

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
(повне найменування вищого навчального закладу)

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

Кафедра автоматики, електроніки та телекомунікацій  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## Пояснювальна записка

до кваліфікаційної роботи

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему

**Дослідження та побудова автоматизованої системи управління  
переробкою зернової продукції**

Виконав: студент 2 курсу, групи 601-МЕ  
спеціальності 141 «Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка»  
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Самбур Є.В.

(прізвище та ініціали)

Керівник Кислиця С.Г.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Кожушко Г.М.

(прізвище та ініціали)

Полтава - 2026 рік

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»  
 Інститут Навчально-науковий інститут інформаційних технологій та  
 робототехніки  
 Кафедра Автоматики, електроніки та телекомунікацій  
 Рівень вищої освіти Магістр  
 Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

### ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри автоматики,  
 електроніки та телекомунікацій



О.В. Шефер

“ 15 ” 09 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Самбуру Євгенію Володимировичу

Тема проекту (роботи) «Дослідження та побудова автоматизованої системи управління переробкою зернової продукції»

керівник проекту (роботи) Кислиця Світлана Григорівна, к.т.н., доцент  
 затверджена наказом вищого навчального закладу від “08” 09 2025 року  
 № 1025-ф.а

2. Строк подання студентом проекту (роботи) 22.12.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Установка для сушіння насіння дрібнонасіненних культур.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз конструкцій та класифікація засобів механізації процесу сушіння зерна та насіння. Теоретична інтерпретація процесу теплової сушки насіння дрібнонасіненних культур. Конструктивно-технологічна модель сушильного пристрою для обробки насіння дрібнонасіненних культур. Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів установки для сушіння насіння дрібнонасіненних культур. Обґрунтування тепло-, масообмінних характеристик процесу контактного сушіння насіння дрібнонасіненних культур у сушарці. Вибір перетворювача частоти та апаратури керування. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових плакатів):

- 1) Актуальність, мета та задачі розроблення;
- 2) Загальний вигляд сушарки;
- 3) Загальна схема реалізації процесу сушіння зерна конвективним способом;
- 4) Установка для сушіння насіння дрібнонасіненних культур;

- 5) Характеристики процесу сушіння;
- 6) Залежності швидкості обертання;
- 7) Залежності лінійного переміщення;
- 8) Висновки.

6. Дата видачі завдання 15.09.2025 р.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів магістерської роботи	Термін та обсяг виконання етапів роботи			Примітка (плакати)
		Термін	Категорія	Обсяг	
1	Аналіз способів сушіння насіння та зерна	07.10.25		15%	Пл. 1
2	Аналіз конструкцій та класифікація засобів механізації процесу сушіння зерна та насіння	21.10.25	I	5%	Пл. 2
3	Теоретична інтерпретація процесу теплової сушки насіння дрібнонасінних культур	04.11.25		40%	Пл. 3
4	Конструктивно-технологічна модель сушильного пристрою для обробки насіння дрібнонасінневих культур	11.11.25		50 %	Пл. 4
5	Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів установки для сушіння насіння дрібнонасінневих культур	18.11.25	II	60%	Пл. 5
6	Обґрунтування тепло-, масообмінних характеристик процесу контактного сушіння насіння дрібнонасінних культур у сушарці	25.11.25		70%	Пл. 6,7
7	Вибір перетворювача частоти та апаратури керування	09.12.25		90%	Пл. 8,9
8	Оформлення пояснювальної записки	22.12.25	III	100%	Пл. 10

Магістрант

( підпис )

Самбур Є.В.

(прізвище та

ініціали)

Керівник роботи

( підпис )

Кислиця С.Г.

(прізвище та ініціали)

## РЕФЕРАТ

кваліфікаційної роботи

### **Дослідження та побудова автоматизованої системи управління переробкою зернової продукції**

*Структура роботи.* Робота складається з вступу, трьох розділів, висновків і додатків; містить 81 стор. основного тексту, і бібліографічний список використаної літератури.

*Ключові слова:* зерносушарка, автоматизована система управління, конвективне нагрівання.

В магістерській роботі проведений аналіз відомих технологій та засобів механізації сушіння зерна виявлено, що краще використовувати комбінований спосіб сушіння, однак для зерносушарок щодо невеликої продуктивності вигідніше використовувати контактний спосіб підведення теплоти. При цьому товщина оброблюваного шару повинна незначно перевищувати максимальний розмір насіння, що висушується. Реалізація цього принципу можлива на основі застосування робочих органів, виконаних у формі архімедової спіралі, що поєднують процеси сушіння і транспортування зерна.

*Мета дослідження* – розробка установки для сушіння насіння дрібнонасінневих культур з обґрунтуванням оптимальних конструктивних параметрів та режимів її роботи, що забезпечують мінімізацію енергетичних витрат на процес сушіння та необхідну якість готового продукту при дотриманні економічно ефективної пропускної спроможності.

*Об'єкт досліджень* – технологічний процес контактного сушіння насіння дрібнонасінневих культур.

*Предмет дослідження* – параметри технологічного процесу контактного сушіння насіння дрібнонасінневих культур та технічний засіб для реалізації цього процесу.

## ABSTRACT

master's thesis

### **Research and construction of an automated control system for grain processing Structure of the work**

*The work consists* of an introduction, three chapters, conclusions and appendices; contains 81 pages of the main text, and a bibliographic list of used literature.

*Keywords:* grain dryer, automated control system, convective heating.

In the master's work, an analysis of known technologies and means of mechanization of grain drying was carried out, it was found that it is better to use a combined drying method, however, for grain dryers with low productivity, it is more profitable to use a contact method of heat supply. In this case, the thickness of the processed layer should slightly exceed the maximum size of the seeds being dried. The implementation of this principle is possible based on the use of working bodies made in the form of an Archimedean spiral, which combine the processes of drying and transporting grain.

*The purpose of the research* is to develop a plant for drying seeds of small-seeded crops with a justification of optimal design parameters and modes of its operation, which ensure the minimization of energy costs for the drying process and the required quality of the finished product while maintaining cost-effective throughput.

*The object of research* is the technological process of contact drying of seeds of small-seeded crops. The subject of research is the parameters of the technological process of contact drying of seeds of small-seeded crops and the technical means for implementing this process.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ .....	8
1.1 Сушіння насіння та її ефективність .....	8
1.2 Аналіз способів сушіння насіння та зерна .....	15
1.3 Аналіз конструкцій та класифікація засобів механізації процесу сушіння зерна та насіння .....	22
1.4 Аналіз теоретичних та експериментальних досліджень процесу сушіння насіння .....	36
1.5 Мета та завдання проведених наукових досліджень .....	38
2 ТЕОРЕТИЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОВОЇ СУШКИ НАСІННЯ ДРІБНОНАСІННИХ КУЛЬТУР .....	40
2.1 Конструктивно–технологічна модель сушильного пристрою для обробки насіння дрібнонасіневих культур .....	40
2.2 Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів установки для сушіння насіння дрібнонасіневих культур .....	43
2.3 Обґрунтування тепло-, масообмінних характеристик процесу контактного сушіння насіння дрібнонасінних культур у сушарці	53
2.4 Вибір перетворювача частоти та апаратури керування.....	44
3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ СУШКИ НАСІННЯ ДРІБНОНАСІННИХ КУЛЬТУР .....	64
3.1 Вибір та обґрунтування досліджуваних факторів .....	64
3.2 Аналіз показників та методів проведення основного дослідження .....	68
3.3 Кодування факторів і методика складання план-матриці експериментів .....	75
ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	79
ДОДАТКИ.....	82

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Підвищення врожайності зернових культур залишається пріоритетною метою агропромислового комплексу, яка спрямована на забезпечення продовольчої незалежності держави. Найважливішу роль відіграє модернізація технологій зберігання, підготовки та переробки зерна, що дозволяє мінімізувати втрати продукції, зберегти та підвищити її якісні характеристики, а також раціональніше використовувати зерно – стратегічно важливий харчовий ресурс.

Обробка та зберігання врожаю потребують значних ресурсів та інфраструктури, проте висока рентабельність виробництва якісного зерна робить інвестиції у цю сферу виправданими. Очікується підвищення попиту на інноваційні технології та обладнання для післязбиральних операцій та складування зерна, що сприяє зростанню обсягів збору та зниженню витрат. Необхідність модернізації існуючої техніки зумовлена невідповідністю між можливостями наявних машин та вимогами сучасного аграрного сектора. Удосконалення методів термічної обробки зерна шляхом висушування покращує споживчі властивості борошна та підвищує ефективність переробної промисловості, знижуючи витрати на енергію та експлуатацію обладнання.

**Мета дослідження** – розробка установки для сушіння насіння дрібнонасінневих культур з обґрунтуванням оптимальних конструктивних параметрів та режимів її роботи, що забезпечують мінімізацію енергетичних витрат на процес сушіння та необхідну якість готового продукту при дотриманні економічно ефективною пропускної спроможності.

**Об'єкт досліджень** – технологічний процес контактного сушіння насіння дрібнонасінневих культур.

**Предмет дослідження** – параметри технологічного процесу контактного сушіння насіння дрібнонасінневих культур та технічний засіб для реалізації цього процесу.

# 1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Сушіння насіння та її ефективність

Сушіння – це найбільш поширений технологічний процес. У багатьох випадках сушіння є однією з найважливіших операцій, що визначають як якість готової продукції та її техніко економічні показники виробництва у цілому. Отже, сучасним господарствам та зернопереробним підприємствам потрібні недорогі зерносушильні агрегати, які відповідають вимогам та відповідають обсягам їх виробництва. Оскільки сушіння вологих матеріалів є найбільш енергоємною технологічною операцією, то розробка нових сушильних установок, методів їх вдосконалення та підвищення ефективності має важливе економічне значення. Як відомо, у свіжозібраному зерні триває процес післязбирального дозрівання. Правильно підібраний процес сушіння зерна сприяє вирівнюванню вологості та ступеня зрілості зернової маси, покращенню зовнішнього вигляду та технологічних властивостей зерна[1].

Піковою точкою, після якої відбувається різке зростання активності процесів життєдіяльності у зерні, і навіть розвиток у зерновій масі мікрофлори, вважають вологість зерна на рівні 16...17 %. Усі процеси життєдіяльності зерна припиняються за критичної температури нагрівання до 45...55 °С. З огляду на це і обмежується максимальна температура нагрівання оброблюваного зерна [2-3].

Щойно прибране з поля зерно зазвичай має вологість, яка в кілька разів перевершує оптимальну. Також таке зерно, яке надходить після комбайна, має різні бур'яни. Від цього кінцеве значення вологості ще додатково збільшується. У зв'язку з цим важливо якнайшвидше очистити основне зерно від домішок. Інакше у свіжоприбраній зерновій масі відбудуться шкідливі явища: самозігрівання, зародження плісняви. Усе це призведе, зрештою, до швидкоплинного розвитку хлібних шкідників і хвороб, що, своєю чергою, істотно знизить насіннєві та товарні якості зерна [4, 5].

Підсумкова стиглість убраного зерна часто досягається через значний час після проведення його обмолоту. Цей часовий інтервал називають

періодом післязбирального дозрівання зерна. У цьому періоді відбувається таке: знижується вологість убраного зерна, збільшується його енергія проростання, а також зростають хлібопекарські якості. Технічно швидкість процесу післязбирального дозрівання можна значно збільшити. Для цього використовують післязбиральне сушіння зерна за допомогою нагрівання його тепловою енергією. Слід зазначити, що гігроскопічні властивості зерна, тобто його особливість, що характеризує здатність віддавати вологу в навколишнє середовище, або навпаки – вбирати вологу із зовнішнього середовища, служить серйозним критерієм при виборі способу сушіння, обґрунтуванні технологічних параметрів проведення подальшої переробки зерна, або визначенні останнього. При цьому проведеними раніше дослідженнями встановлено залежність впливу вмісту води в зерні на термін його безпечного зберігання (рисунок 1.1) [ 6].

