thesis, the influence of the moisture content of millet grain on its physico-mechanical, thermophysical and electrophysical properties was investigated, and energy forms of the connection of moisture with the material were determined.

A mathematical description of the process of drying millet grain in a microwave apparatus with a swirling flow of heat carrier is proposed, the mechanism and basic kinetic laws of the process of drying millet grain are studied, as a result of which the choice of rational technological modes for the drying process of millet grain in a microwave apparatus with a swirling flow of heat carrier is substantiated.

Regression equations characterizing productivity and specific energy consumption during drying of millet grain in the device with a swirling flow of heat carrier were obtained. An original design of a high-intensity drying apparatus with microwave energy supply with swirling coolant flows was developed.

*Keywords:* drying process, millet grains, coolant, ultra-high-frequency treatment, swirling flow, mathematical model.

## ВСТУП

В основу розвитку техніки та технології того чи іншого технологічного процесу можна закласти ряд основних параметрів: підвищення продуктивності, якості, ефективності операцій з переробки сировини, забезпечення стійкості роботи лінії (технологічного потоку). Ключовим елементом 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 у конструкціях, так і технології переробки проса. Просо традиційно займає позицію важливої сільськогосподарської культури в країні. Його використовують для виробництва, як пшоняної крупи (шліфоване пшоно), борошна, а також останнім часом і олії для медичних та харчових цілей.

Просо має унікальні біологічні особливості. Насіння проса починає проростати при температурі 8-10°C, поглинаючи при набуханні близько 25% води від маси насіння. Швидкість проростання залежить від температури: при 8°C просо проростає через 10-15 днів, при 1°C проростає через 4-5 і при 20-25°C – через 3 дні. Найбільш енергійно просо кущиться при температурі 18-20°C та достатній вологості ґрунту. Здатність сприйняття тепла просом набагато вища, ніж ячменю, пшениці та жита. Окремо хотілося б наголосити на здатності продуктивно використовувати пізні літні опади, що робить його цінною культурою для посушливих південних і південно-східних районів країни [80].

За статистичними даними динаміка посівних площ та валового збору зерна проса відображені на діаграмах (рис. 1).



Аналізуючи дані статистики можна зробити висновок, що, незважаючи на, корегуючу величину посівних площ спостерігається досить велика різниця валового збору зерна проса в залежності від року, що не дозволяє з упевненістю оптимально прогнозувати врожайність у майбутньому. Основними причинами, що впливають на збирання зернових у цілому, є: низький рівень, застарілість посадкової та збиральної техніки, виснаження ґрунтів, несприятливі кліматичні умови, неправильна обробка сировини та порушення оптимальних режимів зберігання.

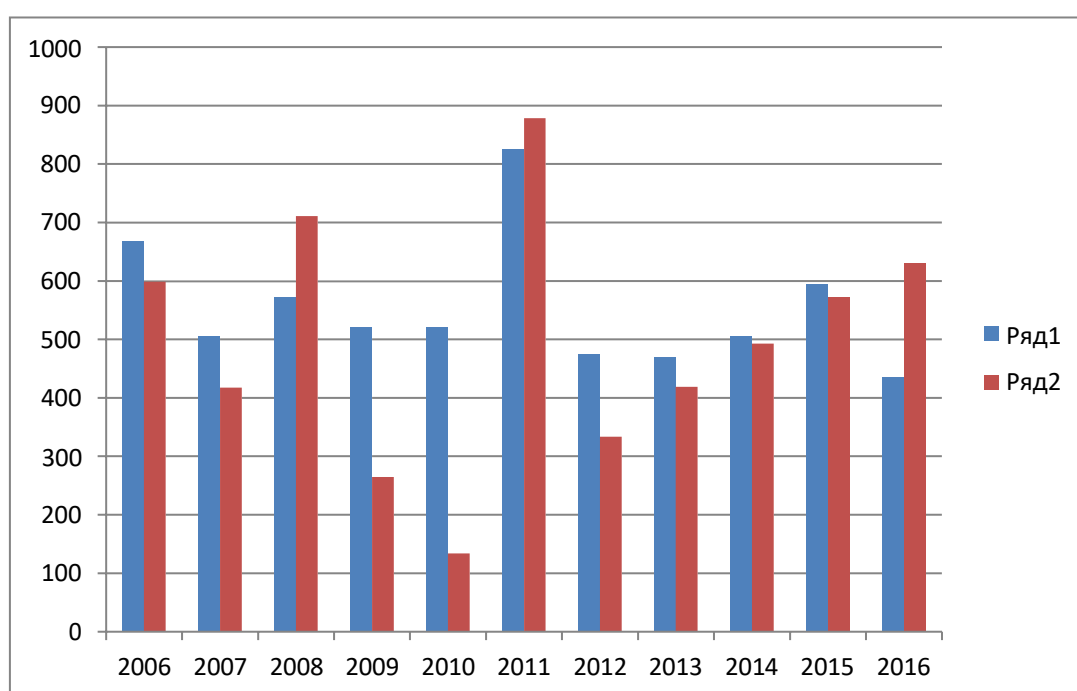


Рис. 1. - Динаміка посівних площ 1 (у тисячах гектар) та валового збору 2 (у тисячах тонн) зерна проса

Провівши аналіз методів удосконалення процесу сушіння дисперсних продуктів, нами було зроблено наступний висновок – високоякісне та ефективне сушіння зерна проса може здійснюватися в апаратах з активним гідродинамічним режимом та застосуванням комбінованого енергопідведення.

Незважаючи на те, що в даний час сушіння зерна проса в основному здійснюється на шахтних сушильних апаратах і рідше – барабанних, сушіння проса залишається складним технологічним процесом через ряд конструктивних

особливостей існуючих апаратів. У той же час застосування нових апаратів із застосуванням зважено-закрученого шару та додатковим підведенням енергії дозволить зробити істотний внесок у вирішення проблем, що виникають при традиційних способах сушіння зерна проса.

**Мета магістерської роботи:** забезпечення процесу сушіння зерна проса в апараті із НВЧ-енергопідведенням, а також визначення раціональних технологічних режимів сушіння зерна проса.

Для досягнення мети були поставлені такі **завдання:**

- визначити фізико-механічних, теплофізичних та електрофізичних характеристик сировини, що вивчається;
- вивчити кінетичні закономірності процесу сушіння зерна проса в НВЧ-апараті із закрученими потоками теплоносія;
- визначити оптимальні режими установки для сушіння проса;
- розробити математичну модель процесу сушіння зерна проса;
- розробити нову конструкцію сушильного апарату, схеми автоматичного керування та технологічної схеми комплексної переробки зерна проса.

**Об'єкт дослідження:** зерно проса.

**Предмет дослідження:** взаємозв'язок НВЧ-сушіння зернової маси проса з показниками якості та оптимальними режимами установки.

**Наукова новизна:**

- вивчено кінетичні закономірності процесу сушіння зерна проса;
- розроблено модель для дослідження взаємодії різних факторів, що впливають на процес сушіння зерна проса в НВЧ-апараті із закрученими потоками теплоносія;
- створено математичну модель процесу НВЧ-сушіння зерна проса у виважено-закрученому шарі.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА

#### 1.1 Загальна характеристика зерна проса

Просо – однорічна яра культура. З чотирьох видів, що виростають у нашій країні, для отримання зерна обробляють в основному один вид – просо звичайне (*Panicum miliaceum*) (рис. 1.1), що підрозділяється за формою на 5 груп.

Найбільш скоростиглі сорти мають розлогу або розложисту форму, а також проміжну – розлогу – пониклу (стислу).

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



Рис. 1.1 - Просо звичайне

У країні районовано близько 40 сортів проса. Відмінною особливістю даної культури є стійкість до тепла та стійкість до засухи. Це виявляється у тому, що в посушливі роки просо має більш високу врожайність у порівнянні з іншими зерновими культурами.

Веgetаційний період скоростиглих сортів проса коротший, ніж у інших зернових культур. Час дозрівання скоростиглих сортів становить 60-70 днів, середньозрілих – 70-90 діб і пізньостиглих – 90-120 днів. Температура проростання насіння 8°C. Потрібна температура цвітіння 16-20°C. Як і багато культур просо рекомендується висаджувати на родючих, структурних ґрунтах, очищених від бур'янів. Переважними ґрунтами для нього вважаються чорноземи, каштанові ґрунти, а також сірі лісові та дернові ґрунти з нейтральною реакцією. Найкращі врожаї проса збирають на цілих землях першого року оранки.

Сприятливими попередниками проса при сівозміні є озимі та зернобобові культури, можливий посів з багаторічних трав.

Осінь та весняна обробка ґрунту необхідна для очищення поля від бур'янів. З цієї причини навесні проводиться дві культивації – ранню та передпосівну. Також перед посівом для поля потрібно вирівнювання за допомогою боронування та прикочування.

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

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

Рекомендована температура ґрунту, при якому висівають просо, становить 10-12°C. Нормою висіву вважається 1,5-2,5 млн схожого насіння на 1 га, що при рядовому посіві становить 30-40 кг, широкорядному – 20-25 кг, а в степових південних районах 10-12 кг. Глибина загортання становить не більше 20-40 мм. При широкорядному та стрічковому посівах потрібна міжрядна обробка, особливо на початку літа, коли просо росте повільно. Крім цього, нині широкого поширення набула прополка посівів гербіцидами.

Зерно проса дозріває нерівномірно. Сигналом до початку збирання служить дозріле зерно у верхній частині волоті, причому це 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.

## 1.2 Хімічний склад зерна проса

Важливою характеристикою щодо будь-якого продукту є хімічний склад. Хімічний склад проса залежить від сорту, району та умов вирощування. У таблиці 1.1 наведено хімічний склад зерна проса (середнє значення) [78].

Таблиця 1.1.

Хімічний склад зерна проса за макрокомпонентами, г

Вода	Вуглеводи	Харчові волокна	Жири	Білки	Зола	Загальна маса
13,5	54,6	13,9	3,9	11,2	2,9	100

Жировий склад проса ділитися на три групи: насичені жири, мононасичені та полінасичені жирні кислоти.

Вміст цукрів представлено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Вміст цукрів

Сахароза	Глюкоза	Галактоза	Загальна маса
0,8	0,1	0,22	1,12

Білки, що складаються із заміennих та незамінних амінокислот, представлені в таблиці 1.3.

Окремою групою у зерні проса варто виділити вітаміни, так як на відміну від усіх інших життєво важливих харчових речовин (незамінних амінокислот, поліненасичених жирних кислот тощо), вітаміни не мають пластичних властивостей і не використовуються організмом як джерело енергії. Беручи участь у різноманітних хімічних перетвореннях, вони регулюють вплив на обмін речовин і тим самим забезпечують нормальний перебіг практично всіх біохімічних і фізіологічних процесів в організмі. Вітамінний склад проса наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.3

Амінокислотний склад зерна проса, г

Незамінні амінокислоти	Маса	Замінні амінокислоти	Маса	Загальна маса
Аргінін	0,45	Аспарагінова кислота	0,78	11,2
Валін	0,44			
Гістидін	0,31	Аланін	1,03	
Ізолейцин	0,5			
Лейцин	1,17			
Лізін	0,3	Гліцин	0,3	
Метіонін	0,22	Глутамінова кислота	2,37	
Метіонін+Цистеїн	0,44	Пролін	0,64	
Треонін	0,41	Серін	0,73	
Триптофан	0,17	Тирозін	0,38	
Фенілаланін	0,57	Тирозін	0,22	
Фенілаланін+Тирозін	0,95			

Таблиця 1.4

## Вітамінний склад зерна проса, мг

Жиророзчинні	Маса	Водорозчинні	Маса	Загальна маса
Вітамін А	0,001	Вітамін В1, Тіамін	0,39	
		Вітамін В2, Рібофлавін	0,07	
Бета каротин	0,01	Вітамін В6, Піридоксин	0,43	
		Вітамін В9, Фолати	0,038	
Вітамін Е, альфа токоферол	0,6	Вітамін РР, Ніацин	2,8	
		Вітамін РР, Ніациновий еквівалент	5,7	

Мінеральні речовини поділяються на мікро- та макроелементи. І ті, й інші необхідні для нормального функціонування всіх органів та систем організму. Склад мінеральних речовин, у зерні проса представлений у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5

## Мінеральний склад зерна проса, мг

Макроелементи	Маса	Мікроелементи	Маса	Загальна маса
Калій, К	328	Бор, В	0,228	
Кальцій, Са	51	Залізо, Fe	3,5	
Кремній, Si	754	Йод, І	0,0061	
Магній, Mg	130	Молибден, Мо	0,0195	
Натрій, Na	28	Нікель, Ni	0,0269	
Сірка, S	81	Фтор, F	0,079	
Фосфор, P	320	Хром, Cr	0,0078	
Хлор, Cl	36	Цинк, Zn	2,92	

## 1.3 Огляд існуючих установок для сушіння зерна проса

При визначенні способів сушіння необхідно враховувати технологічні параметри проведення процесу, таких як початкова та кінцева вологість вихідної сировини, фізико-хімічні показники, критичні температури при яких можливе руйнування основних компонентів зерна (вітаміни, білки тощо). Знання даних параметрів дозволяє говорити про відмінні конструктивні особливості сушильних апаратів.

Крім цього, необхідно враховувати і майбутні обсяги переробки в поєднанні з урахуванням кліматичних особливостей місцевості, в якій планується вести переробку [32].

В даний час сушіння зерна в основному виробляється на шахтних і барабанних установках.

В даний час знаходять застосування сушарки з киплячим шаром, а також (в основному на зерноприймальних підприємствах) рециркуляційні сушарки.

Загальними класифікаційними ознаками сушарок для зернових культур є:

- застосування конвективного способу підведення енергії до зерна;
- використання безперервно діючих стаціонарних сушарок;
- застосування, як агента сушіння атмосферного повітря або продуктів згоряння твердого, рідкого та газоподібного палива;
- використання принципів перехресного струму при організації руху продукту та потоків теплоносія.

Існуючі конструкції зерносушарок, які використовуються в нашому стані, схожі зі своїми імпортними аналогами. Також варто зазначити, що активне застосування отримує попереднє прогрівання зерна перед сушінням. Шахтові, жалюзійні та стрічкові сушарки, що застосовуються, використовують конвективний спосіб підведення тепла в щільному шарі з низькою швидкістю руху.

Зерносушарки шахтні типу ЗШ (рис. 1.2) призначені для безперервного сушіння зерна пшениці, жита, ячменю, вівса, кукурудзи, рису, ріпаку, проса та інших зернових, олійних, зернобобових, дрібнонасічних та круп'яних культур насінневого та продовольчого призначення.

Сушарки випускаються продуктивністю 5, 10, 15, 20, 25, 50, 75 і 100 т/год для пшениці при зніманні 5% вологи в режимі сушіння з охолодженням без теплообмінника з прямим нагріванням агента сушіння [79].





Рис. 1.2 - Зерносушарка шахтного типу ЗШ

Основні переваги даної сушарки наступні: безперервний процес сушіння, коробка змінного перерізу забезпечують рівномірність продування зернової маси по перерізу сушильної колони, рекуперация відпрацьованого ненасиченого агента сушіння і підігрітого охолоджуючого повітря, змінний розмір зони охолодження теплоізоляція сушарки, малі втрати тепла у навколишнє середовище.

Технічна характеристика сушарок даного типу подана у таблиці 1.6.

Зерносушарка шахтна серії С (рис. 1.3) призначена для сушіння продовольчого, насіннєвого та фуражного зерна круп'яних (пшениця, ячмінь, овес, рис, жито, просо, кукурудза), зернобобових (соя, горох, квасоля, боби, сочевиця), олійних культур (насіння соняшнику, ріпаку, коноплі, гірчиці), а також амаранту, конюшини, пивоварного ячменю та ін.

## Технічна характеристика сушарок типу ЗШ

Модель зерносушарки		ЗШ-300Г	ЗШ-600Г	ЗШ-900Г	ЗШ-1200Г	ЗШ-1500Г
Продуктивність для пшениці при зниженні вологості з 20% до 14%, т/год (т/добу)		5 (115)	10 (230)	15 (345)	20 (430)	25 (575)
Вид палива		Природний газ, пропан-бутан, росл. відходи				
Максимальна витрата палива	газ природний, м <sup>3</sup> /год	40	75	110	145	180
	пропан-бутан, кг/год	35	60	90	120	150
	лушпиння соняшника, кг/год	80	160	240	320	400
Вологість палива, %, не більше		20				
Максимальний розмір частинок палива, мм		8				
Встановлена електрична потужність, кВт·год		27	52	72	90	105
Засипна ємність, м <sup>3</sup>		21	26	30	39	47
Стан зернового шару у шахті		Суцільний шар				
Випуск зерна із шахти		Регульований				
Габаритні розміри, м висота/ширина/довжина		8/2,8/13	9,1/2,8/ 13	10,3/2,8/ 15	12,6/2,8/ 15	14,9/2,8/ 17
Вага, т		9	11	12	14	17

Підходить для сушіння дрібнонасінневих культур та зернових висівок. Особливості: рівномірність просушки при товщині шару в 140 мм; планова продуктивність зерносушарок розрахована при зніманні вологи 6% за один прохід. Даний тип сушарок має ряд відмінних рис, а саме: електричний привод, застосування двох видів палива (рідкий, газ) швидкий монтаж на об'єкті та компактні розміри зерносушарки; можливість модернізації зерносушарки за рахунок додаткових опцій; теплоізольовані системи підведення та відведення теплоносія; спосіб подачі тепла – «на розрядження» (вакуумна сушарка) – виключає втрати теплоносія, система автоматики забезпечує контроль температури теплоносія, зерна, що просушується, ступеня завантаження зерносушарки та безліч інших параметрів, дозволяє дистанційно керувати зерновими потоками. Випускаються у двох виконаннях – «Оптимум» та «Стандарт» [2]. Технічна характеристика зерносушарок серії С представлена в таблиці 1.7.



Рис. 1.3 - Зерносушарка шахтна серії С

Таблиця 1.7

Технічна характеристика шахтних зерносушарок серії С

	<b>С-10</b>	<b>С-15</b>	<b>С-20</b>	<b>С-30</b>
Комплектація	Оптимум			
Продуктивність, т/год	10-14	15-20	20-28	5-7
Встановлена електрична потужність, кВт	40	55	74	100
Питома витрата газу, м <sup>3</sup> /т	1-1,35			
Питома витрата рідкого палива кг/т	4,6-8,1			
Питома витрата електроенергії кВт·год	4,25-6,11			
Витрата повітря, м <sup>3</sup> /год	32000	45000	62000	90000
Продуктивність при сушінні пшениці (зниження вологості з 19 до 15%), т/год	10	15	20	30
Маса, кг	15000	20000		29500
Довжина, мм	12017	13290	12017	15350
Ширина, мм	4130	4190	4130	4940
Висота, мм	12693	14693	12693	23010
	<b>С-30</b>	<b>С-40</b>	<b>С-50</b>	<b>С-60</b>
Комплектація	Стандарт			
Продуктивність, т/год	30-40	40-54	50-59	60-70
Встановлена електрична потужність, кВт	100	140	220	
Питома витрата природного газу, м <sup>3</sup> /т	0,94-1,23	0,9-1,2		
Питома витрата рідкого палива кг/т	-	4,6-8,1	-	4,6-8,1
Питома витрата електроенергії кВт·год	4,25-6,11			
Витрата повітря, м <sup>3</sup> /год	90000	152000	168000	180000
Продуктивність при сушінні пшениці (зниження вологості з 19 до 15%), т/год	30	40	50	60
Маса, кг	32000		45000	
Довжина, мм	19970	19673	19470	17780
Ширина, мм	5250	7200	7540	11772
Висота, мм	23010	26030	21313	23310

Сушильна установка СВМ (рис. 1.4) безперервної дії призначається для інтенсивного та ефективного сушіння зернових культур первинного очищення для потреб насінневого та товарного споживання, насіння олійних культур та трав з метою їх зневоднення до необхідної кондиції.

Рекомендується установка сушарки безпосередньо після первинного очищення зерна (кам'яно- і піскоуловлювачі, трієри, сепаратори і т. д.), а також після попереднього очищення на повітряних або повітряно-решітних машинах. Завантаження та вивантаження продукту може здійснюватися як за допомогою пневмотранспорту, так і механічним транспортуванням норіями та іншими конвеєрами [19].



Рис. 1.4 - Сушарка типу СВМ

Інфрачервоні конвеєрні зерносушарки «Агрохіт» (рис. 1.5) призначені для сушіння пшениці, ячменю, рису, рису, проса та інших зернових культур, а також можуть бути використані під час заготівлі лікувальних трав і ягід. Зерно рухається по конвеєру під інфрачервоним випромінюванням, що дає змогу відібрати вологу із зерна без горіння, за низьких температур 30-50 градусів [83].

Щоб забезпечити роботу сушарки протягом 10 годин, потрібно приблизно 500 кВт.

Ці інфрачервоні конвеєрні зерносушарки відносяться до стаціонарних, але вони легко переміщуються. Наприклад, модель «Агрохіт-500» може перевозитися в автомобілі. Для їх підключення потрібна тільки електромережа необхідної потужності. Початковий монтаж і пуско-налагодження проводяться за 48 годин з моменту доставки на місце установки (за умови, що підготовлено місце установки і підведено електроживлення).



Рис. 1.5 - Інфрачервона конвеєрна зерносушарка «Агрохіт»

Циркуляційні інфрачервоні сушарки PRIF-120E/500E (рис. 1.6, 1.7) використовуються для сушіння пшениці, жита, кукурудзи, рису та проса. Відмінною особливістю даних сушарок є збільшення на 20-30% швидкості сушіння, економії електроенергії на 20-30% та економії палива понад 5% порівняно з аналогами. Принцип роботи сушарки полягає в наступному: зерно ковшовим елеватором подається в пристрій розподілу зерна, яке за допомогою шнекового конвеєра рівномірно поширює зерно розкидачем і направляє в бункер кондиціонування та змішування, в якому відбувається вирівнювання вологості зерна, звідки зерно попадає в ІЧ-секцію з низькою температурою гарячого повітря. Зерно циркулює в сушарці завдяки роботі поворотних клапанів,



вибирається нижнім шнековим конвеєром і норія знову доставляє зерно в бункер.

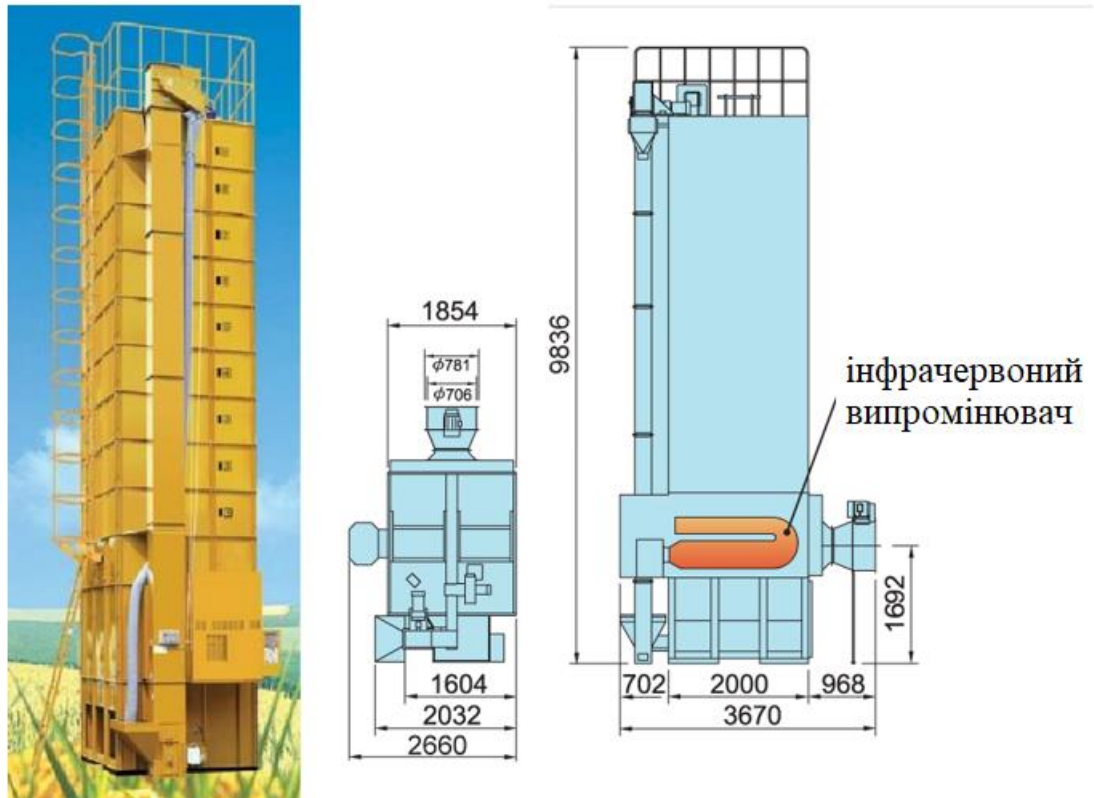


Рис. 1.6 - Циркуляційна інфрачервона сушарка PRIF-120E

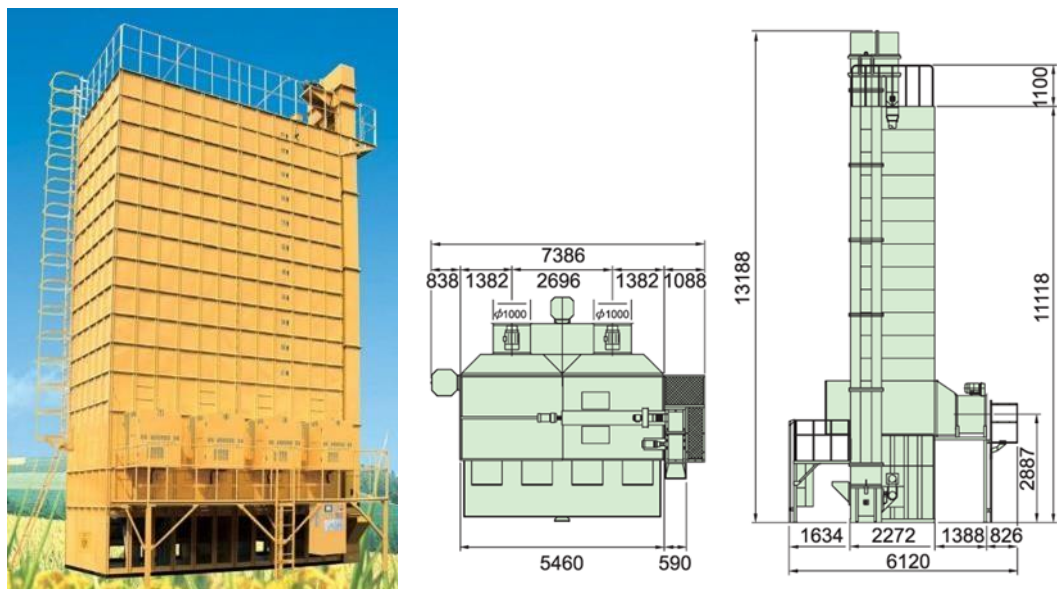


Рис. 1.7 - Циркуляційна інфрачервона сушарка PRIF-500E

Сушильні установки барабанного типу «СБП» (рис. 1.8) застосовують для сушіння зерна, відходів сільськогосподарського виробництва, при виробництві

комбікормів тощо. Завдяки своїй конструкції, сушарки барабанного типу серії «СБП» у 2-3 рази ефективніші за аналогічні за місткістю сушарки інших конструкцій, і, водночас, менш енерговитратні, а також дозволяє уникати застоїв та злипання продукту в процесі роботи та отримати високу якість сушіння навіть для дуже вологих або засмічених матеріалів. Крім цього, сушарки цього типу можуть функціонувати на таких видах палива, як дизельне паливо та природний газ.

Основну частину установки становлять барабан та механізм привода, закріплені на жорсткій рамі-основі. Барабан є міцною конструкцією, звареною з високоякісної сталі, і обладнаною всередині лопатями (полками). Вигляд і розташування лопатей залежить від типу осушуваного продукту. На зовнішньому циліндрі барабана встановлені бандажі, якими він спирається на 4 опорні ролики механізму привода. Ролики розташовані на рамі таким чином, що виключають провисання барабана.

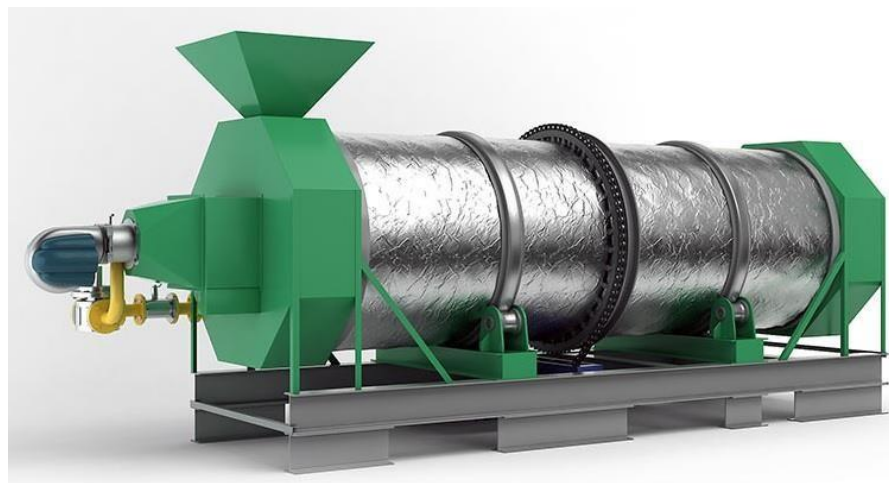


Рис. 1.8. - Сушильна установка барабанного типу серії «СБП»

Матеріал, що сушиться подається в ємність, під якою знаходиться живильник. Живильник дозовано подає сирій матеріал на стрічковий транспортер (конвеєр), який послідовно направляє його до приймальної вирви сушильної установки. Матеріал надходить у передню частину барабана, куди одночасно подається нагріте повітря або нагріті гази від пальника. Проходячи повз барабан, матеріал рівномірно пересипається і висушується в потоці газів. Висушений матеріал надходить у розвантажувальну камеру, звідки прямує на

інші ділянки виробничої лінії. Відпрацьовані гази через циклон димососом відводяться в атмосферу.

Сушарка барабанна СБУ-1,5 безперервної дії (рис. 1.9) може бути використана як для сушіння насіння, зернових культур, так і дисперсних продуктів.

Конструктивно сушарка складається з барабана, з'єданого з бункером-дозатором та теплогенератором. Агентом сушіння виступає нагріте атмосферне повітря в теплогенераторі, який використовує як пальне тверде паливо. Час перебування продукту в сушильній установці здійснюється за допомогою зміни швидкості обертання барабана, а перемішування продукту по довжині установки до місця вивантаження забезпечується розташованими всередині лопатями. Також додаткове переміщення продукту та розподіл потоку сушильного агента забезпечується внутрішнім валом барабана сушильного апарату.