*Термін зберігання, дні*

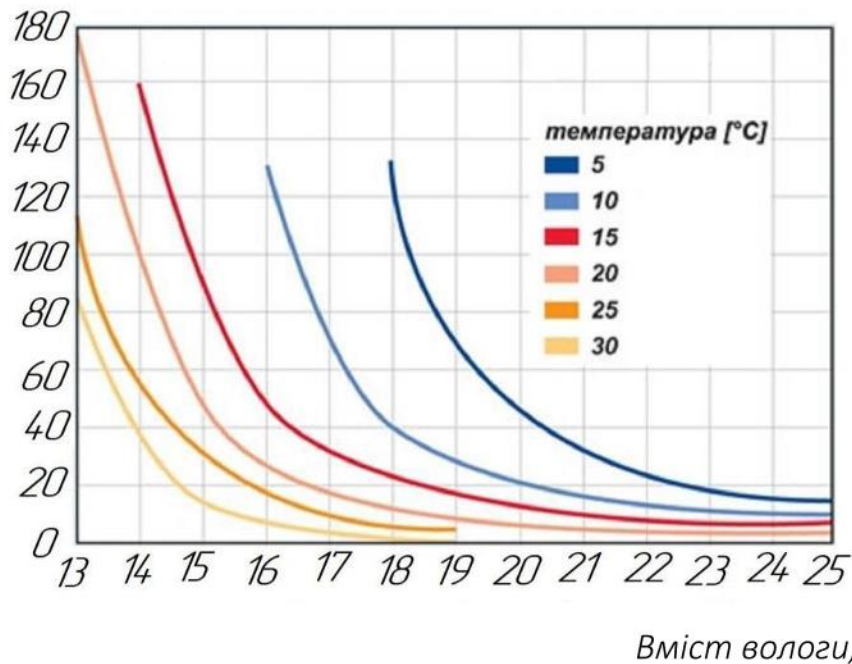


Рисунок 1.1 – Залежність тривалості зберігання зерна від його вмісту вологи та температури

З накопиченого практичного досвіду здійснення процесів сушіння зерна виявлено, що охарактеризувати, скільки є вологи в оброблюваному зерні,

можна, використовуючи критерій, який дозволяє це зробити в кількісних одиницях. Таким показником є значення відносної вологості – відношення маси води, яку поглинуло зерно до загальної маси вологого зерна до сушіння. Критерій виражається у відсотках та визначається залежністю:

$$\omega_{\text{овз}} = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{з}}} \times 100 \%, \quad (1.1)$$

де  $m_{\text{в}}$  - маса води в оброблюваному зерні, кг;

$m_{\text{з}}$  - маса зерна до сушіння, кг.

При теоретичних розрахунках часто використовують термін – абсолютна вологість, яка визначається за допомогою дробу, де в чисельнику – маса води в зерні, а в знаменнику – маса сухої речовини зерна, що піддається тепловому сушінню:

$$\omega_{\text{авз}} = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{с}}} \times 100 \%, \quad (1.2)$$

де  $m_{\text{с}}$  – маса абсолютно сухої речовини зерна, кг.

При цьому взаємозв'язок показників відносної або абсолютної вологості найчастіше виконують таким чином:

$$\omega_{\text{овз}} = \frac{100m_{\text{ва}}}{100+m_{\text{ва}}}, \%; \quad (1.3)$$

$$\omega_{\text{авз}} = \frac{100m}{100+m}, \%; \quad (1.4)$$

Формули (1.3) і (1.4) визначають умова, за якої чисельні значення абсолютної вологості завжди перевершувати показники відносної вологості при постійному значенні вмісту води в зерні.

Чинними галузевими та державними стандартами передбачено поділ зерна за вмістом води на 4 стани: сухе, середньої сухості, вологе та сире. При цьому норми вологості (кондиції), що допускаються, що передбачають можливість тривалого зберігання зерна, наведені в таблиці 1.1.

Досліджуваний процес видалення зайвої води із зерна за допомогою нагрівання останнього характеризується як один із технічно та технологічно

складно здійснених. Тут відбувається інтеграція та одночасна дія кількох факторів фізико-хімічної природи, теплотехнічної та енергетичної [3, 4].

Таблиця 1.1 – Класифікація стану зерна залежно від вологості

Зернова культура	Стан зерна					
	сухе	середньої сухості		вологе		сире
	відносна вологість, %					
	до	після	до	після	до	після
Пшениця, жито, ячмінь, рис, гречка	14	14	15,5	15,5	17	17
Овес, кукурудза у зерні, горох	14	14	16	16	18	18
Кукурудза в качанах	16	16	18	18	20	20
Просо	13,5	13,5	15	15	17	17
Насіння льону та соняшнику	11	11	13	13	14,5	14,5

Основний вплив на процес теплового впливу при цьому надають параметри: форма зв'язку вологи із зерном, швидкість теплового сушіння, гранично допустимі температури нагрівання теплоносія при конвективному сушінні, або гранично допустима температура поверхні, що гріє при контактній сушці, температура нагріву зерна, швидкість руху теплоносія (при конвективному нагріванні), а також важливу роль.

Швидкість перебігу процесу сушіння зерна характеризується переважно міцністю взаємодії (зв'язку) вологи із зерном [5].

Було запропоновано систематизацію існуючих форм даних зв'язків вологи із зерном. При цьому враховувались необхідні енерговитрати, які необхідні для того, щоб виділити потрібну кількість вологи із зерна. Відповідно до класифікації форми зв'язку вологи із зерном можна поділити на хімічні, фізико-хімічні та механічні. Перший вид зв'язку на хімічному рівні характеризується практично нульовою можливістю її видалення із зерна. Це найбільш пов'язана волога. [6].

Волога, пов'язана на фізико-хімічному рівні, значно менше потребує енергії на її видалення із зерна. Даний вид вологи поділяють на адсорбційно пов'язану та осмотично пов'язану вологу у зерні. Перший тип вологи в даному випадку – це волога, яка переміщається у вигляді пари, що конденсується, який

вступає в тверду частину зернівки. Слід зазначити, що така волога не характеризується властивостями, що приписуються воді у звичайному стані [7].

Волога, завдяки якій відбувається процес набухання зерна, називається осмотичною. При цьому процесі волога проходить до внутрішніх шарів колоїдного тіла, мінаючи напівпроникні стіни. Для цього виду вологи дійсні самі характеристики, що й у нормальній воді.

Третій вид зв'язку вологи із зерном - механічний, визначається як найменш міцний і для нього характерна невизначеність кількісних співвідношень. До механічного типу вологи приписують капілярну вологу, а також вологу змочування. Обидва види характеризуються тими самими властивостями, як і нормальна волога. При цьому волога змочування утворюється на поверхневому шарі зерна, а також його внутрішніх порах від прямого зіткнення вологи із зерном. Стан цієї вологи характеризується як крапельнорідкий.

Від того, який вид зв'язку вологи домінує, всі вологі матеріали, які необхідно піддавати процесу сушіння, класифікують на такі блоки:

- капілярно-пористі (в них волога пов'язується переважно силами капілярними, або силами поверхневого натягу);
- колоїдні (у даних матеріалах домінує осмотична чи структурна волога);
- капілярно-пористі колоїдні (у цьому випадку висушувані матеріали включають і осмотично пов'язану вологу і капілярну).

Саме до третього блоку вологих матеріалів відносять зерно при розгляді його як об'єкта сушіння. При цьому в процесі теплового впливу на зерно в зерносушарках відбувається видалення тільки вільної вологи (капілярної та крапельнорідкої).

Проходячи в міжзернові порожнечі, вологе повітря приносить водяну пару, при цьому відбувається так звана зовнішня дифузія. Далі ці насичені вологою пари потрапляють у внутрішню структуру окремих зерен (починається внутрішня дифузія). При даному механізмі поглинання

зовнішньої вологи триватиме аж до такого стану зерна, коли основною характеристикою якого стане стан повної його гігроскопічності, або повне насичення вологою повітря (відносна вологість повітря в цьому випадку дорівнює 100 %).

Гігроскопічна вологість (або вміст вологи) зерна при описі процесу сушіння розглядається як рівне граничної поглинаючої ємності висушеного зерна. При цьому для кожного конкретного виду зерна цей показник свій. Наприклад, при  $t = 25$  °C гігроскопічна точка відповідає значенням абсолютної вологості зерна: у жита – 36,5 %, пшениці – 36,3 %, гречки – 22,5 %.

Гігроскопічний вміст вологи вміст капілярно-пористих колоїдних матеріалів зазвичай не перевищує граничне значення ємності вологи. У зв'язку з цим подальше збільшення вологості зерна можливе, але лише за умови прямого контакту зерна з вологою. У цьому випадку вільна волога, що у відсотковому відношенні перевищує аналогічне значення гігроскопічної вологи, проходить у зерно внаслідок капілярного всмоктування та осмотичного тиску.

Видалення надлишкової вологи із зерна протікає внаслідок міграційних механізмів. Причому рух здійснюється від внутрішніх шарів до зовнішніх, далі відбувається випаровування вологи з поверхні зерна. Якщо вологість незначна, то переміщення її відбувається у формі рідини, якщо ж волога міститься у досить великій кількості, то міграція здійснюється у вигляді газу (пара) [9, 10].

Наслідки, що викликають переміщення вологи, поділяють на вологопровідність та термовологопровідність. Якщо температура нагріву по всьому зерну, що нагрівається в процесі сушіння, характеризується рівними значеннями, то рух вологи відбувається в напрямку від місця з більшою концентрацією до місця з меншою концентрацією вологи, тобто від центральних шарів до поверхневих шарів. Дане явище виражається значенням такого показника як градієнт вмісту вологи.

З метою підвищення швидкості випаровування вологи з поверхні на зерно впливають тепловими потоками у зерносушарках. В даному випадку відбувається нагрівання зерна, що далі впливає на процес переміщення вологи, трансформуючи швидкість та напрямок даного процесу. Як було зазначено вище, при впливі градієнта температури волога рухається від нагрітої поверхні зерна до менш нагрітих його ділянок (від поверхні до центральних шарів) [9].

Під час теплового сушіння в зерні явно виявляються обидва типи тепло- та вологопереносу. Безпосередньо процес сушіння зерна здійснюється в такий спосіб. При впливі теплоти волога, що знаходиться у вільному стані, також нагрівається і починає у вигляді пари видалятися із зерна, проходячи через макропори. Це явище подібне до процесу нагрівання і випаровування води з вільної поверхні. У цей час волога, яка розташована у внутрішніх шарах зерна, починає переміщатися до поверхні (процес вологопровідності), при цьому частково така волога також перетворюється на пару і видаляється з зерна.

Численними експериментальними дослідженнями обґрунтовано процес зміни інтенсивності сушіння внаслідок термовологопровідності. Так, враховуючи, що температурний градієнт у разі невеликий, то зменшення цього показника вбирається у 4 %, отже, прийнято вважати, що потік вологи всередині зерна обумовлений лише наявністю вологопровідності і проходить лише в одному напрямі – від центральних шарів зерна до її поверхні.

При сушінні зерна, використовуючи конвективне теплопідведення, нагрітий агент сушіння проникає в міжзернові простори, передаючи при цьому теплову енергію продукту, що обробляється. Сам агент сушки охолоджується під час даного процесу і одночасно поглинає вологу з поверхні зерна. У цьому випадку процес сушіння здійснюється циклічно, безупинно, і агент сушіння, що віддав теплоту зерну і «відібрав» вологу у останнього, видаляється в атмосферу, або прямує на рециркуляцію. На місце ж відпрацьованого агента сушіння в теплову камеру зерносушарки подають нову порцію теплоносія.

Таким чином, зерносушіння – технологічно складний процес, який поєднує характеристики теплофізичних явищ та фізико-хімічних перетворень.

Цей процес протікає як зовнішній – тепло- і масо-(волого) обмін від зовнішньої поверхні зерна до навколишнього середовища (сушильному агенту), і як внутрішній - теплоперенесення і вологоперенесення (рух всередині зерна) [10].

Дослідження конвективного теплопідведення при сушінні зерна показали, що процес обміну теплової енергії та вологи при зовнішньому циклі протікає від впливу різниці парціальних тисків пари біля поверхні зерна ( $p_m$ ) та в міжзернових просторах ( $p_v$ ). При цьому у разі переважаючого тиску пари в навколишньому середовищі над аналогічним тиском у зерновому шарі волога у вигляді пари потрапляє в зерно. Потім над утвореними там раніше менісками відбувається стиснення пари в макрокапілярах. Якщо ж  $p_m > p_v$ , тоді має місце десорбція (випаровування) вологи та міграція її з вологого зерна в навколишнє повітря.