Рис. 1.9. - Сушарка барабанна СБУ-1,5

Технічна характеристика представлена у таблиці 1.8.

Таблиця 1.8

Технічні характеристики сушарок барабанного типу СБУ

Модель	СБУ-1,5-4	СБУ-2,0-7
Тип	Прямоточна з одним теплогенератором	Протиточна з двома теплогенераторами
Продуктивність, т/год	0,3	1,0
Потужність, кВт	3	3
Діаметр барабана, м	1,5	2
Довжина барабана, м	4	7
Габаритні розміри, мм	2000x6000x2000	4000x10000x2000



Високоєфективні сушарки в псевдозрідженому шарі (серія GFG) працюють таким чином: усередині камери підтримується негативний тиск, який витягує повітря знизу верх, пропускаючи його через осушуваний матеріал, і створюючи ефект киплячого шару (рис. 1.10). У цей момент часу мішалка здійснює перемішування дисперсного матеріалу, тим самим сприяючи всебічному осушенню, виключаючи можливість утворення неосушених зон. Сама сировина розташовується на сортувальній, плиті з-під дна якої виривається повітряний потік, підтримуючи матеріал в зрідженому стані.



Рис. 1.10 - Сушарка у псевдозрідженому шарі (серія GFG)

Ця технологія дозволяє за 15 хвилин (один цикл) висушити до 1000 кг сировини. У середньому ж час сушіння за один цикл варіює в інтервалі 20-30 хвилин.

#### 1.4 НВЧ-сушильні установки

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

НВЧ-сушарка серії 6EVS (рис. 1.11) призначена для експлуатації на великих підприємствах з метою примусового прискореного технологічно необхідного просушування сільськогосподарських продуктів та лікарських трав.

Дана сушарка працює від енергетичної мережі з напругою 380В та частою 50Гц. Устаткування сформоване на видовженому жорсткому зварному каркасі, обшитому листовою забарвленою сталлю. Первинна сировина завантажується в приймальний резервуар і простягається транспортером через операційну зону, після виходу з якої скидається в тару для сортування. Як джерело тепла використовується надвисока частота, сушіння здійснюється рівномірно зсередини та зовні. Тунель обладнано спеціалізованим кожухом, що запобігає витоку НВЧ-хвиль і забезпечує безпеку персоналу. Ефективна та малошумна система охолодження значно продовжує термін експлуатації магнетрону та трансформатора.

Технічна характеристика НВЧ-сушарок серії 6EVS представлена в таблиці 1.9.



Рис. 1.11 - НВЧ-сушарка серії 6EVS

Таблиця 1.9

Технічні характеристики НВЧ-сушарок серії 6EVS

Модель	6EVS-12	6EVS-36
Номінальна потужність, кВт	20	45
Продуктивність, кг/година	8-12	30-36
Потужність НВЧ, кВт	12	36
ГЧ-потужність	0	0
Ширина транспортерної стрічки, мм	500	800
Охолодження	Водяне	Водяне
Габаритні розміри, мм	5820×1950×1700	9640×1800×1700
вага, кг	1200	2300 кг

Мікрохвильова установка «Бархан-3» (рис. 1.12) працює таким чином: по транспортеру, який, однак, не входить до комплектації установки, продукт надходить у теплообмінник, де виробляється його попереднє підсушування. Потім на тій же швидкості, без зупинки, підсушений продукт подається в мікрохвильовий модуль установки. Усередині модуля продукт рухається та нагрівається до заданої температури, а потім розвантажується з установки.

Можливість регулювання температури нагрівання та швидкості руху продукту всередині установки забезпечує отримання кінцевого продукту з різним ступенем прожарювання та вологості.

Крім того, оскільки поверхня продукту, що висушується, при виведенні рідини зсередини охолоджується, то всередині продукту температура трохи більша, ніж на поверхні. Внаслідок цього внутрішня рідина прагне вийти зсередини продукту на поверхню, на що впливає також тиск пари всередині продукту.



Рис. 1.12 - Мікрохвильова установка «Бархан-3»

Конструкції НВЧ-установки для сушіння сипких продуктів УМОС-02 (рис. 1.13) складається з прямокутної камери, на якій розташовані два НВЧ магнетрону, які з'єднані з робочою камерою через хвилеводи. Робоча камера розташована на нерухомій рамі з можливістю хитання навколо горизонтальної осі. Усередині робочої камери знаходяться три зустрічно-похилі полиці, виготовлені з матеріалів здатних проводити НВЧ-випромінювання. Переміщення оброблюваного матеріалу відбувається за допомогою надання зворотно-поступального руху робочій камері і частинки матеріалу скочуються похилими поверхнями полиць під дією сили гравітації. У верхній частині робочої камери розташовано пристрій завантаження, а на нижній грані робочої камери – вузол розвантаження, який запобігає виходу НВЧ-випромінювання за межі установки. На торцевих поверхнях апарата присутні вентиляційні перфоровані вікна та люки для можливості проведення екстреного ремонту та миття всередині сушарки. Блок живлення НВЧ магнетронів та управління приводом розташований у нижній нерухомій частині пристрою.

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



Рис. 1.13 - Установка УМОС-02

Установка УМВК-1 (рис. 1.14) призначена для сушіння зерна, фруктів, овочів та ягід. Робота установки здійснюється наступним чином: гаряче повітря попередньо прогріває вихідний продукт і видаляє вологу з поверхні, яка була витіснена з об'єму продукту парами води, що виникли під дією НВЧ поля.

Управління процесом сушіння продуктів здійснюється в автоматичному режимі. Установка складається з таких основних блоків: генератори НВЧ (магнетрони), хвилеводи, сушильна камера установки, стрічковий конвеєр, блок живлення, пульт керування, вентиляційна система.



Рис. 1.14 - Установка УМВК-1

Універсальна установка мікрохвильової вакуумної обробки матеріалів «Джерельце» (рис. 1.15), є сучасним, високотехнологічним обладнанням. Достоїнствами даної установки є можливість виробляти низькотемпературне сушіння продуктів при температурі 30-50°C, що дає можливість сушити критичні продукти 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 у матеріалі сильніше поглинають мікрохвильову енергію та відбувається вирівнювання вологості, що неможливо отримати у таких методах як інфрачервоне та конвективне сушіння. Також установка дозволяє позбутися коморних шкідників, які заводяться в зернових, насіннях, борошні і висівках за допомогою мікрохвильового нагріву.



Рис. 1.15 - Установа «Джерельце»

Сушильна установка АСТ-3 (рис. 1.16) служить для зняття зайвої вологи з насіння олійних та зернових культур, а також інших сипких матеріалів. НВЧ-енергія цієї установки застосовують для прогріву продукту.

Конструкція сушильної установки є вертикальною прямоочною сушильною камерою, що складається з модулів.

Для керування сушильним апаратом потрібен один оператор, який за допомогою блоку керування забезпечує потрібний технологічний режим та здійснює пуск та вимкнення установки. Регулювання відбувається у гранично допустимому діапазоні значень, таких як продуктивність, потужність НВЧ-випромінювання, відсоток вологовиділення під час сушіння тощо.

Основними елементами установки є: завантажувальний бункер, ділянки сушіння, розвантажувального бункера, шнека та системи підведення сушильного агента.

При створенні нових конструкцій сушильних установок з використанням НВЧ-енергопідведення необхідно керуватися такими принципами:

- екологічність протікання процесу;
- необхідний рівень якості висушеного продукту;
- енергоекономічність;
- інтенсивне проведення процесу сушіння;



- низька металомісткість;
- можливість сушіння зерна з підвищеною вологістю та зерна для насіннєвих потреб;
- мінімальний рівень травмованості зерна;
- автоматизація проведення процесу.



Рис.1.16 - Сушильна установка АСТ-3

Наведені установки, безумовно, кожна має набір необхідних конструктивних особливостей, але не може повною мірою забезпечити виконання всіх необхідних умов.

Таким чином напрашується висновок про створення установок нового типу та нових конструкцій.

### 1.5 Вплив НВЧ-енергії на мікробіологічний комплекс зерна

В даний час у зв'язку з погіршенням екологічної обстановки в країні, з'явилася тенденція до наростання великого переліку захворювань пшениці, жита, кукурудзи, рису та інших сільськогосподарських культур з-поміж особливо шкідливих: альтернаріозних, гельмінтоспориозно-фузаріозних інфекцій, головневих, бактерій. Виникла реальна загроза поряд із втратами до

30-40% урожаю отримання продовольчого зерна, що не відповідає вимогам стандарту за рівнем інфікованості та наявністю в ньому токсинів, що продукуються багатьма фітопатогенними грибами, а також спороносними бактеріями, які впливають на якість зерна, борошна та хліба.

У зв'язку з цим виникла потреба в організації високоефективних методів для зменшення біологічної активності зерна та його продуктивних. Одним із можливих шляхів вирішення даної проблеми є застосування методу НВЧ-зnezараження, який поєднує вплив двох полів електромагнітного та теплового.

На підставі проведеного аналізу та результатів роботи доведено, що серед ґрунтових інфекцій переважають наступні види: *Alternaria*, *Bipolaris*, при вирощуванні на різних поживних середовищах гриби швидко утворюють рясний міцелій у разі, якщо температурний інгредієнт невисокий при короткочасному впливі НВЧ протягом 40 с. Це пов'язано з активізацією слабким температурним впливом ростових ферментів спор грибів. При подальшому зростанні навантажень НВЧ-енергії та температури до 60-65°C спори грибів та бактерій втрачають здатність до проростання. Зараженість збудниками цього зводиться до нуля. Спостерігається стійкий зnezаражуючий ефект щодо цього виду польової інфекції при впливі на неї енергії НВЧ-поля.

Аналіз результатів випробувань НВЧ-дії на пшеничні висівки показує, що мінімальна зараженість мікроорганізмами (загальне мікробне число) у висівках пшеничних спостерігається при максимальному часі впливу дорівнює, 60 с та у всіх діапазонах питомої потужності  $P_{\text{пит}} 300 \dots 600 \text{ кВт/дм}^3$ . За потужності  $P_{\text{пит}} 600 \text{ кВт/дм}^3$  спостерігається різке зниження мікроорганізмів до рівня граничних концентрацій 200 КОЕ/г. За потужності 450 кВт/дм<sup>3</sup> та часу 40-20 с, зnezараження має місце, і концентрація мікроорганізмів залишається на рівні 266-1166 КОЕ/г. У варіантах  $P_{\text{пит}} 300 \text{ кВт/дм}^3$  загальне мікробне число залишається на високому рівні межах 600-1333 КУО/г продукту.

Таким чином, на підставі короткого огляду проблематики впливу НВЧ-енергії на мікробіологічний комплекс зерна можна стверджувати, що НВЧ вплив значною мірою сприяє придушенню патогенної мікрофлори в зерні та його продуктах переробки.



## 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 за відношенням до їх колоїдно-фізичних властивостей: типові колоїдні тіла, капілярно-пористі тіла, капілярно-пористі колоїдні тіла. Дослідження вихідних вологих продуктів як об'єктів сушіння є одним із головних напрямів підвищення інтенсивності процесу сушіння, що дасть змогу обирати найраціональнішу конструкцію сушильного апарата, що гарантуватиме необхідний для сушіння час і необхідний активний гідродинамічний режим. Властивості вихідних продуктів як об'єктів сушіння визначаються набором фізико-хімічних, електро і теплофізичних, структурних і технологічних показників.

Тільки знання даних характеристик, а також їх залежностей від часу, температури тощо, дасть змогу провести наукове обґрунтування раціональних методів обробки та оптимального режиму проведення процесу, інженерний розрахунок процесу й апарата з подальшим створенням сучасної системи автоматичного керування.

#### 2.1 Дослідження фізико-механічних властивостей зерна проса

Для правильного вибору інтенсивності пневморезиму і вибору раціональної конструкції елементів розроблюваного сушильного апарату необхідно враховувати набір наступних характеристик дисперсного матеріалу: розмір і форма частинок, щільність і порозність шару, статичний і динамічний кути природного укосу. Отримані залежності дадуть змогу судити про такі

параметри сировини, як транспортабельність, сипучість і злежуваність, а також збереженість. [11, 43].

Густина сипкого матеріалу визначається його хімічним складом, структурою та вологістю. Визначення густини зерна проса здійснювалося під час експерименту на пікнометрі (рис. 2.1) методом гідростатичного зважування.

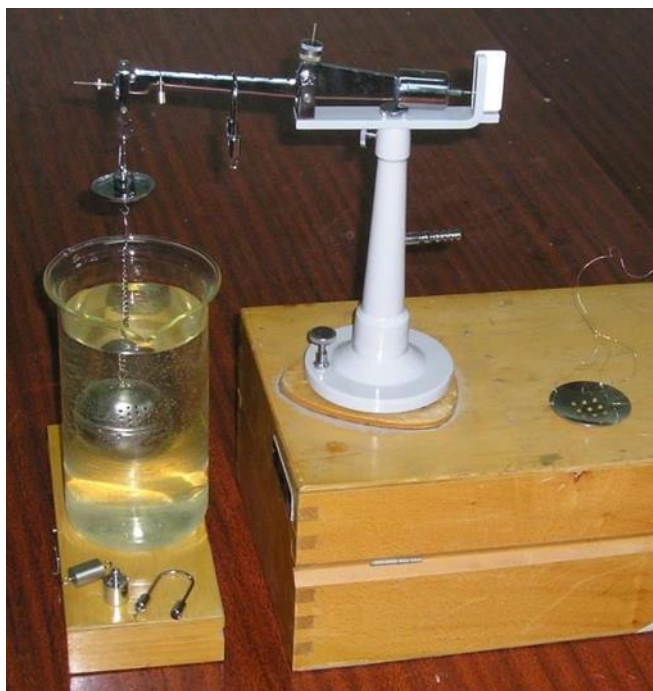


Рис. 2.1 - Пікнометр

Експеримент проводили на підставі ДСТУ у такий спосіб. Відбирали поспіль три наважки масою по 5 г кожна. Зважували на аналітичних вагах і поміщали кожену наважку окремо в сітчастий кошик, виготовлений із білої бляхи завтовшки 0,5...0,7 мм, і закривали кришкою з того самого матеріалу. Безпосередньо до початку експерименту зважували масу кошика з підвісами. Після чого кошик опускали в мірний циліндр, заповнений етиловим ефіром, який перебував у термостаті з температурою води 293 К. Для видалення бульбашок повітря з кошика з продуктом рідина піддавалася перемішуванню. Відзначали показання ваг за допомогою наважок, що навішуються на плече коромисла.

Як остаточний результат експерименту обирали середньо арифметичне за підсумками трьох паралельних вимірювань.

Залежність щільності зерна проса  $\rho$  від вологості  $W^c$  представлена на рис.

2.2

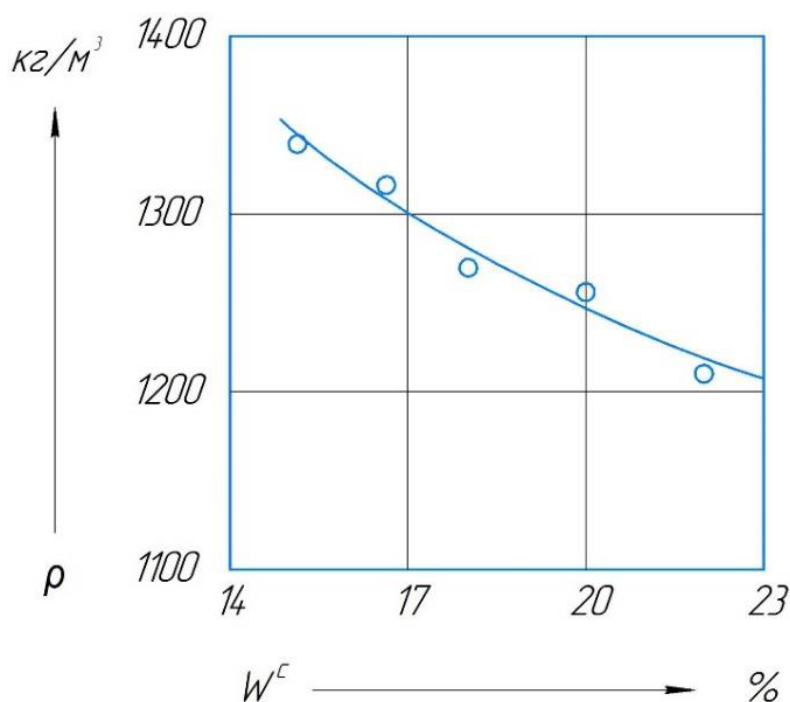


Рис. 2.2 - Залежність щільності зерна проса  $\rho$  від вологості  $W^c$

Отримані дані свідчать про те, що в разі зменшення вологості відбувається збільшення густини, а залежність має виражений криволінійний характер. Це зумовлюється, як якісним станом вологи, так і її кількісним рівнем.

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

Визначення насипної густини здійснювали за допомогою літрової чашки, причому температура навколишнього середовища становила 293 К [42]. Експеримент проводився під впливом сили гравітації для маси частинок.

Результати дослідів залежності насипної густини зерна проса від вологості представлені на рис. 2.3.

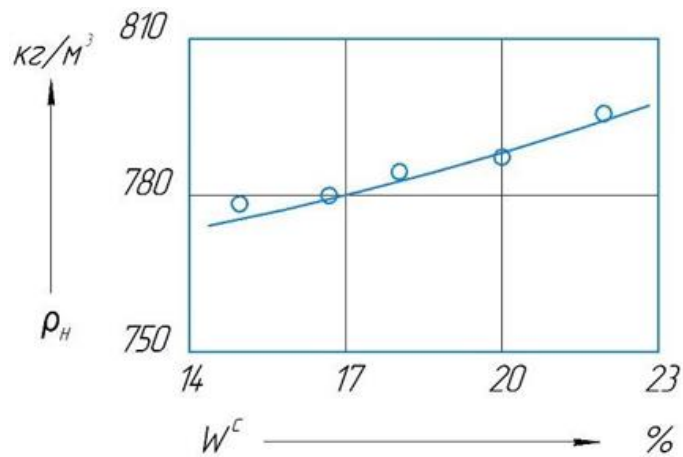


Рис. 2.3 - Залежність насипної густини зерна проса  $\rho_n$  від вологості  $W^c$

Згідно з даними графіка, у разі зменшення вологості  $W^c$  з 22 до 15% відбувається зменшення насипної щільності продукту.

Характеристика матеріалу, що визначається можливістю переміщення однієї частинки відносно іншої під час переміщення всього шару, є кут природного укусу. Іншими словами, це максимальний кут, який утворює вільна поверхня дисперсного продукту з горизонтальною площиною [40].



Рис. 2.4 - Установка для вимірювання кута природного укусу

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

Спосіб обвалення являв собою таке. Зерно проса засипали в прямокутну ємність, після чого відбувалося видалення однієї з бічних поверхонь ємності. У

результаті відбувалося обвалення маси сипкого продукту, а отриманий між горизонтальною поверхнею і схилом дисперсного матеріалу кут був статичним кутом природного укусу.

За способу насипання на горизонтальну рівну поверхню необхідно висипати дисперсний продукт, після чого відбувається зміна кута між горизонтальною поверхнею установки і її основою до початку зсипання продукту з горизонтальної поверхні. Кут, що вийшов таким чином, називають динамічним кутом природного укусу.

Кожен з експериментів проводили по шість разів для забезпечення більш точних результатів. Розбіжність результатів кожного з вимірювань від підсумкового значення перебував у межах допустимих 10%. Підсумкове значення було визначено в результаті середньо арифметичного обчислення. Графічну інтерпретацію отриманих даних представлено на рис. 2.5.

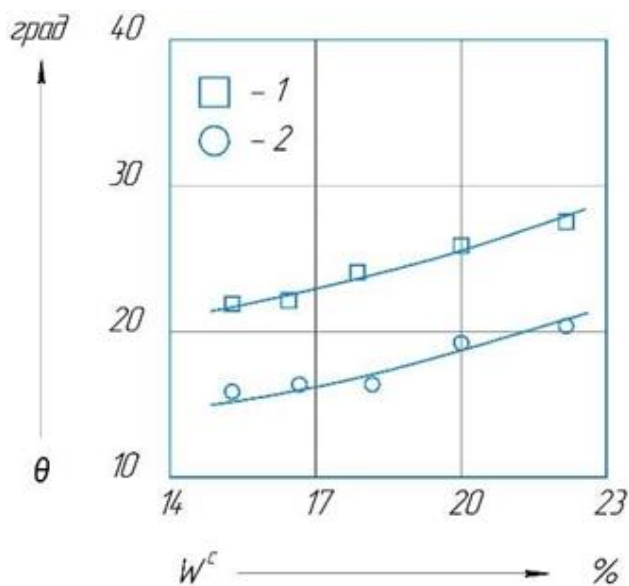


Рис. 2.5 - Залежності кутів природного укусу  $\theta$  зерна проса від вологості  $W^c$ : 1 – статичного, 2 – динамічного

За графічними залежностями можна зробити такий висновок про те, що найбільше значення на величину кутів природного укусу частинок зерна проса має вологість. Це відбувається під впливом молекулярних сил тяжіння плівкової рідини, яка перебуває 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 градуса.

## 2.2 Дослідження теплофізичних характеристик

Теплові характеристики вологих продуктів, такі як теплопровідність, температуропровідність і теплоємність, потрібні для проведення теплових розрахунків сушильного обладнання, оскільки 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 здатністю сприйняття необхідної для сушіння кількості тепла, так і дифузійного опору, що залежить від внутрішньої пористої структури продукту [46]. Крім цього, знання величин теплових характеристик дасть змогу проводити опрацювання експериментальних результатів процесу тепло- і масообміну, установити механізм перенесення тепла у вологому продукті, проаналізувати форми і види зв'язку вологи в матеріалі тощо [18].

Теплофізичні 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 теплофізичних характеристик від температури і вологості продукту, як таких, що мають найбільший вплив на теплопровідність, температуропровідність і теплоємність. Оскільки під час літературного огляду значення вищеназваних характеристик зерна проса відрізняються, слід уточнити їх під час експериментів.

Існуючі на даний момент методи вимірювання теплофізичних характеристик продуктів можна розділити на два типи: стаціонарного і нестаціонарного теплового потоку. Методи, засновані на статичності температурного поля, яке проходить через досліджуваний матеріал під час усього експерименту, називають методами стаціонарного теплового потоку [18]. Характерною особливістю цього методу є тривале проведення експерименту і

«жорстке» виконання граничних умов. Способи нестационарного потоку тепла характеризуються зміною температурного режиму в досліджуваному зразку, при цьому тепловий вплив на продукт короточасний, а градієнт температури досить малий. Як переваги нестационарних методів потрібно відзначити таке: простота, швидка швидкість проведення дослідів, і несуттєвий вплив температурного градієнта на гідродинамічне перебування матеріалу.

Для того щоб визначити теплофізичні характеристики, нами було застосовано метод нестационарного теплового режиму, що базується на вирішенні задачі теплопровідності для початкової стадії процесу, а саме методом двох температурно-тимчасових точок, який дає змогу встановити значення коефіцієнтів температуропровідності і теплопровідності, а також величину питомої теплоємності [18].

Початкова стадія охоплює малі проміжки часу, що характеризуються числом Фур'є  $Fo \leq 0,55$  [88]. При використанні цієї теорії теплопровідності, на початковому етапі, експеримент протікає досить швидко, але це дає позбутися впливу ефекту термовологопровідності на досліджувані теплофізичні характеристики.

Завдання зводиться до спільного розв'язання диференціальних рівнянь теплопровідності для одновимірного досліджуваного матеріалу:

$$\frac{\partial T_M(x, \tau)}{\partial \tau} = \alpha_M \frac{\partial^2 T_M(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (0 < x < h), \quad (2.1)$$

де  $x$  – поточна координата;

$h$  – висота шару досліджуваного матеріалу;

$\tau$  – будь-який момент часу;

$T_M$  – температура досліджуваного матеріалу, К;

$T_{\text{Э}}$  – температура еталона, К.

Визначення теплофізичних характеристик зерна проса відбувалося на вимірювальному пристрої Coesfeld RT-1394H (рис. 2.6).



Рис. 2.6 - Вимірювальна установка для визначення реологічних і теплофізичних характеристик Coesfeld RT-1394H

Базис вимірювальної установки (рис. 2.7) являє собою два коаксіально розташовані циліндри 1 і 2.

Внутрішній циліндр 1 з капролону за допомогою підшипників 9 встановлений співвісно щодо зовнішнього циліндра 2 і складається з трьох коаксіальних циліндричних шарів.

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

Виводи від термоперетворювача опору та електричного нагрівача пропущені через канал на зовнішній поверхні циліндра і підключені до роз'єму 8.

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

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



бронзи. До нижньої його частини прикріплено основу, також із бронзи, що має напівсферичне заглиблення.

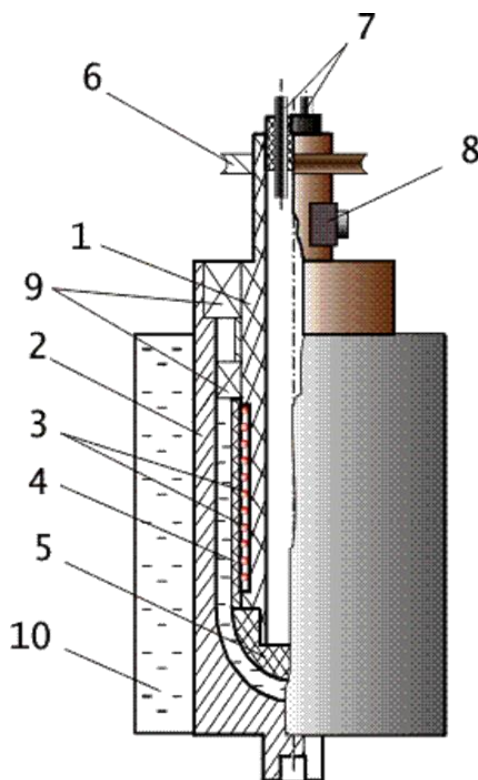


Рис. 2.7 - Конструкція вимірювального пристрою

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 підтримання граничних умов першого роду відповідно до фізичної та математичної моделей вимірювального пристрою.

Функціональна схема вимірювального пристрою з визначення реологічних і теплофізичних характеристик харчових продуктів зображена на рис. 2.8.

Контроль за перебігом проведення випробувань, а також опрацювання отриманої інформації відбувалося за допомогою віртуального приладу, створеного в програмному середовищі LabView 7.0.

Під час проведення досліджень початкову температуру продукту та еталону протягом усього дослідження підтримували постійною.

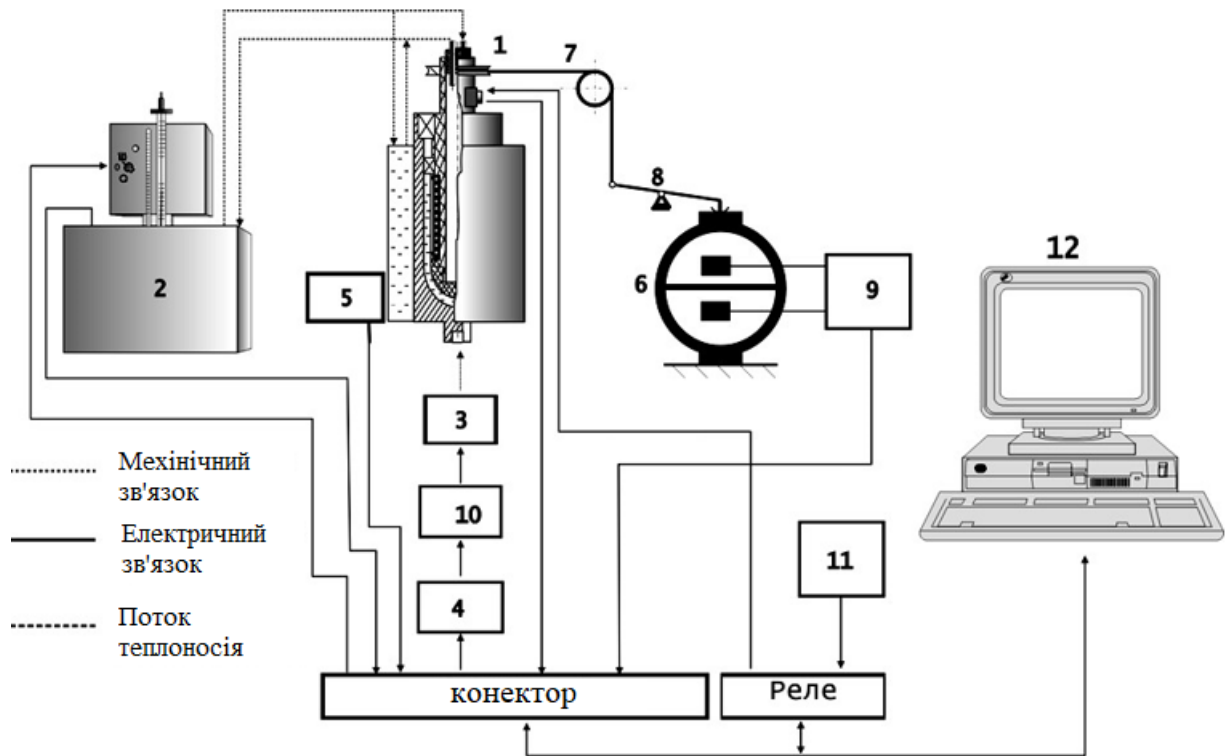


Рис. 2.9 - Функціональна схема вимірювальної установки: 1 – вимірювальний пристрій; 2 – рідинний термостат; 3 – електродвигун постійного струму; 4 – підсилювач потужності У13Н; 5 – перетворювач кутової швидкості обертання зовнішнього циліндра; 6 – віброчастотний перетворювач сили; 7 – трос; 8 – важільна система; 9 – підсилювач; 10 – випрямляч; 11 – блок живлення; 12 – ПК, оснащений багатофункціональною платою збирання даних РСІ МІО-16Е-1

Під час експерименту фіксується час  $\tau_1$  і  $\tau_2$ , протягом якого температура на межі розділу еталонного тіла і досліджуваного зразка досягла заданого значення  $\Delta T_1$  і  $\Delta T_2$  відповідно.

Значення коефіцієнтів температуропровідності та теплопровідності було визначено за емпіричними залежностями, які було отримано в результаті розв'язання системи диференціальних рівнянь, складених для цієї системи двох тіл, при цьому одне з тіл має невідомі теплопровідні властивості. Таким чином, потрібно розв'язати отриману систему диференціальних рівнянь із результатами поведінкових експериментів. Оскільки досліджувані два тіла стикаються по одній загальній площині, то за принципами математичної фізики можна скласти

два диференціальних рівняння з єдиними початковими і граничними умовами першого роду, зумовленими параметрами дослідження, який проводять.

Знайдені значення коефіцієнтів теплопровідності, теплоємності та питомої теплоємності в інтервалі температур 293...393 К для зразків зерна проса вологовмістом 15...23%. Відносні похибки визначення  $\alpha$  і  $\lambda$  не перевищували 1%. Результати опрацювання експериментів подано на рис. 2.10-2.12.