Вологість зерна, при якому спостерігається рівновага і зупиняється зовнішній обмін вологою від зерна, що висушується, до навколишнього повітря вчені, що досліджують процес сушіння зерна і його ефективність, називають рівноважною вологістю. При цьому дослідники теплових процесів відзначають залежність: з підвищенням відносної вологості ( $\varphi$ ) повітря та зменшенням температури навколишнього повітря ( $t_v$ ) вологість зерна ( $\omega_p$ ) зростає. Детальне вивчення процесів сушіння зерна дозволили виявити граничні умови, за яких матеріал перебуває у гігроскопічному стані. Ця область також називається областю вологого стану, вологість зерна при цьому нижче гігроскопічної.

## **1.2 Аналіз способів сушіння насіння та зерна**

Виходячи із загального осмислення, термін «сушіння» можна охарактеризувати як процес зниження кількості вологи у матеріалі. У практиці зерносушіння технологічний процес сушіння спрямований на досягнення основної мети – забезпечити на виході із сушильної камери зерносушарки характеристик насіння (схожість, вологість), близьким до оптимальних значень. Виходячи з цих принципів, і вибирається спосіб, за допомогою якого

буде здійснюватись видалення зайвої вологи та доведення вологості насіння до оптимального значення, що рекомендується стандартами при закладці на зберігання. Спосіб ж у свою чергу визначають, виходячи з особливостей технічних (конструктивних) та технологічних (режимних) безпосередньо конструкції зерносушарки та, зокрема, сушильної камери [6-11].

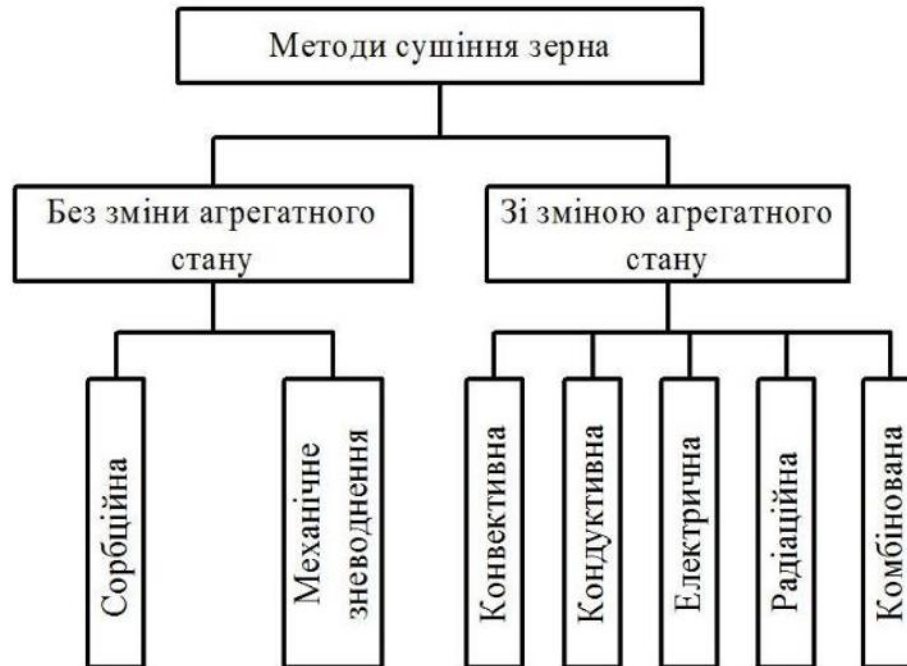


Рисунок 1.2 – Класифікація способів сушіння

У загальносвітовій практиці зерно та насіння сушать численними відомими науці способами. Причому всі вони спираються на два генеральні принципи (рис. 1.2) [11]:

I – видалення надлишкової вологи з насіння та зерна в тому ж початковому агрегатному стані, в якому волога знаходиться (рідина):

- сушіння сорбційне;
- механічне зневоднення.

II – видалення надмірної вологи із зерна в іншому агрегатному стані, що відрізняється від початкового (пар):

- конвективна;
- контактна;
- електрична;

- радіаційна;
- комбінована

Перший зазначений принцип видалення вологи реалізується у вигляді використання сорбентів – речовин, вологопоглиначів. При перемішуванні насіння з підвищеною вологістю з речовинами-сорбентами останні поглинають вологу з насіння, тим самим знижуючи їх вологість. Як речовини-сорбенти використовують сульфат натрію, активоване вугілля, або більш сухе насіння оброблюваної культури. Використання цього способу дозволяє сушити насіння, яке можливо пошкодити при сушінні іншими способами. Крім того, без зміни агрегатного стану вологи можна видалити її з насіння за допомогою механічного способу на основі використання відцентрових сил. При цьому насіння поміщають в машини спеціалізованих конструкцій (центрифуги) і при певних режимах роботи останнього насіння видаляється надмірна волога.

При цьому насіння нагрівається, і з них відбувається видалення вологи за рахунок використання агента сушіння. Як останній виступає або нагріте повітря, або топкові гази від спалювання будь-якої органічної речовини. Також використовують суміш повітря з топковими газами. При даному способі сушіння до насіння від агента сушіння не тільки підводиться теплота, необхідна для їх нагрівання, але і видаляється волога, що випарувалася. Тобто агент сушіння виступає не тільки теплоносієм, а й вологопоглиначем. Використання топкових газів підвищує ефективність сушки, але вимагає додаткових технічних і технологічних рішень для того, щоб забезпечити оброблюване насіння від шкідливого впливу продуктів згоряння. Також, залежно від конструктивних особливостей зерносушарки, передбачається прямоочний або протиточний напрямок руху агента сушіння. У першому випадку він рухається у напрямку, що збігається з напрямком руху насіння, що піддається тепловому впливу, у другому їх напрямки руху протилежні (назустріч один одному). Крім того, в окремих зерносушарках реалізується спосіб, коли рух агента сушіння здійснюється під кутом  $90^0$  (перехресний

струм). У будь-якому випадку вибір напрямку руху агента сушіння залежить від властивостей насіння, що піддаються тепловій сушці, і цей вибір дуже різноваріантний [10].

Другий позначений нами принцип заснований на енерговитратах та зміні агрегатного стану вологи (перетворенні з рідкого стану на газоподібний).

Найбільшого поширення в зерносушильних установках, що серійно випускаються, отримав спосіб конвективного нагріву (рис. 1.3).

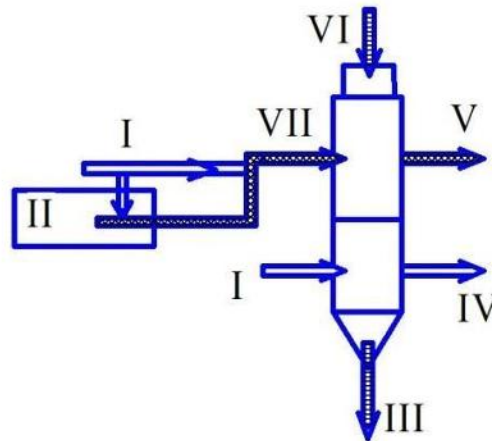


Рисунок 1.3 – Загальна схема реалізації процесу сушіння зерна конвективним способом:

I – атмосферне повітря; II – топкові гази; III – просушене зерно;  
 IV - відпрацьоване повітря; V - агент відпрацювання сушіння;  
 VI – зерно на сушіння; VII - агент сушіння

Конвективне нагрівання насіння часто використовують спільно з контактним, радіаційним і так далі. Все це відноситься до способів інтенсифікації процесу сушіння насіння та успішно реалізується в багатьох конструкціях сучасних зерносушарок.

Контактний спосіб сушіння насіння отримав своє найменування за те, що при цьому способі насіння, що обробляється, позбавляються від зайвої вологи при безпосередньому контакті з нагрітою поверхнею зерносушарки. У цьому випадку відбувається передача теплоти насінню на основі законів теплопровідності або кондукції [12].

Вказаним вище способом сушіння можна знижувати вологість насіння в умовах нормального атмосферного тиску, а також в умовах розрідження (вакууму). Остання умова використовують із метою знизити температуру нагріву насіння. Це доцільно при необхідності забезпечення дбайливої сушіння для селекційних цілей, або для сушіння матеріалу, схильному до розтріскування. З курсу фізики відомо, що зі збільшенням вакууму знижується температура кипіння (випаровування) вологи. Цей постулат дозволяє, наприклад, при тиску 10 кПа забезпечити перехід вологи з рідкого агрегатного стану в газоподібний (пар) при температурі приблизно 30 °С. Це істотно впливає на швидкість сушіння.

Сушіння насіння променистою енергією використовується в радіаційному способі сушіння. Причому можливе як природне сушіння (сонячними променями), так і штучне (променями інфрачервоного спектру).

Інфрачервоні промені при штучному сушінні насіння утворюються при випромінюванні відповідними генераторами (спеціальними лампами, панелями та і т.д.). При цьому даний процес характеризується великими тепловими напругами, які утворюються в поверхневих шарах насіння, що піддаються процесу опромінення. Цей показник перевищує значення теплової напруги при сушінні на основі конвективного способу підведення теплоти до насіння в 30...70 разів. Це суттєво обмежує використання цього способу сушіння. Як інтенсифікацію даного способу використовують так звані сушіння імпульсну – з переривчастим опроміненням [12].

Процес видалення надмірної вологи з насіння за допомогою впливу на останні струми високої частоти (СВЧ) отримав назву електричного сушіння. Механізм цієї сушки насіння заснований на наступних принципах. Насіння, що виступають у цьому процесі сушіння як діелектричні матеріали, розташовують у полі струмів високої частоти в простір, що утворюється обкладками конденсатора (пластинами). При впливі СВЧ молекули насіння починають поляризуватися і здійснювати коливальний рух, що в свою чергу

призводить до підвищення температури насінневого матеріалу, що обробляється внаслідок виникнення сил тертя [13].

При досягненні певного значення температури в результаті цього нагрівання волога, що знаходилася в насінні, починає переходити з рідкого газоподібний агрегатний стан. Газова вода (пар), що випаровується з поверхні насіння, сорбується навколишнім повітрям.

Слід зазначити, що електричний спосіб сушіння на основі струмів високої частоти має суттєву особливість, механізм якої необхідно враховувати при сушінні насіння. Так, при даному способі теплової сушіння нагрівання насіння відбувається не від периферії до центру, як при звичайному нагріванні, а від центру до периферії. У цьому напрям температурного градієнта збігається з напрямом градієнта вологості. Все це покращує умови видалення вологи з насіння (волога при цьому способі рухається від центру до зовнішньої поверхні насіння).

Важливим також залишається питання щодо забезпечення рівномірності нагріву з метою запобігання локальним перегріванням та розтріскування насіння.

Зіставлення різних варіантів сушіння насіння розглядається в загальному сенсі не тільки з позиції теплотехнічного обґрунтування, але, головне, з точки зору забезпечення технологічної правильності організації процесу сушіння.

У загальноприйнятій науковій термінології генеральна мета сушіння насіння визначається як приведення оброблюваного матеріалу до індикаторних значень показників якості властивостей насіння, що обробляється. Даними аспектами і оперують при доборі того чи іншого способу сушіння як основного.

Також не варто залишати без уваги і той факт, що використання певного способу сушіння насіння ґрунтується на енергії зв'язку вологи в рідкому агрегатному стані з насінням, що обробляється.

Слід зазначити, що при вилученні надлишкової (вільної) вологи, минаючи зміни агрегатний стан, тобто видалення в тому вигляді, як вона знаходиться в насінні, необхідно витратити енергію тільки на гідравлічні опори. У той же час при вилученні вологи з насіння в зміненому агрегатному стані витрати енергії йдуть не лише на подолання гідравлічних опорів, але й на утворення газу (пара).

Сорбційний - один із способів реалізації сушіння, що ґрунтується на видаленні вологи без зміни її агрегатного стану. Цей спосіб має великий потенціал у забезпеченні дбайливого сушіння зерна насінневого призначення. Але при його очевидному плюсі є і суттєвий недолік – значний період сушіння. Так, в окремих випадках сорбційне сушіння триває 1...2 тижні і більше. Все це здорожує та ускладнює технологічний процес підготовки насіння до зберігання. Крім того, є складності при здійсненні сушіння самого сорбуючого матеріалу після основного процесу зневоднення насіння.

На основі проведеного та описаного вище аналізу основних способів сушіння нами зроблено висновок, що кожен спосіб характеризується як плюсами, так і мінусами. Причому переваги та недоліки часто залежать також від того, якими технічними рішеннями реалізується кожен конкретний спосіб. Також у науковій та виробничій практиці є позитивні досліди щодо використання поєднання різних способів сушіння (комбінування). Застосування різних спільних варіацій, наприклад, конвективного та СВЧ, дозволяють уникнути негативних моментів, властивих одному з цих способів.