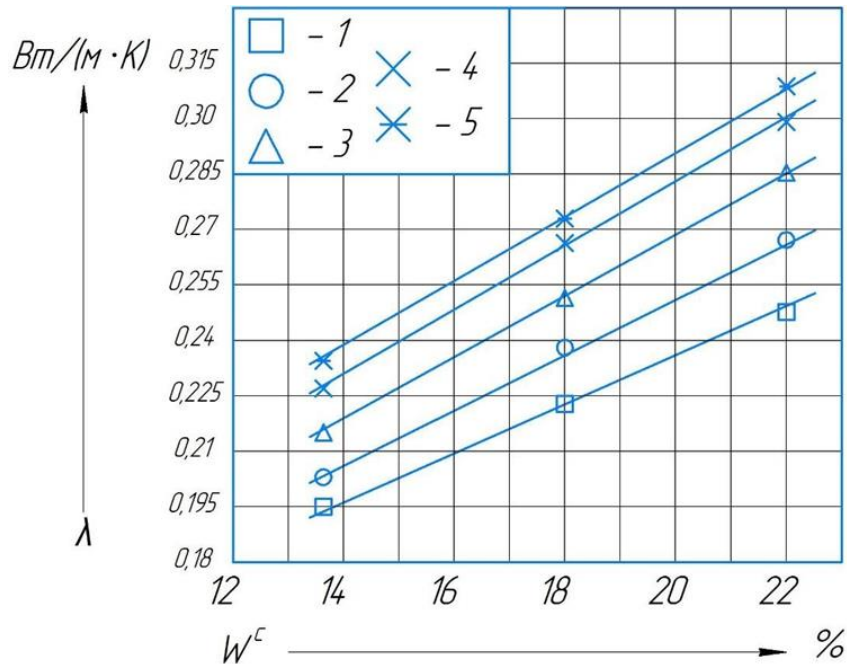


Рис. 2.10 - Залежність коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$ , Вт/(м·К), від вологовмісту  $W^c$  при: 1 –  $T = 293$  К; 2 –  $T = 313$  К; 3 –  $T = 333$  К; 4 –  $T = 353$  К; 5 –  $T = 373$  К

З графіків видно, що при збільшенні температури, коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  і питома теплоємність  $c$  монотонно зростають, а коефіцієнт температуропровідності  $a$  – монотонно спадає. Дані експерименту було оброблено за допомогою програмного середовища, що дає змогу отримати залежності теплофізичних характеристик від вологовмісту в інтервалі 15-23% і діапазоні температур 293-373 К.

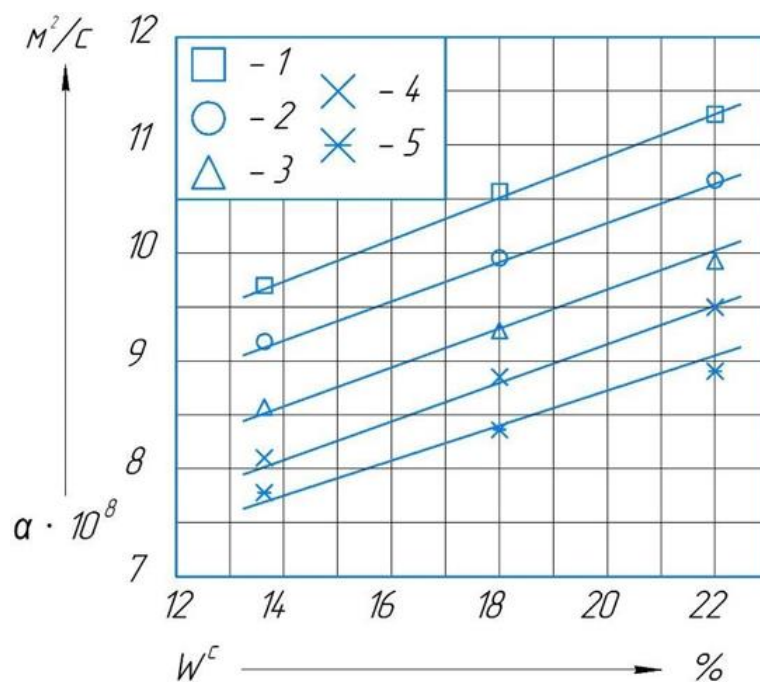


Рис. 2.11- Залежність коефіцієнта температуропровідності  $\alpha \cdot 10^8$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ , від вологості  $W^c$  при: 1 –  $T=293$  К; 2 –  $T=313$  К; 3 –  $T=333$  К; 4 –  $T=353$  К; 5 –  $T=373$  К

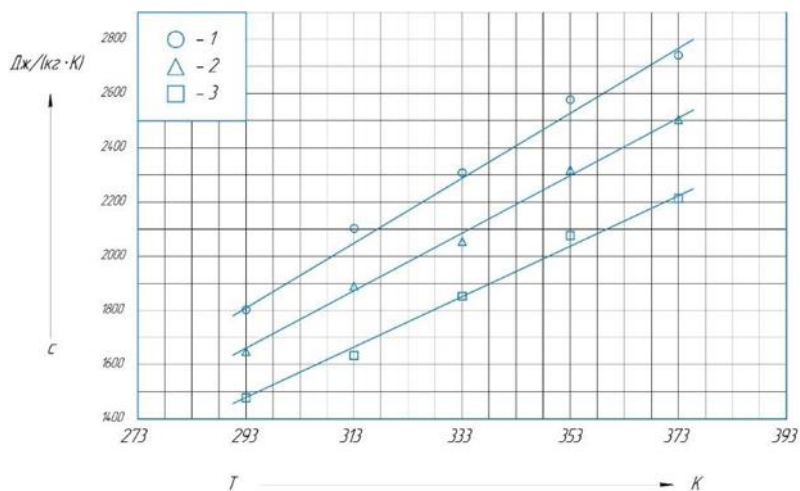


Рис. 2.12 - Залежність коефіцієнта питомої теплоємності  $c$ ,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ , від температури  $T$  при: 1 –  $W^c = 23\%$ ; 2 –  $W^c = 19\%$ ; 3 –  $W^c = 15\%$

### 2.3 Дослідження електрофізичних властивостей зерна проса

Під час розроблення апаратів, що використовують НВЧ-випромінювання, потрібне знання діелектричних властивостей продукту, що піддається опроміненню. З цієї причини виникла необхідність визначення коефіцієнта

діелектричних втрат зерна проса від різних чинників.

Нині існує велике різноманіття способів визначення діелектричних параметрів різних матеріалів у широкому діапазоні НВЧ-випромінювання. Традиційними методами виступають: резонансні, хвилевидні, метод вільних хвиль і методи, засновані на використанні повільних хвиль [50]. У даній роботі застосовувався метод, що базується на застосуванні так званих повільних хвиль, іншими словами експрес-метод порівняння, який дає змогу виміряти діелектричні параметри, такі як коефіцієнт діелектричних втрат  $\epsilon''$  для харчових продуктів з необхідною для інженерних розрахунків точністю. Усі вимірювання зводяться до порівняння швидкості нагріву досліджуваного зразка й еталона (води) за однаковий період часу з урахуванням маси й теплоємності зразка, а також коливальної потужності, що вводиться в робочу камеру [72].

Дослідження проходили на мікрохвильовій печі «VITEK VT-1681» з частотою 2450 МГц і максимально допустимою потужністю НВЧ-енергії 1500 Вт. Еталоном при дослідженні виступала дистильована вода. Як еталон використовували дистильовану воду. Було проведено кілька серій дослідів з НВЧ-нагріву води та наважок зерна проса, взятих у рівному об'ємі, за певний незмінний період часу. Температуру нагрівання еталона і зразка контролювали за допомогою мультиметра М-838. Датчиками вимірювання температури слугували хромель-копелеві термопари з діаметром термоелектродів 0,2 мм.

Середня за деякий проміжок часу питома активна потужність, розсіяна в одиниці об'єму даного матеріалу у вигляді теплоти, визначається відповідно до закону Джоуля - Ленца.

Порівняння швидкості нагріву  $dT/dt$  еталона і зразка, а також спільне розв'язання рівнянь дає змогу виявити залежність значень коефіцієнта діелектричних втрат зерна проса від різних чинників.

Отримання чисельних значень коефіцієнта діелектричних втрат зерна проса відбувалося в інтервалі вологості 15...22%, при чому для отримання зерна проса певної вологості здійснювали підсушування на конвективній сушарці. Для виявлення температурних закономірностей  $\epsilon''$  експерименти проходили за різних

температур в інтервалі 293...353 К, при цьому зерно проса завчасно піддавали термостатуванню в шафі з автоматичною підтримкою температури.

Залежність зміни коефіцієнта діелектричних втрат  $\varepsilon''$  зерна проса за частоти електромагнітного поля  $f = 2450$  МГц від вологості  $W^c$  за різних температур представлена на рис. 2.13.

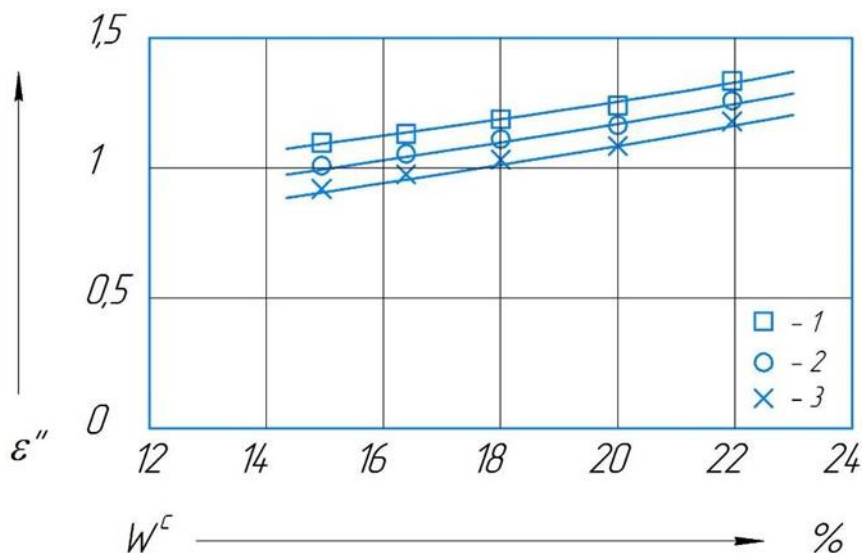


Рис. 2.13 - Залежність зміни коефіцієнта діелектричних втрат  $\varepsilon''$  зерна проса при частоті ЕМП  $f=2450$  МГц від вологості  $W^c$ : 1 –  $T=293$  К, 2 –  $T=323$  К, 3 –  $T=353$  К

На підставі графічної залежності, представленої на рис. 2.13, значення  $\varepsilon''$  значною мірою залежить від вологості, тобто вода відіграє основну роль у процесі поглинання енергії під час діелектричного нагрівання [71], при чому різноманітністю форм зв'язку вологи в зерні проса визначає не лінійний характер отриманої залежності.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА

### 3.1 Опис експериментальної установки та методика проведення експерименту

Схему експериментальної установки для дослідження процесу сушіння зерна проса представлено на рис. 3.1.

Основною частиною експериментальної сушильної установки слугує конічно-циліндрична камера 1, до якої за допомогою патрубків 3 і 4 здійснюється підведення сушильного агента, відповідно, тангенціального й осьового потоків. Сушильним агентом у цій установці є повітря, нагрівання якого здійснюється калориферами 7 і 8. Також відмінною особливістю даної установки є спосіб завантаження зерна проса в конічно-циліндричну камеру, а саме безпосередньо через патрубок подачі тангенціального потоку сушильного агента.

Організація експериментальної установки полягає в таких заходах.

Перед початком сушіння установку необхідно вивести на технологічний режим. Для цього необхідно здійснити прогрів установки. За допомогою терморегуляторів 12 встановлюють необхідну температуру, як правило, 325 К і вмикають частотні перетворювачі 11, далі регулюють на швидкість руху теплоносія 2 м/с, що дасть змогу забезпечити циркуляцію повітря і запобігти перегріванню калориферів 7 і 8.

Після прогрівання сушильної установки зерно проса початкової вологості  $W^c=22\%$  завантажують у живильний пристрій 2. За допомогою частотних перетворювачів встановлюємо необхідне співвідношення швидкостей осьового і тангенціального потоків теплоносія. Співвідношення швидкостей встановлювали відповідно до попередньо проведених експериментів, що забезпечує знаходження шару зерна в підвішено-закрученому стані.

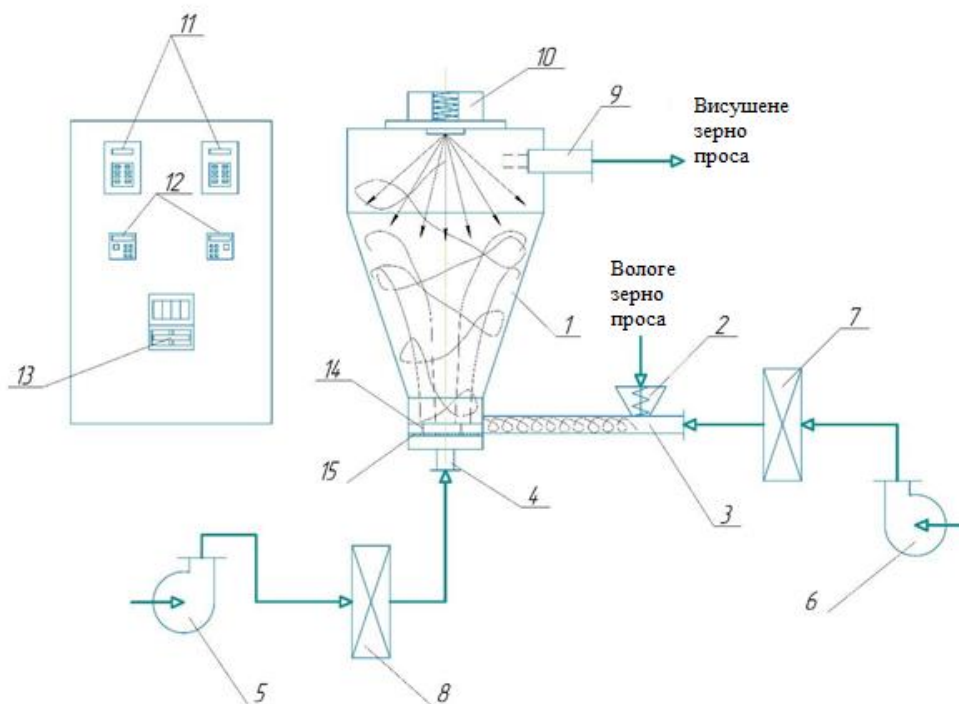


Рис. 3.1 - Схема експериментальної установки для сушіння зерна проса в апараті із закрученими потоками теплоносія та НВЧ-енергопідведенням: 1 – конічно-циліндрична камера, 2 – живильний пристрій, 3, 4 – патрубки, 5, 6 – вентилятори, 7, 8 – калорифери, 9 – розвантажувальний патрубок, 10 – НВЧ-блок, 11 – частотні перетворювачі, 12 – терморегулятори, 13 – електролічильник, 14 – пристрій завихрення, 15 – решітка

Після проведення всіх заходів установка повністю готова до роботи, відкривається живильний пристрій 2 і зерно проса починає переміщатися по патрубку 3. У цей же час вмикається НВЧ-блок 15 із заданою потужністю НВЧ.

У нижній частині конічно-циліндричної сушильної камери розташований пристрій завихрення 14, що прикріплений до решітки 15, що слугує для утримування зерна проса в разі екстреної зупинки експериментальної установки та рівномірного розподілу осевого потоку. Основним завданням пристрою завихрення 14 є формування закрученого потоку зерна проса на початковому етапі роботи установки. Просо, потрапляючи в пристрій завихрення, під вплив осевого і тангенціального потоків сушильного агента починає підйом по висоті камери 1, водночас що вище піднімається зерно



проса, то менша його поточна вологість, тим більший вплив чинить на нього НВЧ-енергія, випромінювана з НВЧ-блока.

Вивантаження висушеного зерна проса здійснюється через розвантажувальний патрубок 9.

Задану температуру теплоносія, що підводиться в сушильну установку, підтримують автоматично за допомогою одноканальних регуляторів вимірювачів ОВЕН ТРМ10, вимірювання швидкості повітря на вході та виході з сушильної камери здійснювали багатофункціональним приладом SKYWATCH ATMOS. Регулювання витрати повітря здійснюється частотними перетворювачами E2-8300.

Дослідження кінетики сушіння зерна проса проводили в стаціонарному режимі, параметри агента сушіння в кожному експерименті підтримували на одному рівні в інтервалі значень: витрата осьового потоку змінювалася від 100 до 200 м<sup>3</sup>/год; витрата тангенціального потоку від 50 до 100 м<sup>3</sup>/год; температура на вході в камеру – від 318 до 333 К.

На рис. 3.2 зображено загальний вигляд апарата для сушіння зерна проса із закрученими потоками теплоносія та НВЧ-енергопідведенням.

Сушильний НВЧ-апарат складається з конічно-циліндричної сушильної камери 1, у нижній частині якої розміщений пристрій, конструктивно виконаний у вигляді равлика 2, що має у своєму розпорядженні живильник 3, патрубок 4 подачі тангенціального потоку теплоносія та ділянку розгону 5 для отримання газонакопичуваного газового зависання, патрубок 6 для підведення осьового потоку теплоносія, викладений вздовж осі камери та концентрично встановлений у ньому завихрювач 7. Над завихрювачем встановлено решітку 8. Циліндрична частина 9 конічно-циліндричної сушильної камери 1 містить вікно 10 і патрубок 11 для виведення висушеного матеріалу і відпрацьованого теплоносія. Над циліндричною частиною 9 концентрично встановлений НВЧ-випромінювач (магнетрон) 12 таким чином, щоб найбільша щільність потоку електромагнітної енергії була зосереджена в зоні кільцевого шару, що обертається, частинок дисперсного матеріалу, які висушуються. Утримувальна

решітка 8 слугує для запобігання зсипанню зерен проса в повітропровід у разі виникнення потреби в зупинці сушарки під час її роботи.

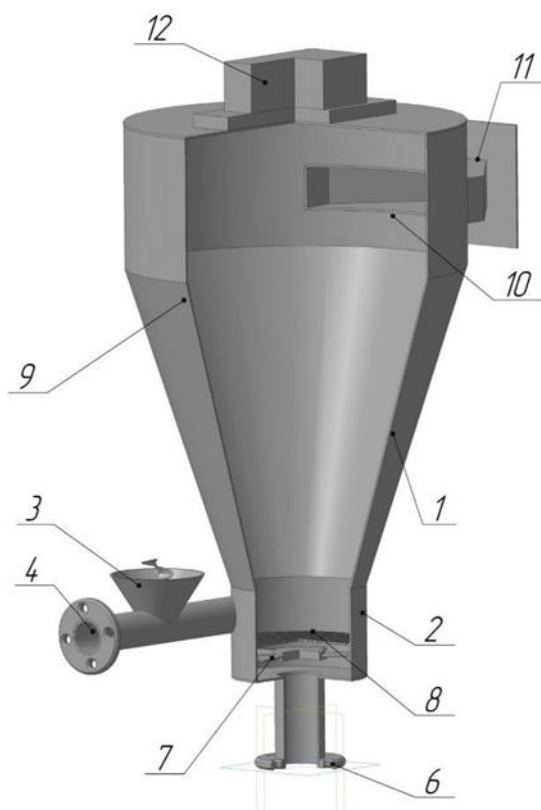


Рис. 3.2 - Загальний вигляд апарата для сушіння зерна проса із закрученими потоками теплоносія та НВЧ-енергопідведенням

Робота сушильного апарата здійснюється таким чином. Вихідне вологе зерно проса 3 подається в ділянку розгону 5. У цей же час через патрубок 4 подачі тангенціального потоку теплоносія в ділянку розгону 5 також починає надходити нагрітий теплоносій.

Отримана газосуспензія зерна проса і теплоносія спрямовується до равлика 2. Одночасно з газосуспензією в равлик 2 починає надходити осьовий потік теплоносія з патрубка 6. Необхідно також зазначити, що равлик 2 має в своєму розпорядженні завихрювач 7, необхідний для посилення утвореного закрученого потоку до необхідної закрутки.

Зерна проса в міру зниження вологості піднімаються у верхню циліндричну частину 9 камери 1 сушильного апарату, де під впливом НВЧ-випромінювання відбувається значне підвищення тепломасообміну процесу

сушіння. НВЧ-випромінювання забезпечується магнетроном 12, який встановлено з розрахунком на те, щоб максимум густини потоку електромагнітної енергії було спрямовано на утворений рухом закручених потоків теплоносія кільцевий шар зерна проса в сушильній камері, що дає змогу знизити температуру теплоносія від 20 до 40°C порівняно з суто конвективними способами підведення тепла.

Швидкості потоків теплоносія та їхнє відношення потрібно підібрати так, щоб сухе зерно проса і відпрацьований теплоносій виводилися з апарата 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 їхнім відношенням. За рахунок зміни тангенціальної складової потоку теплоносія можна домогтися максимальної рівномірності закручування потоку зерна і теплоносія, а змінюючи осьову складову потоку теплоносія, можна регулювати час перебування зерна в апараті, тим самим значно інтенсифікувати тепломасообмінні процеси за інших рівних параметрів сушіння.

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

### 3.2 Багатофакторний статистичний аналіз процесу сушіння проса в НВЧ-апараті із закрученими потоками теплоносія

Для вивчення взаємодії різних чинників, що впливають на перебіг процесу сушіння проса в НВЧ-апараті із закрученими потоками теплоносія були застосовані математичні методи планування експерименту [3]. 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, що дорівнює середній величині відгуку за умови, що чинники, які розглядаються, перебувають 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 міжфакторних взаємодій, що показують характер зміни ступеня впливу одного фактора при зміні величини іншого;

$a_{ii}$  – коефіцієнти квадратичних взаємодій, що визначають відхилення від лінійності вихідного параметра під час впливу розглядуваних факторів;

$N$  – число факторів у матриці планування експерименту.

Основними факторами, що впливають на проведення процесу сушки проса в сушильному апараті с НВЧ енерго підведенням, були вибрані:  $T_v$  – температура повітря, що подається в сушку, К;  $V_{oc}/V_t$  – 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  $W_n^c$ , %;  $q_{пит}$  – потужність підведення НВЧ енергії віднесеної до одного кілограма продукту, завантаженого в сушарку, кВт/кг.

Ці чинники сумісні та некорельовані між собою. Провівши аналіз їхнього взаємного впливу на процес, можна підібрати оптимальні режими процесу сушіння проса в сушильній установці із закрученими потоками теплоносія і НВЧ енергопідведенням. Межі зміни досліджуваних чинників, представлені в табл. 3.1, приймали виходячи з технологічної можливості сушильної установки, попереднього експерименту та літературних даних

Таблиця 3.1

Межі зміни вхідних факторів

Умови планування	Значення факторів у точках плану			
	T <sub>в</sub> , К	$\frac{v_{oc}}{v_t}$	W <sub>н<sup>c</sup></sub> , %	q <sub>пит</sub> , 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

Температура проса на виході із сушильного апарату та 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 приймали постійною величиною, яка становила 17,0%.

Вибір інтервалів зміни чинників зумовлений технологічними особливостями процесу сушіння проса і технічними характеристиками сушильної установки з НВЧ підведенням енергії. Критеріями оцінки впливу різних вхідних чинників на процес сушіння проса було обрано: Y<sub>1</sub> – кінцева вологість зерна проса по відношенню до абсолютно сухої речовини, %; Y<sub>2</sub> – напруга об'єму сушильної камери за випареною вологою, кг<sub>вл</sub>/(м<sup>3</sup>·год).

Напруга об'єму сушильної камери за випареною вологою є важливим техніко-економічним показником оцінки роботи сушильних установок різних типів. З його допомогою легко визначали продуктивність установки за вологим і сухим продуктом.

Статистичне опрацювання експериментальних даних дало змогу отримати регресійні рівняння, які адекватно описують процес сушіння в діапазоні досліджуваних факторів:

$$Y_1 = 11,828 + 0,732x_1 - 0,668x_2 + 1,567x_3 - 0,842x_4 - 0,0695x_1x_2 + 0,042x_1x_3 + 0,104x_1x_4 + 0,067x_2x_3 - 0,203x_2x_4 - 1,027x_3x_4 + 0,137x_1^2 + 0,053x_2^2 + 0,304x_3^2 + 0,012x_4^2; \quad (3.2)$$

$$Y_2 = 29,432 + 3,304x_1 + 5,939x_2 - 0,281x_3 - 1,203x_4 + 0,442x_1x_2 + 0,543x_1x_3 + 0,543x_1x_4 - 0,537x_2x_3 - 7,716x_2x_4 + 10,001x_3x_4 + 0,029x^2 - 0,926x_2^2 + 0,512x_3^2 - 0,304x^2. \quad (3.3)$$

Провівши аналіз рівнянь регресії можна визначити фактори, які мають найбільший вплив на досліджуваний процес. Співвідношення коефіцієнтів, що стоять перед лінійними членами, що показує значущість параметрів, показало, що кінцева вологість зерна проса найбільшою мірою залежить від початкової вологості вихідного зерна і найменшою – від відношення швидкостей потоків теплоносія, що подається в сушарку за заданих параметрів процесу. Ступінь впливу параметрів відносно один одного  $a_3:a_2 = 2,345$ , при цьому від'ємний знак перед коефіцієнтом при лінійних членах вказує на те, що при збільшенні вхідного параметра значення вихідного параметра зменшується.

### 3.3 Вплив основних факторів на кінетику процесу сушіння зерна проса в НВЧ-апараті із закрученими потоками теплоносія

У результаті застосування методу статистичного планування експерименту ми проводили дослідження кінетики процесу сушіння проса в експериментальній вихровій НВЧ-сушарці (рис. 3.2). У результаті отриманих даних було визначено час сушіння проса, відповідний до визначеної вологості  $W^c$  зерна проса.

Найбільшою актуальністю при створенні технології з сушіння термочутливих продуктів, було завдання щодо встановлення однозначних залежностей між вологістю і температурою матеріалу в процесі видалення вологи. Характерною особливістю під час вивчення кінетики процесу сушіння для багатьох харчових продуктів залежно від температури є обмеження температурного інтервалу, в діапазоні якого можна збільшувати тепло- і масоперенос, унаслідок небезпеки погіршення якості готового продукту у зв'язку з його перегріванням. Тому доводиться враховувати безліч параметрів при виборі максимально допустимих значень температур при проведенні процесу.

Кінетичні закономірності процесу сушіння зерна проса та термограми залежно від температури представлені на рис. 3.3 і 3.4.

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

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

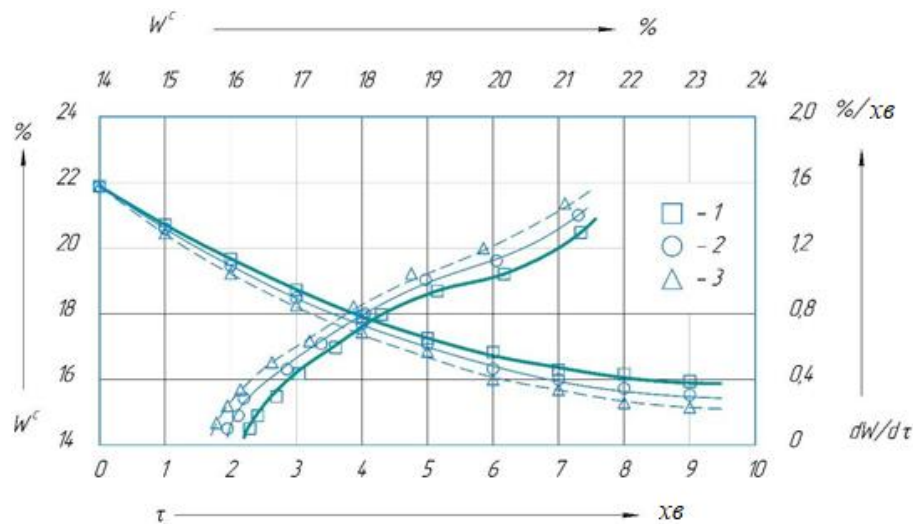


Рис. 3.3 - Криві сушіння і швидкості сушіння зерна проса при  $W^c=22\%$ ,  $V_{oc}/V_{\tau}=1,5$  і  $P_{НВЧ}=550$  Вт залежно від температури: 1 –  $T=333$  К; 2 –  $T=325$  К; 3 –  $T=318$  К

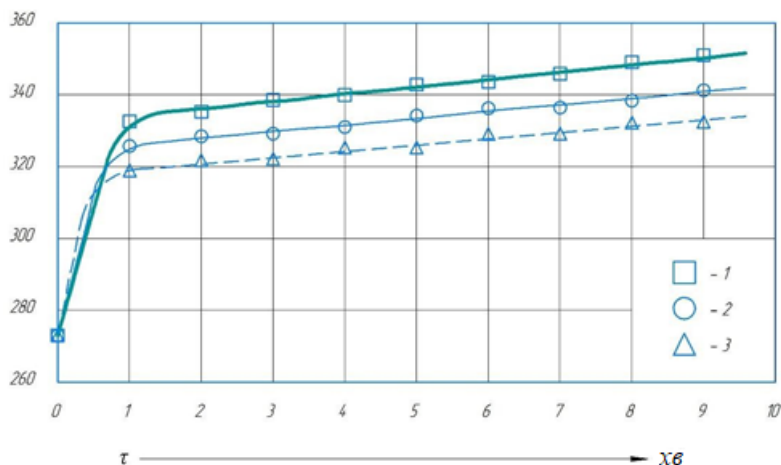


Рис. 3.4 - Термограми зерна проса під час  $W^c = 22\%$ ,  $V_{oc}/V_{\tau}=1,5$  і  $P_{НВЧ} = 550$  Вт залежно від температури: 1 –  $T= 333$  К; 2 –  $T=325$  К; 3 –  $T=318$  К

Зазначимо, що застосування високих температур під час сушіння зерна проса можливе руйнування оболонки через різкий перехід вологи всередині продукту в газоподібний стан.

### 3.4 Дослідження впливу підведеної НВЧ-потужності на процес сушіння

Кінетичні закономірності сушіння зерна проса залежно від НВЧ-потужності, що підводиться подано на рис. 3.5.