Підсумовуючи зроблений аналіз способів сушіння, можна зробити висновок, що істотне поширення отримав конвективний спосіб сушіння. При цьому він характеризується високими витратами енергії на процес і не може бути реалізований при сушінні невеликих партій насінневого зерна. Перспективним напрямом розвитку науки та техніки є поєднання різних способів. Але при цьому виникають технічні та технологічні проблеми. Також цікавим напрямком, з погляду підвищення якості сушіння насінневого матеріалу, є реалізації контактного способу сушіння. При цьому сучасні

досягнення техніки та наявний науковий доробок дозволяє забезпечити розвиток цього способу сушіння.

### **1.3 Аналіз конструкцій та класифікація засобів механізації процесу сушіння зерна та насіння**

В країнах Європи завжди на особливому контролі було питання розвитку агромашин, що дозволяють не лише забезпечити збирання зернових культур, а й подальшу їх переробку, зокрема, сушіння збираного зерна. Над створенням та вдосконаленням оригінальних конструкцій зерносушарок у всі часи працювали багато інженерів та винахідників. Технічна думка рухалася шляхом прогресу, залучаючи до технології сушіння зерна все нові й нові технічні рішення, які відповідають розвитку техніки і технологій кожного з етапів науково-технологічних революцій.

Для того, щоб при проведенні наших досліджень узагальнити наявний вітчизняний і зарубіжний досвід, нами була проведена робота з систематизації технологічних ознак та проведення критичного аналізу існуючих зерносушарок, що серійно випускаються [14].

Зерносушильні установки класифікують за рядом ознак (рис 1.5). За генеральний принцип, за яким розташовують сушильні установки в групи, зазвичай приймають спосіб, яким здійснюється підведення теплоти до зерна.

Конвективні зерносушарки – це пристрої, що використовують потік нагрітого повітря для передачі теплоти продукту (зерну), внаслідок чого випаровується волога, що міститься в ньому. Їх широко застосовують у сільському господарстві завдяки своїй універсальності та можливості обробки великих обсягів зерна різних видів.

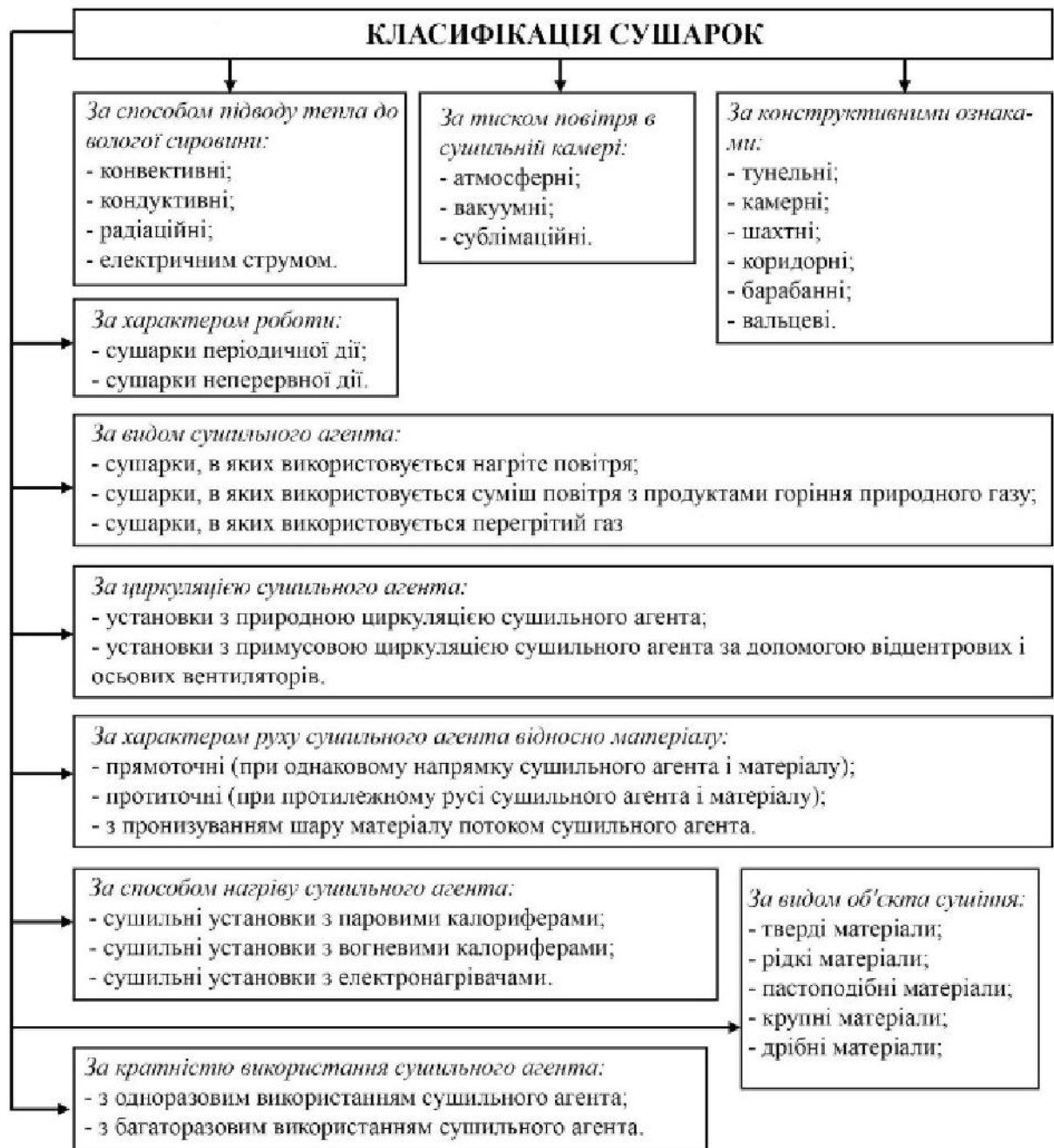


Рисунок 1.5 – Класифікація існуючих установок для сушіння зерна та насіння

Конвективні зерносушарки класифікують за кількома критеріями:

I. У напрямку руху теплоносія щодо шару насіння:

1. Прямоточні: повітря рухається в одному напрямку з насінням (наприклад, шнекові сушарки).

- Переваги: рівномірне сушіння, висока продуктивність.
- Недоліки: великі габарити, складність обслуговування.

2. Протитечні: теплоносій подається назустріч руху насіння (наприклад, шахтні сушарки (рис. 1.6)).

- Переваги: ефективна теплопередача, менші втрати вологи.
- Недоліки: нерівномірність нагріву, можливість пошкодження зерна.

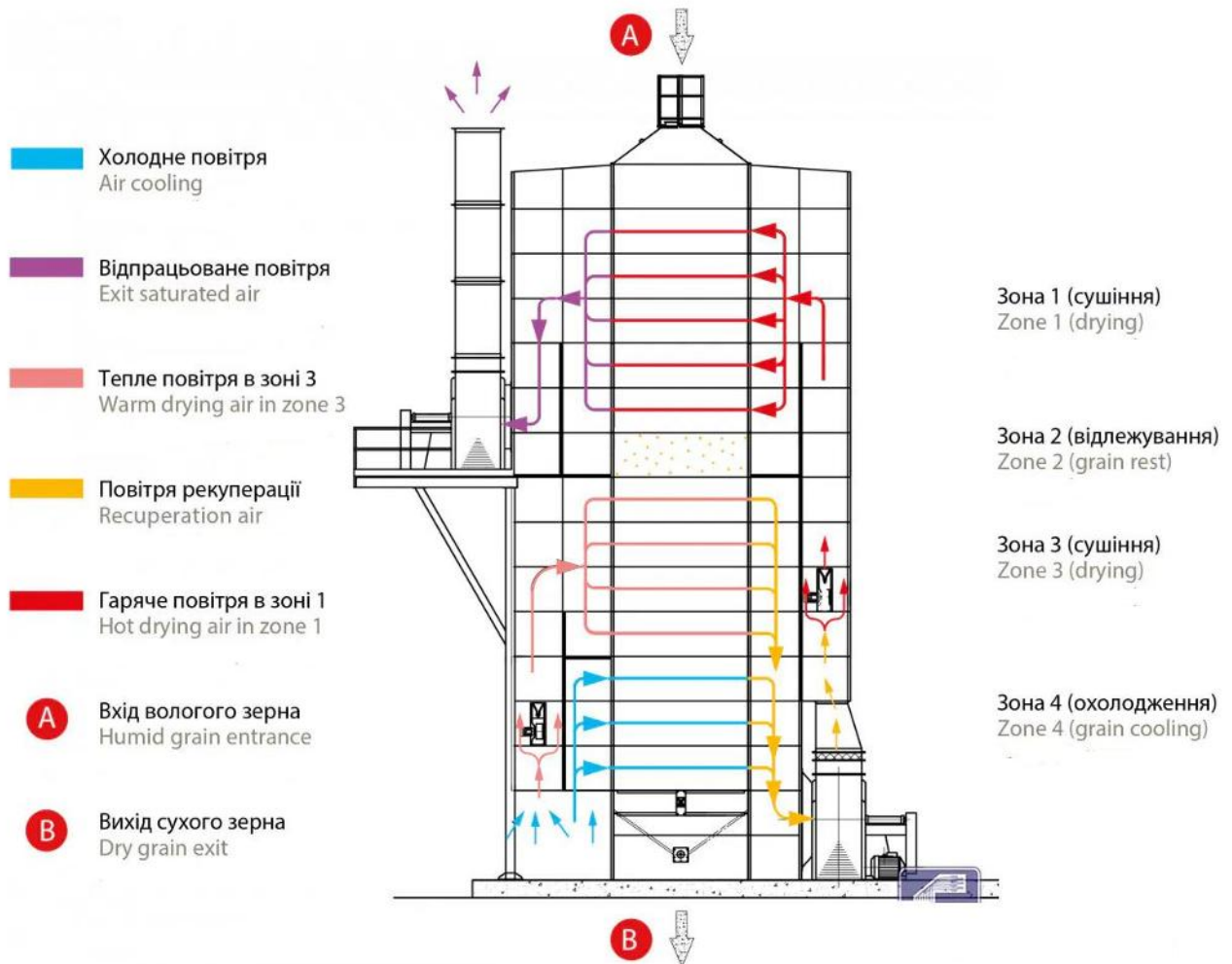


Рисунок 1.6 – Конструктивна схема шахтної зерносушарки

Слід зазначити, що шахтна сушарка – це спеціалізоване обладнання, призначене для сушіння шляхом подачі гарячого повітря через шар збіжжя, укладеного між двома шахтами. Вона широко застосовується в сільському господарстві та харчовій промисловості для підготовки зерна до зберігання та переробки. Принцип її роботи ґрунтується на наступному процесі.

1. Завантаження зерна. Зерно надходить у верхній бункер і рівномірно розподіляється між двома шахтами.

2. Нагрівання повітря. Гаряче повітря подається від нагрівача і прямує до нижньої частини однієї з шахт.
3. Проходження повітря через зерно. Нагріте повітря піднімається вгору через шар зерна, проходячи через невеликі отвори в стінках шахти. По дорозі гаряче повітря поглинає вологу із зерна, поступово знижуючи вологість продукту.
4. Циркуляція та охолодження. Проходячи через другу шахту повітря втрачає свою температуру і частково звільняється від вологи. Цей цикл повторюється багаторазово, поки вологість зерна досягне заданого рівня.
5. Вивантаження сухого зерна. Висушене зерно автоматично виводиться через вихідний шнек у підготовлену зону зберігання чи переробки.

Переваги шахтних зерносушарок:

- висока продуктивність та рівномірність сушіння;
- можливість обробки більших обсягів зерна;
- автоматизація процесів, що забезпечує точність та ефективність;
- економія енергії завдяки ефективній циркуляції повітря.

Таким чином, шахтна зерносушарка забезпечує швидке та якісне зниження вологості зерна, зберігаючи його якість та придатність для подальшого використання.

3. Поперечні: Потік повітря спрямований перпендикулярно шару зерна (наприклад, барабанні сушарки (рис.1.6)).
  - Переваги: компактність, простота конструкції.
  - Недоліки: низька інтенсивність теплообміну, обмежена продуктивність.

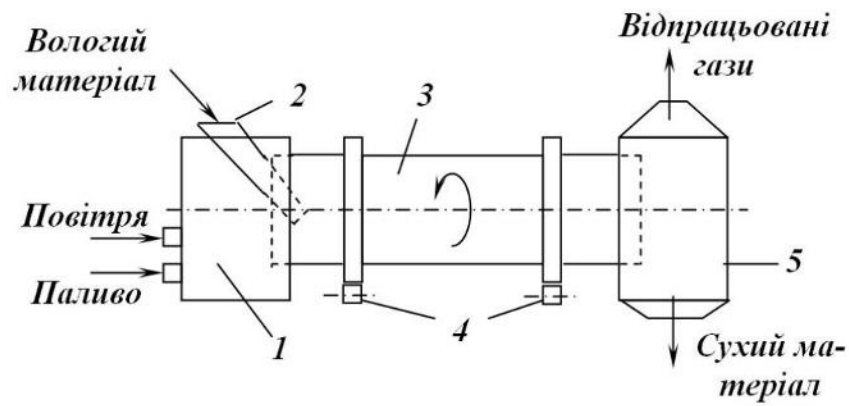


Рисунок 1.6 – Конструктивна схема барабанної сушарки

II. За формою робочого простору:

1. Шахтні (вертикально-трубчасті) :

- Простір представлений вертикальною шахтою, зерно переміщується зверху донизу під дією сили тяжіння.
- Використовуються для безперервного режиму роботи.

2. Камерні (горизонтальні) :

- Робочий об'єм представлений горизонтальним шаром повітря продувається крізь шар зерна (рис. 1.7).
- Використовуються переважно для періодичного режиму роботи.

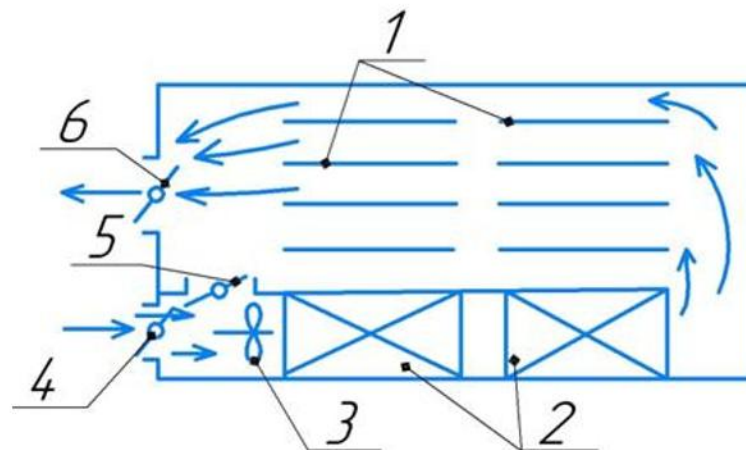


Рисунок 1.7 – Принципова схема камерної сушарки: 1 - полиці для завантаження насіння; 2 – калорифер; 3 – вентилятор; 4 – заслінка для регулювання витрати свіжого повітря; 5, 6 – заслінки (шибери) для регулювання витрат рециркуляційного та відпрацьованого повітря

Процес сушіння камерних зерносушарках можна описати наступним алгоритмом.

1. Завантаження зерна. Сухе зерно рівномірно розподіляється усередині сушильної камери, заповнюючи простір шаром певної товщини.
2. Підігрів повітря. Нагрівальні елементи (зазвичай електричні нагрівачі або пальники на газовому паливі) підігрівають повітря до необхідної температури (зазвичай від +40 до +80°C) [11].
3. Циркуляція теплоносія. Гаряче повітря примусово прямує вентиляторами знизу вгору крізь шар зерна. Повітря проходить через весь обсяг зерна, видаляючи вологу.
4. Контроль вологості та температури. Спеціальні сенсори постійно відстежують температуру та вологість зерна, підтримуючи оптимальний режим обробки.
5. Видалення вологи. Вологе повітря виходить із верхньої частини камери, звільняючи місце для припливу свіжого сухого повітря.
6. Вивантаження готового продукту. Після досягнення необхідного рівня вологості висушений продукт вивантажується із сушарки.

Переваги камерних зерносушарок полягають у можливості підтримувати стабільну температуру у всьому обсязі матеріалу, що дозволяє якісно висушити велику кількість зерна одночасно, мінімізуючи втрати якості продукції.

### 3. Роторні (барабанні) (рис. 1.8) :

- Є обертовим циліндром, всередині якого розташовані лопаті для перемішування зерна.
- Забезпечують високу продуктивність та хорошу вентиляцію зерна.

Принцип функціонування барабанної зерносушарки наступний. Зерновий матеріал надходить усередину барабана через спеціальну камеру завантаження. Усередині розташовані лопаті або полиці, що забезпечують постійне перемішування та рівномірне розподілення матеріалу по всьому

об'єму барабана. Частинки зерна переміщуються зверху вниз, послідовно спускаючись з однієї полиці на іншу, піддаючись впливу нагрітого повітря (при непрямому способі нагріву) або суміші повітря з продуктами згоряння палива (при прямому методі сушіння).

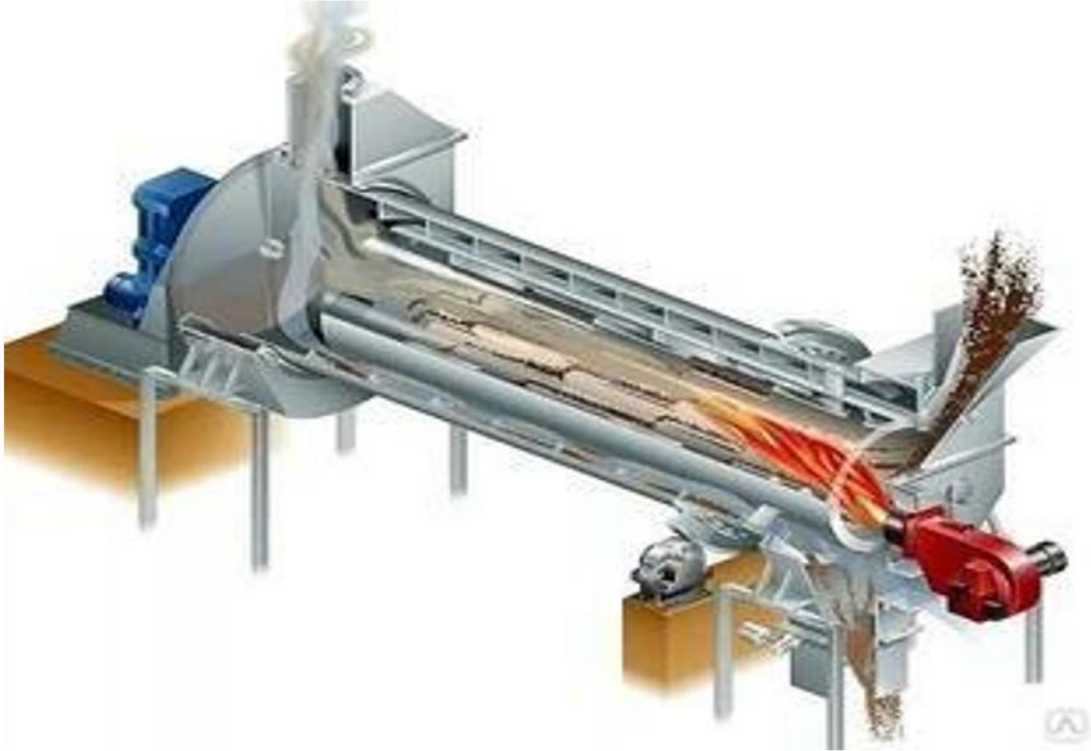


Рисунок 1.8 – Барабанна зерносушарка

Нагрів здійснюється завдяки забору теплого повітря від теплогенератора всередину барабана за допомогою розрідження, що створюється вентилятором. Висушене зерно виводиться назовні через розвантажувальний отвір сушильної установки.

#### 4. Каскадні:

- Конструкція передбачає переміщення зерна каскадом (ступінчасте падіння зерна між рівнями).
- Відрізняються простотою та надійністю, але вимагають більшої витрати палива.

Робота вертикальної зернової сушарки каскадного типу ґрунтується на наступному принципі. Продукт, призначений для сушіння, завантажується із накопичувального бункера на поверхню транспортера через спеціальний

лоток. Під час руху по ньому зерно поступово підігрівається інфрачервоними нагрівальними елементами.

Завершивши рух по першому етапі транспортера, продукт вільно падає під власною вагою і за допомогою спеціальної направляючої системи потрапляє на другий транспортер, де знову проходить обробку теплотою від інфрачервоних випромінювачів і продувається додатково повітрям.

Потім процес повторюється – завершивши шлях другим транспортером, зерно аналогічним чином переходить на третій рівень, продовжуючи піддаватися тепловому впливу, сушінню та вентиляції через спеціальні канали подачі повітря [12].

Нагріте вологе повітря видаляється через вентиляційний отвір та зворотний канал теплогенератора. Остаточний просушений продукт, пройшовши весь цикл обробки, залишає систему через вихідний лоток і відправляється в пакувальні контейнери.

### III. По виду теплоносія:

1. Повітряні: нагрівання повітря здійснюється топковими газами або електричними нагрівачами. Найбільш поширені, забезпечують гнучкість регулювання температури.
2. Газові: використовується суміш продуктів згоряння палива та атмосферного повітря. Економічні, підходять для великих підприємств.
3. Комбіновані: Комбінація повітряних та газових теплоносіїв.
  - Дозволяють економити паливо та підвищувати ККД системи.

### IV. За типом завантаження та вивантаження зерна:

1. Постійний приплив свіжого зерна і видалення сухого.
  - Висока продуктивність, автоматизація процесу.
2. Періодично діючі (рис. 1.9): завантаження партії зерна, її повна обробка та подальше розвантаження.
  - Зручні для невеликих обсягів, прості в обслуговуванні.

### Основні етапи процесу

1. Завантаження сировини Сировина (зерно) завантажується вручну чи механізованим методом всередину камери зерносушарки.
2. Нагрівання повітря. Повітря нагрівають за допомогою спеціальних пальників або електричних тенів до необхідної температури, що відповідає типу матеріалу, що висушується.
3. Підігрів та продування зерна. Гаряче повітря рівномірно розподіляється усередині робочої зони, впливаючи безпосередньо на зерно. Під дією високої температури волога випаровується, вологість зерна знижується.



Рисунок 1.9 – Зерносушарка періодичної дії

Зерносушарка періодичної дії працює наступним чином:

1. Витримування та перемішування. Після подачі гарячого повітря сировина витримується певний час, поки досягається необхідна залишкова вологість. Для рівномірності сушіння можливе використання механізмів перемішування.
2. Охолодження. Після завершення основної фази нагрівання включається режим охолодження: повітря, що подається, стає холоднішим, завдяки чому охолоджується оброблене зерно.
3. Розвантаження готового товару. Висушене зерно вивантажується з камери, готове для зберігання або подальшої переробки.

4. Очищення обладнання. Перед повторним використанням камеру очищають від залишків попереднього матеріалу, забезпечуючи гігієнічність подальших процесів.

Таким чином, зерносушарку періодичної дії характеризує поетапна обробка кожної окремої партії, відсутність безперервного потоку зерна та необхідність очікування повного завершення циклу обробки перед початком наступного етапу [17].

#### V. За рівнем автоматизації:

1. Автоматизовані: повністю автоматизовані процеси регулювання температури, вологості та тривалості сушіння.

- Підвищують точність обробки та знижують трудовитрати.

2. Напівавтоматизовані: часткова автоматизація окремих етапів, ручне керування основними параметрами.

- Менш затратні, підходять для середніх господарств.

3. Механізовані: механічне перемішування зерна, контроль вручну оператором.

- Доступні за ціною, що використовуються на малих підприємствах.

Крім того, виділяють додаткові класифікаційні ознаки, за якими поділяють зерносушарки. Так, розрізняють стаціонарні та мобільні (пересувні) зерносушарки (рис. 1.10).

Мобільні зерносушарки є переносними пристроями циклічного типу, що забезпечують можливість сушіння зерна без будівництва постійних споруд. Ці сучасні, зручні в експлуатації та економічно вигідні агрегати потрібні серед аграріїв, що спеціалізуються на вирощуванні та реалізації зернової продукції.