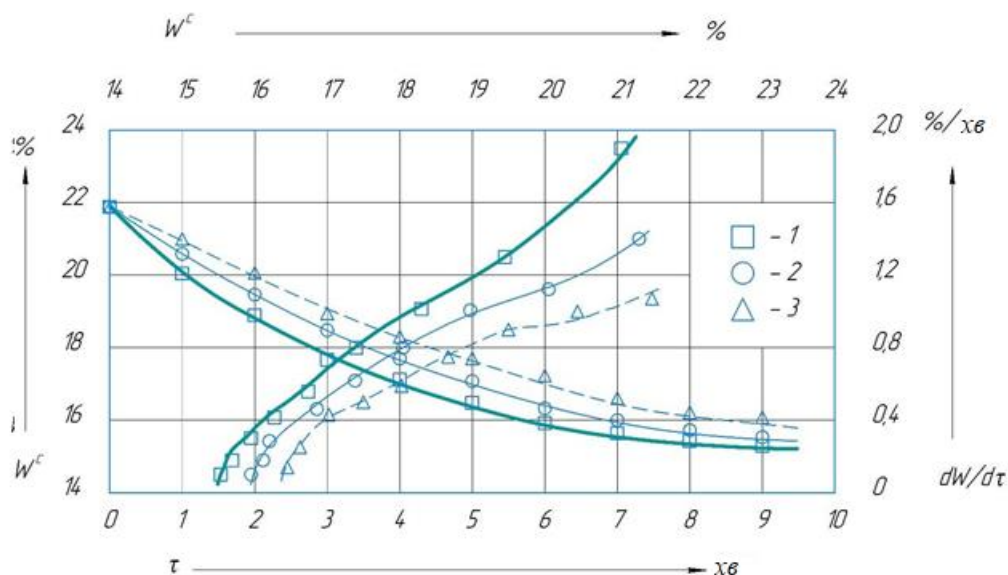


Рис. 3.5 - Криві сушіння і швидкості сушіння зерна проса при  $W^c=22\%$ ,  $T=325$  К і  $V_{oc}/V_{\tau} = 1,5$  залежно від НВЧ-потужності: 1 –  $P_{НВЧ} = 1000$  Вт; 2 –  $P_{НВЧ} = 550$  Вт; 3 –  $P_{НВЧ} = 150$  Вт



З графіків видно, що НВЧ-потужність має найбільш значний вплив на кінетику сушіння, як і температура теплоносія. Характерною особливістю впливу НВЧ-енергії від впливу температури теплоносія на матеріал слугує те, що підведена НВЧ-потужність 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, проте відповідно до закону Джоуля-Ленца ефективність перетворення енергії змінного електромагнітного поля на теплоту пропорційна квадрату напруженості електромагнітного поля, тому збільшення підведеної НВЧ-потужності сприяє збільшенню ККД процесу трансформації НВЧ-енергії.

Слід зазначити, що в разі підвищення потужності НВЧ відбувається інтенсивніший набір температури продукту, що в разі її істотного підвищення можливе перегрівання продукту.

## РОЗДІЛ 4

### ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ СУШІННЯ ЗЕРНА ПРОСА

#### 4.1 Математична модель

Процес НВЧ-сушіння зерна проса у зважено-закрученому шарі є надзвичайно складним з погляду фізико-математичного опису. Модель має відтворювати механічний рух двох різних середовищ (газоподібне середовище – теплоносії і сипке середовище – зерна проса), взаємодію середовищ одне 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]. Однак, спираючись на можливості сучасної обчислювальної техніки, з'являється можливість створити комплексну високоадекватну модель процесу.

Унаслідок цього в нашій роботі поставлено завдання розробити математичну модель процесу НВЧ-сушіння зерен проса у зважено-закрученому шарі, що має високу деталізацію і високу адекватність, базується на класичних методах моделювання та фізико-математичного опису, але використовує повною мірою обчислювальні можливості сучасних комп'ютерів [37].

Розроблена модель має описувати цілу низку фізичних процесів, що протікають під час НВЧ-сушіння зерна проса у зважено-закрученому шарі:

- механічна поведінка теплоносія в сушильній камері;
- механічна поведінка системи зерен проса, як сипкого середовища;
- внутрішній тепло- і вологообмін усередині зерна проса;
- тепло- і вологообмін з теплоносієм і сусідніми зернами проса.

Кожен процес у пропонованій моделі описується відповідними диференціальними рівняннями та алгебраїчними залежностями.

## 4.2 Опис у моделі зерен проса

Кількість зерна проса, що одночасно перебувають у сушильній камері, становить близько  $10^4$ . Для моделювання механічної поведінки системи зерен проса, як сипкого середовища, використовують метод динаміки частинок, який в останні десятиліття широко застосовують у різних напрямках наукової та технічної думки [26]. Метод полягає у розв'язанні рівнянь руху безлічі окремих сферично-симетричних частинок (зерен проса), які зазнають силового впливу з боку сусідніх частинок, потоку теплоносія, стінок сушильної камери (рис. 4.1).

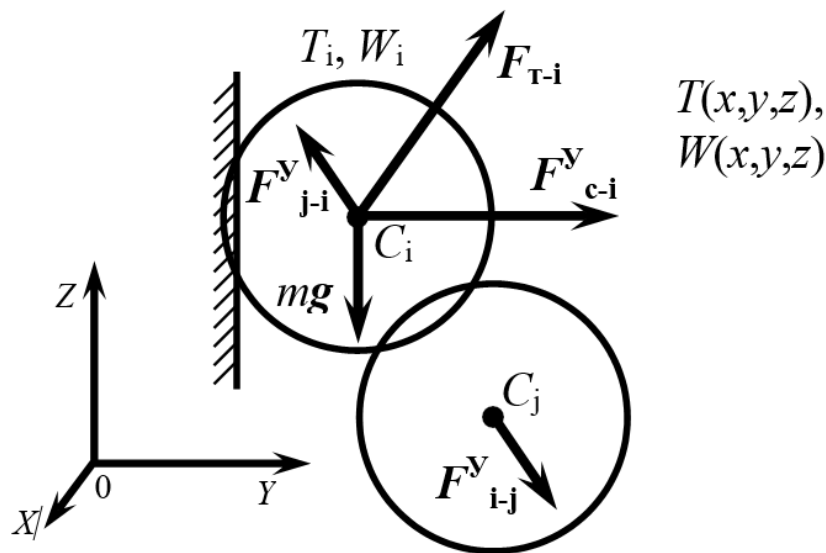


Рис. 4.1 - Сили, що діють на зерно проса в сушильній камері

$$x_i^{\tau+1} = x_i^{\tau} + v_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{xi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; \quad v_{xi}^{\tau+1} = v_{xi}^{\tau} + a_{xi}^{\tau} \cdot \Delta t;$$

$$y_i^{\tau+1} = y_i^{\tau} + v_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{yi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; \quad v_{yi}^{\tau+1} = v_{yi}^{\tau} + a_{yi}^{\tau} \cdot \Delta t;$$

$$z_i^{\tau+1} = z_i^{\tau} + v_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t + a_{zi}^{\tau} \cdot (\Delta t)^2 / 2; \quad v_{zi}^{\tau+1} = v_{zi}^{\tau} + a_{zi}^{\tau} \cdot \Delta t,$$

(4.1)

де  $i$  – номер насінини проса;

$\tau$  і  $\tau + 1$  – індекси поточного і наступного часового кроку;

$\Delta t$  – 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

насінини.

У моделі прийнято такі припущення:

- у межах одного зерна проса речовина вважається суцільним середовищем;
- зерна проса рухаються за законами класичної динаміки, механічно взаємодіючи між собою і з робочими поверхнями сушильної камери;
- механічна взаємодія між зернами проса і з поверхнями сушильної камери має лінійний в'язко-пружний характер;
- тепло- і вологоперенесення між зернами проса і теплоносієм описується відповідними рівняннями в загальноприйнятій формі;
- температура і вологість теплоносія постійні в просторі та в часі;
- теплоносій є суцільним середовищем і підпорядковується рівнянням Нав'є-Стокса;
- виконується лінійний зв'язок між густиною і тиском теплоносія в локальному об'ємі.

#### 4.3 Вплив параметрів процесу сушіння на його 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 у потоках теплоносія із взаємодією зерен між собою та стінками сушильної камери;
- впливу НВЧ-випромінювання.

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

Крива сушіння  $W(t)$  загалом має експоненціальний вигляд (рис. 4.2, *a*). Відхилення від експоненціального закону спостерігається в інтервалі часу 2-6 хв

і відбувається завдяки додатковому нагріванню зерна НВЧ-випромінюванням. Завдяки НВЧ-нагріву температура зерна швидко підвищується до максимально допустимої (350 К, рис. 4.2, в), що дає змогу швидко довести вологообмін до максимально ефективного рівня. Після цього температура зерна поступово знижується, оскільки насіння, що втрачає вологість, менше нагрівається під дією НВЧ-випромінювання, а відведення температури потоком теплоносія залишається на колишньому рівні (рис. 4.2, в).

Тому використання НВЧ-нагріву дає змогу змінити експоненціальний 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 остаточне сушіння зерна з 16% до 15,5% за практично експоненціальним законом (рис. 4.2, а).

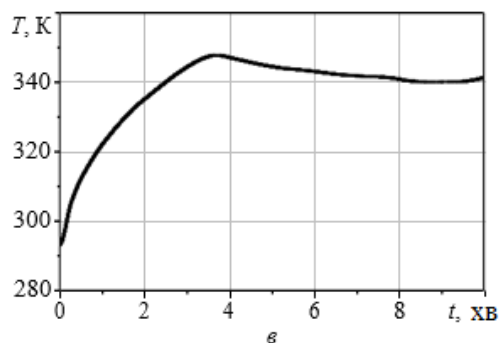
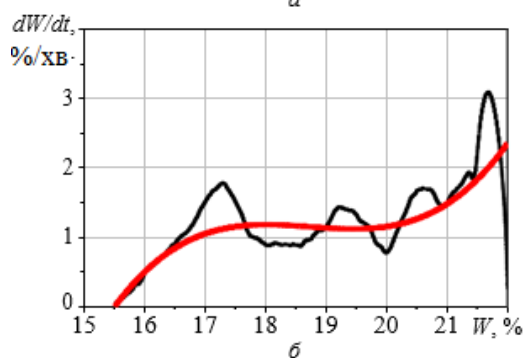
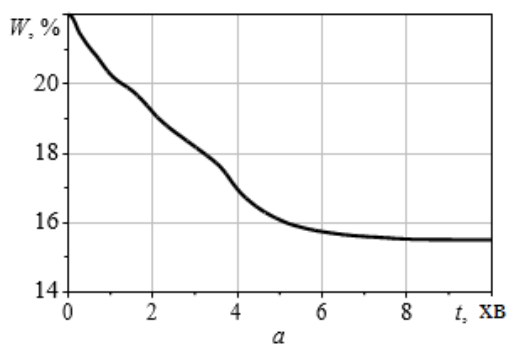


Рис. 4.2 - Зміна в процесі сушіння проса: а – вологості; б – швидкості сушіння; в – температури

Графік залежності швидкості сушіння  $dW/dt$  від вологості  $W$  має характерний для таких процесів S-подібний вигляд (рис. 4.2, б). Через те, що розглянутий процес сушіння складається з безлічі окремих взаємопов'язаних процесів, залежність  $dW/dt(W)$  має кілька максимумів і мінімумів (рис. 4.2, б), проте усереднена (шляхом варіювання технологічних параметрів) залежність має плавний S-подібний вигляд (рис. 4.2, б, світла крива).

#### 4.4 Вплив потужності НВЧ-випромінювання на ефективність процесу сушіння

Додаткове нагрівання зерна проса за допомогою НВЧ-випромінювання дає змогу швидше підвищити температуру зерен і тим самим знизити час сушіння. Крім того, можна знизити енергетичні витрати шляхом зниження температури теплоносія і прогрівання зерна до необхідної температури НВЧ-випромінюванням. З іншого боку, через використання НВЧ-випромінювання насіння може нагріватися до несприятливої температури, вищою за 60...80°C, за якої втрачається частина їхніх важливих харчових властивостей.

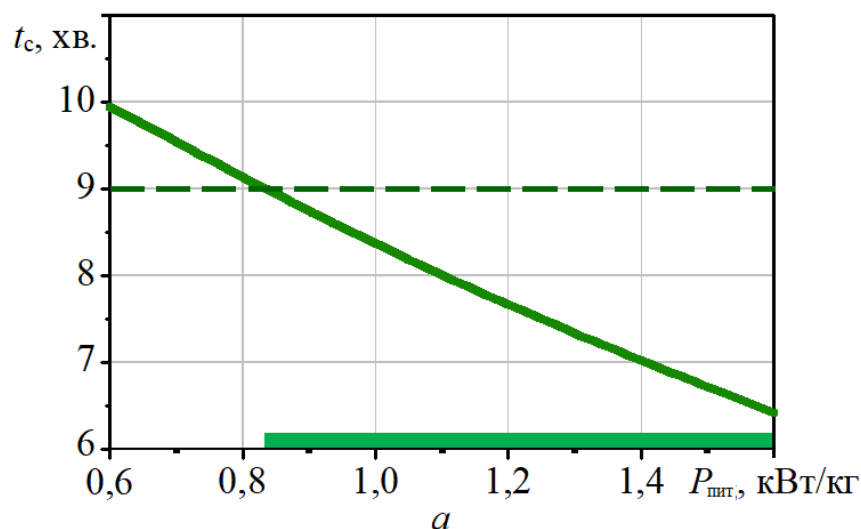
Для вивчення впливу потужності НВЧ-випромінювання на ефективність процесу сушіння проведено серію комп'ютерних експериментів із розробленою моделлю сушіння. У серії з п'яти експериментів питома потужність НВЧ становила 0,6; 0,9; 1,1; 1,3; 1,6 кВт/кг.

Виявлено, що зі збільшенням потужності НВЧ-випромінювання крива сушіння набуває дедалі більш вираженого лінійного характеру. Якщо за відсутності, або за слабого НВЧ-нагріву, сушіння відбувається за практично експоненціальним законом (0,6 кВт/кг), то за сильного НВЧ-нагріву крива сушіння стає практично лінійною: вологість зменшується з 22 до 16% практично лінійно впродовж інтервалу часу 4,5 хвилин.

Однак за високої потужності НВЧ-випромінювання відбувається нагрівання зерна до несприятливої температури: до 363 К за питомої потужності 1,6 кВт/кг. При цьому, враховуючи широкий розкид зерен за температурою, близько 30% зерен виявляться нагрітими до температури 370 ... 380 К.

Тому існує деякий оптимальний діапазон потужності НВЧ-випромінювання, який інтенсифікує процес сушіння, але не спричиняє перегрівання зерен. Оптимальний діапазон  $P_{\text{пит}}$  визначено за графіками впливу  $P_{\text{пит}}$  на час сушіння  $t_c$  і максимальну температуру в процесі сушіння  $T_m$  (рис. 4.3).

Задавшись пороговим значенням часу сушіння 9 хв, за графіком  $t_c(P_{\text{пит}})$  можна встановити, що за потужності НВЧ-випромінювання, вищої за 0,83 кВт/кг, час сушіння становитиме менше ніж 9 хв (рис. 4.3, а). Задавшись пороговим значенням 350 К максимально допустимої температури зерен, за графіком  $T_m(P_{\text{пит}})$  можна встановити, що за потужності менше ніж 1,16 кВт/кг температура зерен не перевищує 350 К.