Вибір відповідної конструкції конвективної зерносушарки має враховувати особливості агрокліматичної зони, технічні вимоги та економічні показники господарства.



Рисунок 1.10 – Мобільна зерносушарка

Контактні зерносушарки відрізняються тим, що передача теплоти зерну здійснюється безпосередньо за допомогою контакту поверхні твердого тіла (нагрівача) з продуктом. Такі сушарки характеризуються високою швидкістю сушіння та можливістю точного дозування теплового навантаження, проте потребують значних енергетичних ресурсів та спеціального підходу до проектування та експлуатації.

Так за ключовими параметрами контактні зерносушарки можна розділити так.

I. За принципом організації теплового контакту:

1. Піддонні контактні сушарки, де продукт розміщений тонким шаром на спеціальних металевих піддонах або лотках. Джерелом теплоти є нагрівальні елементи, розташовані знизу чи збоку. Найчастіше використовуються для точкового сушіння невеликої кількості зерна або насіння, наприклад, у дослідницьких цілях.

2. Шнекові контактні сушарки, в яких зерно просувається вздовж шнекового каналу, що обігрівається, одночасно піддаючись впливу гарячого металу стінок. Мають велику продуктивність, часто використовуються в промислових масштабах.
3. Роликові контактні сушарки, у яких обертання великого металевого ролика з гладкими стінками забезпечує передачу теплоти зерну. Ефективні для зневоднення дрібнодисперсних матеріалів, що рідше використовуються для крупнозернистих культур.
4. Барабанно-контактні сушарки. Металевий барабан (циліндр) обладнаний внутрішніми пристроями для переміщення зерна та забезпечений зовнішнім джерелом нагріву. Широко застосовуються для обробки великого зерна, мають високі показники питомої продуктивності.
5. Стрічкові контактні сушарки. Нерухомі металеві стрічки, що проходять через зону нагрівання, транспортують матеріал у процесі сушіння. Часто використовуються для термічної обробки харчових добавок та насінневих культур.
6. Апарати періодичної дії з перемішуванням. Матеріал міститься в спеціальній резервуар, оснащений механічним пристроєм для постійного перемішування, що дозволяє збільшити площу зіткнення зерна з гарячим металом. Підходять для середнього обсягу партій, особливо поширене використання у лабораторіях та фермерських господарствах.
7. Гравітаційно-контактні сушарки. Оснащені нерухомими похилими поверхнями (стелажми), на яких зерно розподіляється тонким шаром і поступово сповзає під дією гравітації. Найчастіше використовуються для точкових обробок на фермах або дослідних ділянках.
8. Інфрачервоні контактні сушарки. Використання інфрачервоних випромінювачів, розташованих близько до зернової маси, сприяє

швидкому поверхневому прогріву зерна та видаленню вологи. Мають високий рівень енергоспоживання, але швидко досягають заданих температурних режимів.

## II. За характером організації теплового впливу:

1. Односторонній тепловий вплив. Тепло передається лише однією стороною поверхні апарату (зазвичай нижньою частиною стінки чи дна ємності). Підходять для тонких шарів матеріалу, що характеризуються низьким рівнем початкової вологості.
2. Двосторонній тепловий вплив. Нагрівання забезпечується з двох сторін одночасно, дозволяючи прискорити процес видалення вологи. Ідеальні для швидкого висушування тонкошарових зразків чи дрібного матеріалу.
3. Багатошаровий тепловий вплив. Для прискорення процесу сушіння створюються багатошарові структури, кожен шар отримує теплоту окремо чи послідовно. Ця технологія використовується для ефективного вивільнення води навіть із глибоко зволжених матеріалів.

## III. За способом транспортування матеріалу:

1. Стаціонарні контактні сушарки. Сировина залишається нерухомою під час сушіння, піддаючись впливу стаціонарних елементів (піддони, ґрати). Характеризується низькою продуктивністю, але забезпечують високу якість кінцевого продукту.
2. Пересувні контактні сушарки. Зерно переміщається вздовж робочої поверхні, постійно контактуючи із поверхнею тепловіддачі. Продуктивність висока, активно використовують у великомасштабних технологічних процесах.

## IV. За призначенням:

1. Універсальні контактні сушарки. Застосовні для широкого спектру сільськогосподарських культур та продовольчих

товарів. Дозволяють здійснювати одночасну обробку різної сировини, хоча потребують ретельного налаштування.

2. Спеціалізовані контактні сушарки. Конструюються спеціально для певного виду зерна чи культури (ячмінь, пшениця, рис та ін.). Дають максимальний ефект при обробці свого цільового призначення.

V. За ступенем автоматизації:

1. Ручні контактні сушарки. Регулювання всіх параметрів (температури, швидкості обертання, подачі матеріалу) здійснюється оператором вручну. Вимагають постійної турботи оператора, мають невисоку точність дотримання заданих параметрів.
2. Частково автоматизовані контактні сушарки. Частина операцій виконується автоматично (контроль температури, рух шнеків), інші регулюються людиною. Середній рівень точності зручні для масового застосування.
3. Повністю автоматизовані контактні сушарки. Усі технологічні операції контролюються комп'ютером, включаючи подачу зерна, підтримання температури та вологості. Мінімальна роль людини, максимальна точність підтримки необхідних властивостей, високі капіталовкладення.

Вибір оптимального варіанта контактної зерносушарки визначається специфікою вирішуваного завдання (вид оброблюваного зерна, масштаби виробництва, наявність необхідних потужностей), вимогами до якості кінцевого продукту та доступними ресурсами підприємства. Правильно підібрана контактна сушарка здатна значно підвищити рентабельність та скоротити виробничі витрати.

В результаті проведеного аналізу конструкцій та класифікації засобів механізації процесу сушіння зерна та насіння нами було зроблено такі основні висновки.

1. Сучасні сушильні установки класифікують за різними ознаками, таким як тип агента сушіння, що використовується, спосіб подачі теплоти, конструкція сушильної камери і ступінь автоматизації процесів. Така класифікація дозволила систематизувати знання про існуючі конструкції та виявити переваги та недоліки кожної групи обладнання.

2. Експлуатаційні характеристики досліджених сушильних установок показують значну варіативність продуктивності, енергоефективності та вартості експлуатації. Оптимальне рішення для конкретної ситуації залежить від типу зерна, що обробляється, кліматичних умов місцевості та економічних можливостей підприємств.

3. Серед найбільш перспективних напрямів розвитку техніки для зерносушіння необхідно виділити розробку установок із покращеною теплоізоляцією, системами контролю вологості та температури, а також використанням відновлюваних джерел енергії (сонячна енергія, біогаз). Цей напрямок розвитку сушарок дозволяє знизити витрати на енергоресурси та мінімізувати негативний вплив на навколишнє середовище.

4. Результати аналізу конструктивних особливостей сушарок, їх технічних характеристик, експлуатаційних витрат та екологічних показників дозволяють визначитися з вибором оптимальної конструкції сушильного обладнання для конкретних культур, якості сировини та умов здійснення технологічного процесу.

Отримані результати є основою для подальших розробок інноваційних рішень у галузі механізації процесу сушіння зерна та насіння, спрямованих на підвищення ефективності аграрного сектору економіки.

#### **1.4 Аналіз теоретичних та експериментальних досліджень процесу сушіння насіння**

У процесі досліджень технологічних особливостей сушіння насіння дрібнонасіньових культур було визначено, що на процес сушіння насіння

істотно впливає такий параметр, як форма зв'язку води безпосередньо із зернівкою. Технологія сушіння насіння нині ґрунтується на способах видалення води, коли на останню виявляється теплова дія.



Рисунок 1.10 – Класифікація основних типів конвективних сушильних установок для сушіння зерна

Сучасні методи проектування процесів сушіння базуються на розумінні взаємодії води з сухою масою зерна, механізмах переміщення рідини всередині зерна та особливостях поведінки зернових культур при нагріванні та видаленні води. Нові знання вимагають інтеграції досліджень фізико-хімічних аспектів вмісту води і структури зерна, що розглядаються в комплексі з біологічними особливостями живої тканини.

Вчені встановили закономірність зниження стійкості зерна до перегріву зі збільшенням вихідної вологості. Аналізуючи процес сушіння зерна методом псевдорозрідженого шару, дослідники визначили залежність інтенсивності випаровування води від рівня вихідної вологості: чим вище початковий вміст води, тим швидше протікає початковий етап сушіння, проте такий етап виявляється більш короткочасним, що знижує загальну ефективність видалення води.

Висока гігроскопічність зерна викликає активний перерозподіл вологи при контакті сухих та вологих зерен, що призводить до швидкого встановлення рівноваги вологості всієї партії зерна. Підвищення швидкості повітряного потоку та зменшення товщини шару зерна дозволяють суттєво скоротити тривалість сушіння та підвищити продуктивність установок. Це супроводжується зниженням енерговитрат завдяки зменшенню опору руху повітря.

Окремо відзначається перспективність комбінованих способів сушіння, що включають попереднє оброблення зерна інфрачервоним випромінюванням з наступним традиційним повітряним висушуванням. Такий метод дозволяє досягти високих результатів, підвищуючи якість кінцевого продукту та заощаджуючи ресурси.

Таким чином, теоретичний аналіз показав залежність ефективності сушіння від ряду факторів, включаючи вологість вихідного матеріалу, температуру теплоносія, швидкість повітряного потоку та режим вентиляції. Виявлено вплив кожного параметра на якість висушеного продукту, що дозволяє оптимізувати процес сушіння задля досягнення найкращих результатів.

Отже, виконаний аналіз є фундаментальною основою для подальшого вдосконалення технологій сушіння зерна і може бути науковою основою для прийняття рішень щодо оптимізації виробничих процесів у сільськогосподарській галузі.

### **1.5 Мета та завдання проведених наукових досліджень**

Втрати та погіршення якості зернових та круп'яних культур у більшості регіонів пов'язані головним чином з нестачею сучасної та ефективної сушильної техніки. Для збереження зібраного врожаю та підвищення його споживчих якостей використовується сушіння, що дозволяє ефективно зупиняти біологічні процеси у продуктах рослинництва та покращувати

фізичні характеристики окремих компонентів зерна. Застосування науково обґрунтованих методик сушіння сприяє підвищенню стійкості зерна при тривалому зберіганні, покращенню посівних якостей насіння та навіть відновленню товарних показників пошкодженого зерна. У нашій країні успішно функціонують великі підприємства з прийому та переробки зерна, обладнані високоефективними зерносушильними установками. Однак поряд з великими господарствами у сільському господарстві активно розвиваються дрібні фермерські та особисті підсобні господарства. Сьогоднішня структура аграрного сектора характеризується поділом власності: виробники зерна найчастіше володіють самим урожаєм, тоді як спеціалізовані технічні потужності для обробки та зберігання належать великим приймальним та переробним підприємствам. Така ситуація змушує дрібних виробників продавати продукцію у сирому вигляді, оскільки вони позбавлені можливості самостійно обробляти продукцію та отримувати додатковий прибуток. Створення компактних мобільних пристроїв для попередньої підготовки та переробки зерна безпосередньо у його власника стає актуальним завданням, являючи собою найшвидший та економічно вигідний шлях розвитку галузі. Сучасні проблеми збільшення обсягів продуктів харчування та кормів в умовах зростання цін на енергоносії та посилення санітарно-гігієнічних норм передбачають освоєння енергозберігаючих екологічних технологій та використання альтернативних видів палива.

Все це обумовлює першочерговість у проведенні науково-дослідних дослідно-конструкторських робіт з розробки перспективних технологій та інноваційних технічних рішень, що їх реалізують, що дозволяють сушити насіння з підвищеною енергоефективністю. При цьому важливо врахувати і питання забезпечення необхідної якості насіннєвого матеріалу, що обробляється. Цей комплексний напрямок є важливим науково-технічним завданням.

## 2 ТЕОРЕТИЧНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОВОЇ СУШКИ НАСІННЯ ДРІБНОНАСІННИХ КУЛЬТУР

### 2.1 Конструктивно–технологічна модель сушильного пристрою для обробки насіння дрібнонасінневих культур

Для виконання завдань, які стоять перед розробкою та створенням інноваційного засобу механізації для сушіння насіння дрібнонасінневих культур, нами було проведено великий структурний критичний аналіз існуючого етапу розвитку техніки та технологій як вітчизняного, так і світового рівня. Результатом зробленого інтелектуального огляду стала пропозиція принципово технологічно нового пристрою. Схема запропонованого пристрою представлена на рис. 2.1.

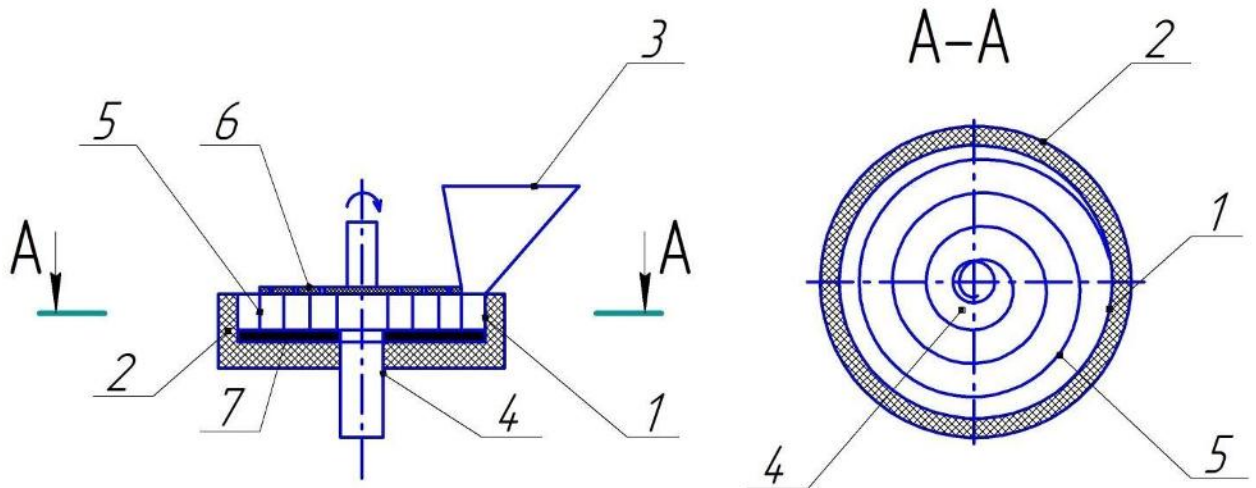


Рисунок 2.1 – Технічний концепт установки для сушіння насіння дрібнонасінневих культур

Технічний концепт запропонованої контактної зерносушарки полягає в тому, що кожух пристрою виконаний циліндричної форми 1, причому вісь обертання циліндра розташовується вертикально на площині (рис. 2.1). Зовні пристрій забезпечено якісною теплоізоляцією від зовнішнього середовища, для чого на зовнішню поверхню кожуха нанесли теплоізолюючий матеріал 2. Безпосередньо оброблюваний матеріал (насіння дрібнонасінневих культур)

потрапляє в зерносушарку із завантажувального бункера 3, а висушене зерно переміщається на подальше підробіток з вивантажувального вікна пристрою 4.

Основним технологічним елементом, що забезпечує рішення поставленого перед тепловою обробкою насіння дрібнонасіньових культур завдань при контактному тепlopідведенні у винайденій конструкції, служить транспортуючий робочий орган (ТРО) 5. Важливо, що транспортуючий робочий орган розглядається конструкції теплової зерносушарки встановлений всередині кожуха 1 таким чином, що осі збігаються.

Транспортуючий робочий орган 5 виготовлений у формі плоскої пружини. При цьому його висота порівнянна з максимальним розміром оброблюваного насіння. Бункер, через який здійснюється завантаження і подача на робочий орган насіння, що транспортує (позиція 3) розміщений зверху плоскої пружини по її зовнішньому краю.

Такі параметри, як ширина випускного вікна завантажувального бункера та відстань від зовнішнього витка плоскої пружини до найближчого витка, мають рівні значення. Зверху плоскої пружини встановлена пластина 6. Причому пластина виготовлена круглої форми з радіусом, що не перевищує відстані від центру плоскої пружини до внутрішнього краю вікна вивантажувального вікна бункера для завантаження насіння. Також пластина має перфорацію і жорстко пов'язана із плоскою пружиною. Внизу робочого органу, що транспортує, встановлений нагрівальний елемент 7 у формі плоского кільця. Зовнішній діаметр цього елемента пропорційний внутрішньому діаметру кожуха пристрою 1. Внутрішній діаметр даного елемента можна порівняти за габаритами з аналогічним розміром внутрішнього витка плоскої пружини. Вікно для вивантаження висушеного насіння 4 виконано круглим, причому вісь вікна збігається з віссю кожуха. Радіус вікна 4 дорівнює радіусу внутрішнього витка плоскої пружини. Розміщено вікно 4 внизу нагрівального елемента 7.

Принцип дії пропонованого нами устрою для сушіння насіння можна описати наступним алгоритмом.

Підключення до мережі електричного струму нагрівального елемента 7 і запуск приводного механізму, що надає перфорованій пластині 6 і, відповідно, ТРО 5 обертальний рух. У міру досягнення температури нагрівального елемента 7 необхідного для проведення досліджень значення, насіння, що висушується, подають в бункер 3. З даного бункера насіння через випускне вікно доставляються у внутрішній простір транспортуючого робочого органу. При цьому насіння, що піддається сушінню, захоплюються зовнішнім витком ТРО і залучаються до його центру. Далі насіння залишає сушильну камеру пристрою через випускне вікно.

При русі поверхнею нагрівального елемента 7 насіння, що піддаються сушінню, також нагріваються. У них знижується вміст вологи, яка, переходячи в агрегатний стан пари, видаляється з сушильної камери через перфорацію пластини 6.

Змінюючи частоту обертання ТРО (позиція 5), можна варіювати швидкістю руху насіння, пропускну здатністю установки та експозицією сушіння.

Така конструкція і параметри, що змінюються, дозволяють забезпечити широкі діапазони проведених досліджень при сушінні і тепловій обробці насіння різних агрокультур.

Завдяки тому, що кожух сушарки насіння має вертикальне розташування, ТРО виготовлений у формі плоскої пружини, висота якої пропорційна максимальному розміру насіння, бункер для подачі насіння встановлений у верхній частині плоскої пружини у зовнішнього краю, причому розмір випускного вікна бункера для завантаження насіння не перевищує відстань між двома послідами. конструктивні особливості дозволяють виконати подачу насіння в сушильну камеру рівномірніше і одночасно якісно розподіляти насіння шаром, товщина якого не перевищує товщину одиничного насіння. При цьому рівномірність сушіння оброблюваного насіння покращується.

Виготовлення ТРО у формі плоскої пружини дозволяє без травмування транспортувати насіння по поверхні, що гріє, причому надійно забезпечити рівномірність їх нагріву. Сушильний пристрій для сушіння дрібнонасінних культур має великий діапазон використання його в різних технологічних процесах, таких як: післязбиральна сушіння насіння дрібнонасінних культур, включаючи насіння багаторічних трав, обсмажування насіння при використанні впливом температурного нагріву та ін.

## **2.2 Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів установки для сушіння насіння дрібнонасінневих культур**

### **2.2.1 Рух насіння дрібнонасінневих культур в установці**

Як транспортуючий робочий орган проектованої установки контактного типу нами обрана плоска пружина, виконана у формі спіралі Архімеда.

Слід зазначити, що спіральні лінії та поверхні на сьогоднішній день мають велике застосування у різноманітних галузях техніки. Спіральні транспортери, гвинтові спуски, спіральні сепаратори широко використовують у агропромислових підприємствах. У формі спіралей виконані фрези ґрунтообробних машин, виконавчі механізми пресів, інструментів, що застосовуються у металообробці та деревообробці. Багато сучасних агромашин містять елементи спіральних і гвинтових ліній.

Архімедова спіраль характеризує собою шлях, який описує деяка точка, поступово рухаючись вздовж променя, тоді як сам промінь рівномірно обертається навколо початкової точки. Іншими словами, відстань пропорційно куту повороту променя, а повороту на той самий кут відповідає одне і те ж збільшення відстані.

Причому точка, що досліджується, розглядається в русі, зі швидкістю  $v = \text{const}$  по променю, що описує тіло обертання щодо полюса  $O$  також з постійною кутовою швидкістю  $\omega$ . При цьому явище, що вивчається, можна представити в полярній системі координат наступним чином:  $r = a \cdot \varphi$ ,

де  $a = v/\omega > 0$  ;  $0 < \varphi < \infty$ .

Кожен промінь перетинає криву в точках, що знаходяться одна від одної на відстані  $h = 2 \pi a$ . Довжина дуги обчислюється за закономірністю (рис. 2.2)

$$s = a \left( \varphi \sqrt{\varphi^2 + 1} + \text{Arsh} \varphi \right) / 2$$

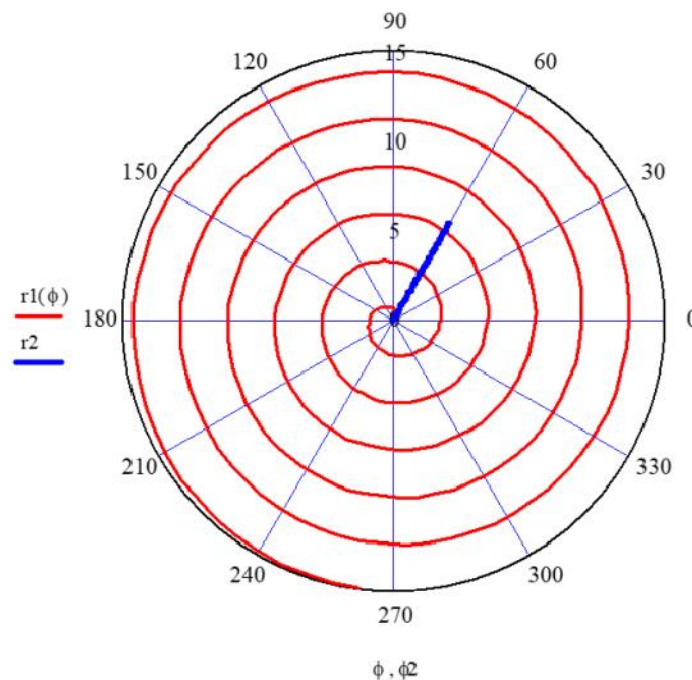


Рисунок 2.2 – Спіраль Архімеда, представлена у полярній системі координат

Насіння, що обробляється в сушарці, при русі спіраллю заповнюють міжвітковий спіральний простір, знаходяться в складних умовах, тому завдання про дослідження руху оброблюваного матеріалу є актуальним і важливим завданням.

Подумки розбиваючи потік оброблюваного матеріалу на окремі елементарні шари, легко помітити, що насіння, що рухається в проміжку між сусідніми витками спіралі, є безліч траєкторій. Це пов'язано з тим, що навіть при постійній частоті обертання спіралі  $n = \text{const}$ , внаслідок зміни відстані  $r$  від зерна до центру диска при переміщенні насіння, лінійна швидкість переносного руху кожної його частинки  $v_{\Pi} = \omega_0 r_i$ , при цьому  $\omega_0$  - кутова швидкість обертання спіралі,  $\text{с}^{-1}$ . Крім того, у загальному випадку за нормаллю

до витків спіралі між ними може одночасно розташовуватися кілька насіння зернової культури, що обробляється. На напрям вектора абсолютної швидкості  $\bar{v} = \bar{v}_n + \bar{v}_0$ , що представляє собою геометричну суму векторів переносної і відносної швидкостей, впливають умови взаємодії частинок елементарного шару насіння, що розглядається, з сусідніми частинками в переміщуваному потоці матеріалу.

У зв'язку з цим, цілеспрямованим у разі є необхідність вивчення механізму, що характеризує рух матеріальної частки, виділеної на периферії спірального гвинта і притиснутої до його поверхні. Завдання ж визначення осьової швидкості всього потоку зерна, що транспортується, пропонується вирішити шляхом введення у відповідні рівняння необхідних експериментальних коефіцієнтів, для отримання яких необхідно провести відповідні експериментальні пошукові дослідження.

### **2.2.2 Диференціальні рівняння руху частинки насіннєвого матеріалу по спіралі транспортуючого робочого органу**

Нехай вісь спірального диска спрямована на вертикалі. Частка матеріалу при обертанні спіралі проти годинникової стрілки захоплюється поверхнею спіралі і в довільному проміжному положенні, через  $t$  після початку свого руху, зміщується щодо центру спіралі на кут  $\varphi$ , рад. (рисунок 2.3).