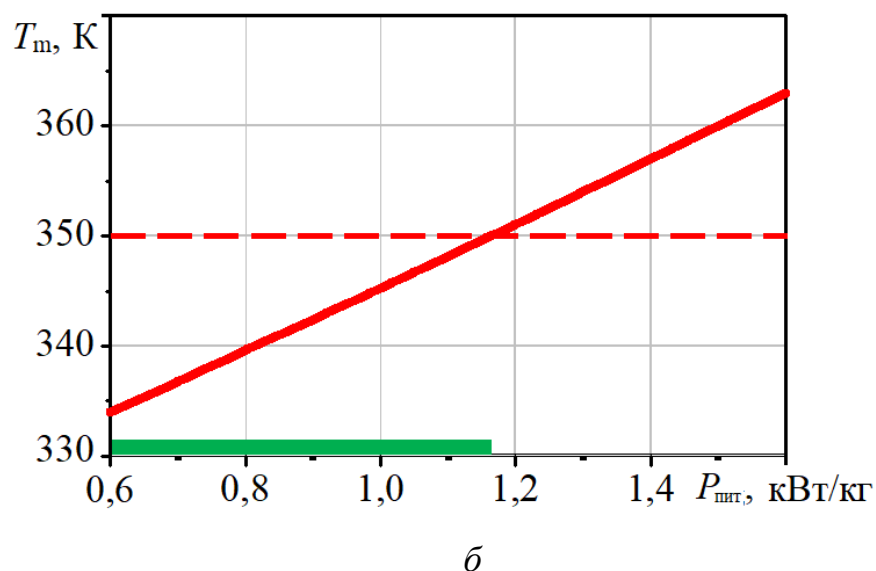


Рис. 4.3 - Вплив потужності НВЧ-випромінювання  $P_{\text{пит}}$  на час сушіння  $t_c$  (а) і максимальну температуру в процесі сушіння  $T_m$  (б)

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

Важливою перевагою розробленого апарату є можливість використовувати низьку температуру теплоносія, і частково здійснювати нагрівання НВЧ-випромінюванням, і відповідно зменшити енергетичні втрати на нагрівання теплоносія. Для вивчення питання, наскільки можна знизити температуру теплоносія без втрати ефективності сушіння, було проведено серію з п'яти комп'ютерних експериментів, температуру теплоносія в яких задавали на рівнях 310, 317, 325, 332, 340 К.

За низької температури теплоносія сушіння займає тривалий час: понад 12 хв за низької температури теплоносія  $T_{\text{ТН}} = 310$  К. Щоб забезпечити час сушіння не більше ніж 9 хв, температура теплоносія має бути не нижчою за 320 К (рис. 4.4, а).

При високій температурі теплоносія відбувається несприятливий перегрів зерна, тому що НВЧ-випромінювання виробляє додатковий нагрів зерна на 20...25 К. При цьому треба враховувати, що під час сушіння граничне відхилення температури в системі зерен становить близько 20 К, тому значна частина зерен



прогрівається вище за середню температуру на 5...10 градусів. Тому максимально допустима температура теплоносія, яка не спричиняє нагрівання зерен вище 350 К, становить 327 К.

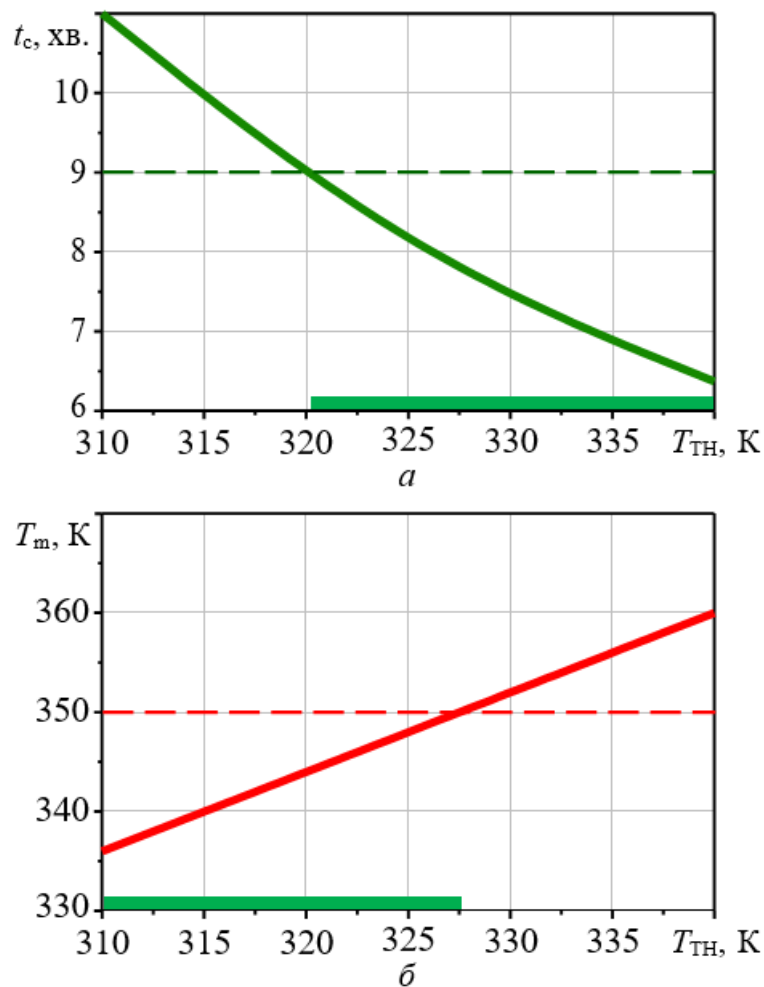


Рис. 4.4 - Вплив температури теплоносія  $T_{ТН}$  на час сушіння  $t_c$  (а) і максимальну температуру в процесі сушіння  $T_m$  (б)

Таким чином, оптимальний діапазон температури теплоносія становить 320...327 К. При цьому час сушіння не перевищує 9 хвилин, а максимальна температура зерна не перевищує 350 К.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Досліджено вплив вологості зерна проса на його фізико-механічні, теплофізичні та електрофізичні властивості, визначено енергетичні форми зв'язку вологи з матеріалом.
2. Запропоновано математичний опис процесу сушіння зерна проса в НВЧ-апараті із закрученим потоком теплоносія.
3. Вивчено механізм та основні кінетичні закономірності процесу сушіння зерна проса, у результаті чого обґрунтовано вибір раціональних технологічних режимів проведення процесу сушіння зерна проса в НВЧ-апараті із закрученим потоком теплоносія.
4. Отримано рівняння регресії, що характеризують продуктивність і питомі енерговитрати при сушінні зерна проса в апараті із закрученим потоком теплоносія.
5. Пошук раціональних режимів процесу показав, що для вихідних параметрів як раціональні мають бути прийняті такі інтервали значень: температура теплоносія  $T=325$  К, потужність НВЧ-випромінювання  $P_{\text{НВЧ}}=700$  Вт.
6. Розроблено оригінальну конструкцію високоінтенсивного сушильного апарата з НВЧ-енергопідведенням із закрученими потоками теплоносія.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Виробництво проса: підсумки та перспективи [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http:// www.agro-business.com.ua/component/content/article/1301.html?ed=70](http://www.agro-business.com.ua/component/content/article/1301.html?ed=70).
2. Маласай В. М., Стрихар А. Є. Просо в Україні. *Насінництво*. 2011. № 5. С. 7–10.
3. Константинов С. І., Горбачова С. М., Горлачова О. В. Результати вивчення світової колекції проса в Лісостепу України. *Науковий вісник національного аграрного університету*. Харків. 2001. Вип. 40. С. 47–50.
4. Гапонюк О. І., Остапчук М. В., Станкевич Г. М., Гапонюк І. І. Активне вентилявання та сушіння зерна [Текст] : навч. посіб. Одеса : ВМВ, 2014. 326 с.
5. Станкевич Г. М. Аналіз стану елеваторної промисловості України. *Зернові продукти і кормбікорми*. 2001. № 1. С. 20–23.
6. Гузь М., Мархонь М., Сиволапов В. Будівництво елеватора: на що слід звертати увагу. *Agroexpert*. 2019. № 7. С. 68–72.
7. Ткачов В. Елеваторна галузь: на вістрі проблем. *The Ukrainian FARMER*. 2018. № 10. С. 13–15.
8. ДСТУ 2422-94. Зерно заготівельне і постачальне. Терміни та визначення : Чинний від 01.01.95. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1994. 24 с.
9. ДСТУ ISO 6322-1:2004. Зберігання зернових та бобових. Київ : Держспоживстандарт України, 2006 (Національний стандарт України). Ч. 1: Основні положення.
10. Елеваторна промисловість: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід [Електронний ресурс] : наук.-допом. бібліогр. покажч. [упоряд. Т. П. Фесун] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ, 2021. 180 с.

11. Подпратов Г. І., Скалецька Л. Ф., Сеньков А. М., Хилевич В. С. Зберігання і переробка продукції рослинництва. Видавництво «Мета». 2002. 495 с.
12. Подпратов Г. І., Рожко В. І., Скалецька Л. Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва: підручник. К. : Аграрна освіта, 2014. 393 с.
13. Осокіна Н. М., Мостов'як І. І., Герасимчук О. П., Любич В. В. та ін. Технологія зберігання зерна з основами захисту від шкідників. Умань; Київ : СІК ГРУП УКРАЇНА, 2016. 248 с
14. Burdo O. и др. Using of the Wave Technologies in Intensification Processes of Heat and Mass Transfer. *EUREKA Phys. Eng.* 2017. V. 4, № 4. P. 18–24.
15. Сільськогосподарські будівлі та споруди [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://bibliograph.com.ua/spravochnik-44/16.htm>
16. Олабоді О. В. Обладнання харчових та переробних виробництв: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід [Електронний ресурс]: наук. -допом. бібліогр. покажч. / [упоряд. О. В. Олабоді]; Нац. ун-т харч. технол., Наук.- техн. б-ка. Київ, 2020. 247 с.
17. Larsson U., Moshfegh B. Comparison of ventilation performance of three different air supply devices: a measurement study. *International Journal of Ventilation*. 2017. 16 (2). P.84–98.
18. Linares P., García-Ortega S., Larrumbide E. The influence on surface condensation risk of lower ventilation rates: the case of the proposal of indoor air quality requirement for the Spanish regulations. *International Journal of Ventilation*. 2018. P.182–191.
19. Belleri A., Avantaggiato M., Psomas T., Heiselberg P. Evaluation tool of climate potential for ventilative cooling. *International Journal of Ventilation*. 2018. P. 204–211.

20. Захарченко Р. В. Аналіз режимів сушки на основі математичної моделі. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2015. Випуск 3 (35). С. 83–84.
21. Захарченко Р. В. Моделювання процесу теплообміну через елементарний шар зерна. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2016. Випуск 2 (38). С. 38–40.
22. Котов Б. І., Спирін А. В., Солоня О. В., Калініченко Р. А. Стан і перспективи теплової і механічної переробки зернової сировини на корм. Вібрації в техніці та технологіях. 2017. № 4 (84). С. 139–142.
23. Мерко І. Т. Наукові основи і технологія переробки зерна. Одеса, 2001. 348 с.
24. Чурсінов Ю. Порівняльний огляд технічних засобів сушіння зерна. Пропозиція. Київ, 2006. С. 122–124.
25. Цуркан О. В., Пришляк В. М., Присяжнюк Д. В. Інтенсифікація сушіння зерна у процесі його післязбиральної обробки. Техніка, енергетика, транспорт АПК. Вінниця, 2017. № 2 (97). С. 99–104.
26. Бандура В. М., Яровий І. І., Маренченко О. І., Пилипенко Є. О. Апарати для сушіння рослинної сировини електромагнітним полем. *Наук. пр. Одес. нац. акад. харч. технологій*. Одеса, 2018. Т.82, вип. 2. С. 123–129.
27. Марченко В. Елеваторне майбутнє України. *AGROEXPERT*. 2010. № 9. С. 124–125.
28. Елеваторні потужності по областях України: Рейтинг за 2019 р. *Зернові продукти і комбікорми*. 2020. Т. 20, № 3 (79). С. 10–11.
29. Бурдо О. Г., Зиков О. В., Гайда С. Нові принципи термообробки зерна. *Наукові праці Одеської державної академії харчових технологій*. 1999. Вип. 20. С. 223–229.
30. Яровий І. І., Кашкано М. А., Маренченко О. І., Пилипенко Є. О. Іноваційні способи енергопідведення у процесах сушіння термолабільної сировини. *Наук. пр. Одес. нац. акад. харч. технологій*. 2019. Т. 83. Вип. 1. С. 123–129.

31. Захарченко Р. В. Опис процесу теплообміну у шарі зерна. Тези II Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Електронні та мехатронні системи: теорія, інновації, практика». Полтава, 17 листопада 2016. ПолтНТУ. 2016. С. 44–46.
32. Полевода Ю. А., Ревва В. Ю., Попов І. І. Методи термічної обробки зерна. Вібрації в техніці та технологіях. 2022. № 2 (105). С. 122–129.
33. Полевода Ю. А., Ревва В. Ю., Твердохліб І. В. Особливості процесу мікронізації зерна. Вібрації в техніці та технологіях. 2023. № 1 (108). С. 94–100.
34. Ємчик В. В., Полевода Ю. А., Ревва В. Ю. Обґрунтування конструктивної схеми установки для обробки зернистого матеріалу інфрачервоним випромінюванням. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2022. № 3 (118). С. 43–52.
35. Занько М. Правильний контроль зерна під час зберігання. *Пропозиція*. 2015. С. 104–107.
36. Автоматизація елеваторів та зерноскладищ [Електронний ресурс] – Режим доступу: [http://www.elevatorasu.com/asu\\_tp/automatization.php](http://www.elevatorasu.com/asu_tp/automatization.php) \
37. SINAMICS G120 [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://bibliograph.com.ua/spravochnik-44/16.htm>
38. Куцик А. С., Місюренко В. О. Автоматизовані системи керування на програмованих логічних контролерах. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. 200 с.
39. Елеваторна промисловість: традиції та інновації. Вітчизняний та світовий досвід [Електронний ресурс] : наук.-допом. бібліогр. покажч. / [упоряд. Т. П. Фесун] ; Нац. ун-т харч. технол., Наук.-техн. б-ка. Київ, 2021. 180 с.
40. Савенко І. І. Перспективні напрями інноваційної діяльності зернозберігаючих підприємств. (Теоретико-правовий та методологічний аспекти) : монографія. Одеська національна академія харчових технологій. Одеса : Поліграф, 2009. 200 с.

41. Кулик М. Ф., Петриченко В. Ф., Стасюк О. К. Перспективні технології зберігання зерна в умовах господарств та на елеваторах. *Ефективні корми та годівля*. 2006. № 1. С. 33–37.

42. Технологія та проектування елеваторів : навч. посібник / О. І. Шаповаленко, О. О. Євтушенко, Т. І. Янюк, В. А. Почеп ; за ред. О. І. Шаповаленко ; Національний університет харчових технологій. Херсон : Олді-плюс, 2015. 416 с.

43. Цуркан О.В., Присяжнюк Д.В. Планування багатофакторного експерименту у дослідженні процесу сушіння зерна пшениці. Вібрації в техніці та технологіях: Тези XVII міжнар. наук.-техн. конф. (Львів, 11-12 жов. 2018). Львів, 2018. С. 113–114.

44. Пазюк В. М. Теплотехнічні основи сушіння насінневого зерна : автореф. дис ... д-ра техн. наук : 05.14.06 / Пазюк Вадим Михайлович ; Національна академія наук України, Інститут технічної теплофізики. Київ, 2019. 41 с.

45. Ленкова Т. М., Паньков П. Ефективність НВЧ-обробки зерна. *Комбікорми*. 2000. № 4. С. 31–32.

46. Осокіна Н. М., Любич. В. В., Новіков В. В., Лещенко І. А. Вихід крупи плющеної із пшениці полби залежно від тривалості опромінення ЕМП НВЧ і водотеплового оброблення. *Збірник наукових праць Уманського НУС*. 2020. Вип. 96. Ч. 1. С. 52–71.

47. Bandura V., Polievoda Y., Tverdokhlib I. Modelling of oily raw material extraction process. Вібрації в техніці та технологіях. 2019. № 3 (94). С. 92–101.