Нерухомі осі координат  $x_1$  і  $y_1$  пов'язані з диском, а рухливі осі  $x$  і  $y$  - з поверхнею спіралі, що обертається з кутовою швидкістю  $\omega_0$ . Якщо кутова швидкість відносного руху одиничного зерна  $\omega = d\varphi/dt$ ,  $c^{-1}$ , то лінійна швидкість його переміщення  $v = r(\omega_0 - \omega)$ , м/с.

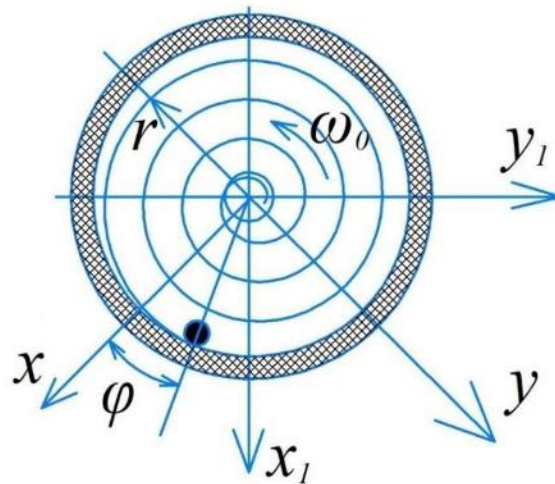


Рисунок 2.3 – Рух частки між витками спіралі

На рисунку 2.4 показано напрям векторів сил, що діють на частинку, що знаходиться на диску під дією спіралі на відстані  $r$ , м від його центру, зокрема: ваги частки:  $G = m \cdot g$ , (де  $m$  - маса частки, кг ;  $g$  – прискорення вільного падіння) дотичної сили інерції  $P_t = mr \cdot d^2\varphi/dt^2$ ;

відцентрової сили інерції у переносному русі:  $P_n = m v_n^2 / r = m \omega^2 r$ ;

відцентрової сили інерції у відносному русі:  $P_0 = mr(d\varphi/dt)^2$ ;

сили Коріоліса:  $P_k = m w_k$ , де  $w_k$  - прискорення Коріоліса, м с<sup>2</sup>

Але  $v_0 = r \cdot d\varphi/dt$ , тому  $P_k = m \omega_0 r \cdot d\varphi/dt$ .

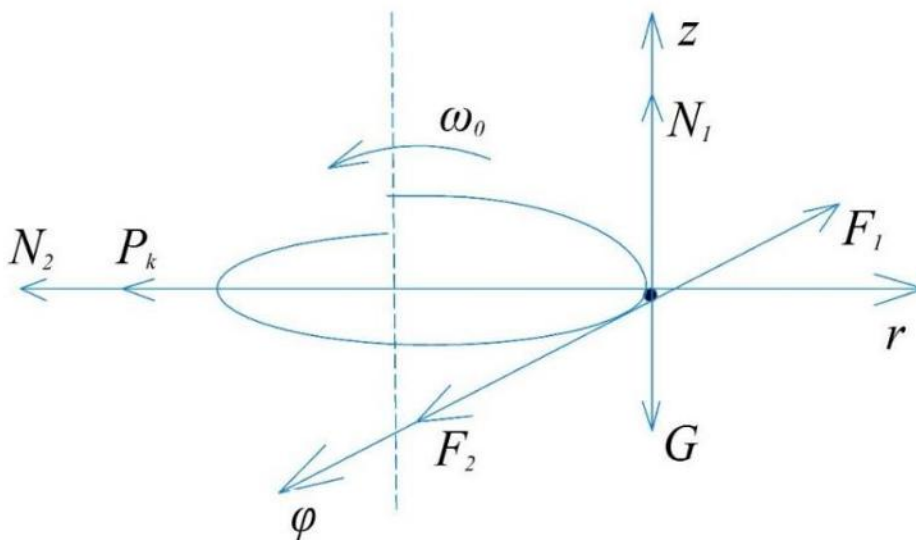


Рисунок 2.4 - Сили, що діють на частинку, що рухається по диску під дією спіралі

Нормальна реакція  $N_1$ , що діє на частинку з боку диска, перпендикулярна до його поверхні, а сила тертя ковзання спрямована у бік, зворотний руху частинки, і розташовується на осі  $\varphi$ . Сила тертя частки диска  $F_1 = f_1 \cdot N_1$ , де  $f_1$  – коефіцієнт тертя частки диска. Нормальна реакція  $N_2$ , що діє на частинку з боку внутрішньої поверхні спіралі, спрямована радіально всередину, а сила тертя частинки поверхню спіралі  $F_2 = f_2 \cdot N_2$  має напрям, зворотний вектор абсолютної швидкості, і спрямована по осі  $\varphi$ , де  $f_2$  – коефіцієнт тертя частинки

про поверхню. Рівняння руху знайдемо з умови  $\sum z = 0$  ( $N_1 - G = 0$ ),  $\sum \varphi = 0$

$$(G_1 + F_2 - F_1 - P_t = 0), \sum r = 0 (P_n + P_0 - N_2 - P_k = 0).$$

Отже, рух частинки матеріалу, що лежить на поверхні диска і притиснутої до стінки спіралі (рис.2.4), можна описати системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} N_1 - mg = 0; \\ f_2 N_2 - f_1 N_1 - mr \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = 0; \\ mr \omega_0^2 + mr \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 - N_2 - 2mr \omega_0 \frac{d\varphi}{dt} = 0. \end{cases} \quad (2.1)$$

Систему рівнянь (2.1) можна вирішити відомими засобами математичного аналізу та теорії диференціальних рівнянь.

### 2.2.3 Результати розв'язання диференціальних рівнянь руху частинки насіннєвого матеріалу, що транспортується диском зі спіраллю

Спростимо систему рівнянь (2.1) та замінимо її еквівалентним рівнянням

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} - f_2 \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 + 2f_2 \omega_0 \frac{d\varphi}{dt} + \frac{f_1 g}{r(\varphi)} = f_2 \omega_0^2. \quad (2.2)$$

Радіус спіралі  $r(\varphi)$  залежно від кутового переміщення

$$r(\varphi) = R - \varphi h / (2\pi), \quad (2.3)$$

де  $R$  – зовнішній радіус спіралі, м;  $h$  – крок спіралі м.

З метою отримання конкретних даних про характер руху частки було виконано чисельне рішення рівняння (2.3) для спіралі, що обертається з різними кутовими швидкостями.

На рисунках 2.5 – 2.8 наведено результати розрахунків деяких характеристик руху матеріальної частинки по диску під дією спіралі за наступних початкових параметрів: коефіцієнт тертя частки про диск  $f_1 = 0,5$ ; коефіцієнт тертя частинки поверхню спіралі  $f_2 = 0,5$ ; зовнішній радіус спіралі  $R = 0,15$  м; кутова швидкість обертання спіралі  $\omega_{01} = 10 \text{ с}^{-1}$  і  $\omega_{02} = 13 \text{ с}^{-1}$ ; крок спіралі  $h = 0,025$  м-коду.

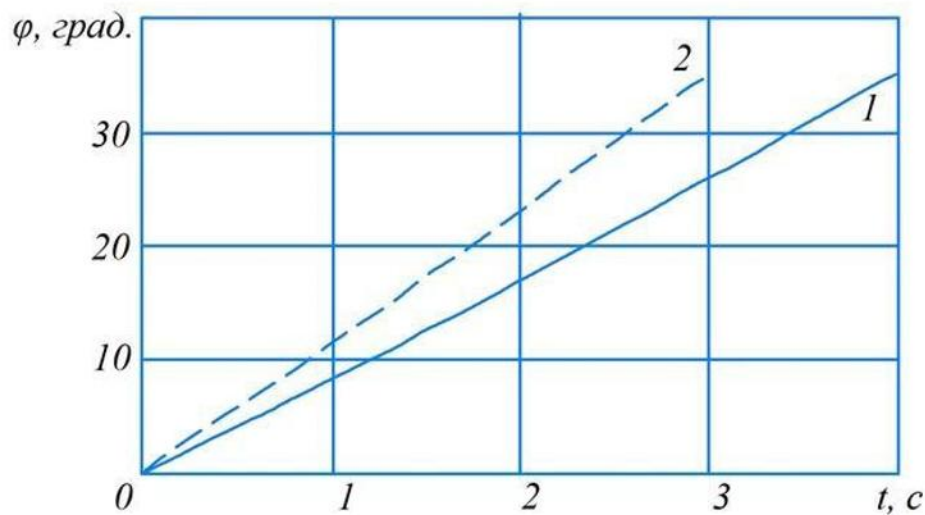


Рисунок 2.5 – Залежність кутового переміщення частки  $\varphi$  від часу  $t$  при різних кутових швидкостях обертання спіралі  $\omega_0$ :

1 - при  $\omega_{01} = 10 \text{ с}^{-1}$ , 2 - при  $\omega_{02} = 13 \text{ с}^{-1}$

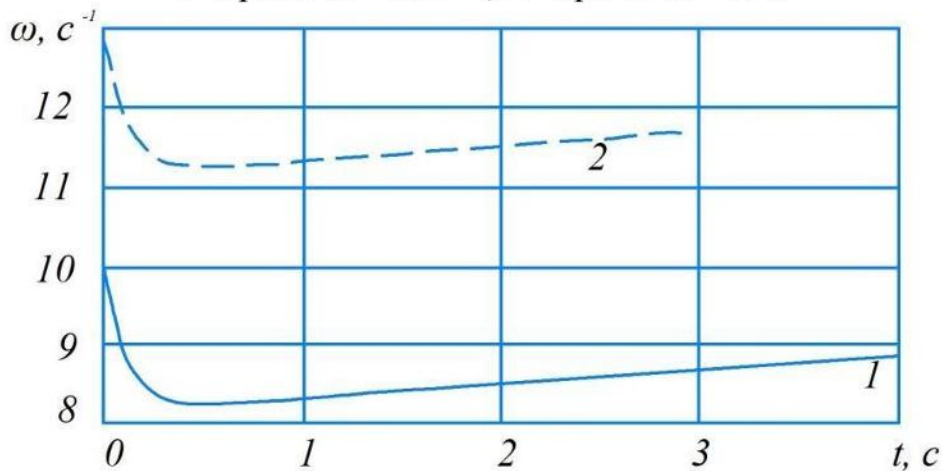


Рисунок 2.6 - Залежність кутової швидкості частки  $\omega$  від часу  $t$  при різних кутових швидкостях обертання спіралі  $\omega_0$ :

1 - при  $\omega_{01} = 10 \text{ с}^{-1}$ , 2 - при  $\omega_{02} = 13 \text{ с}^{-1}$

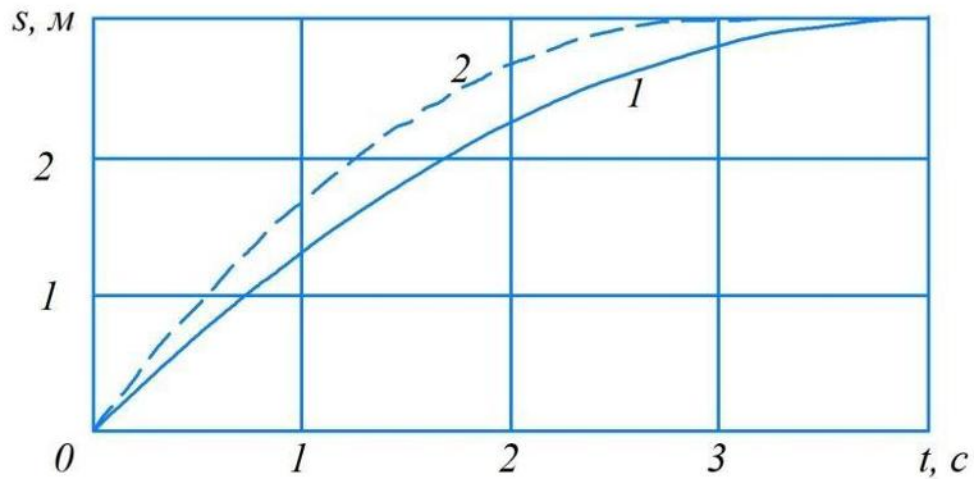


Рисунок 2.7 - Залежність лінійного переміщення частки  $s$  від часу  $t$  при різних кутових швидкостях обертання спіралі  $\omega_0$ :

1 - при  $\omega_{01} = 10 \text{ c}^{-1}$ , 2 - при  $\omega_{02} = 13 \text{ c}^{-1}$

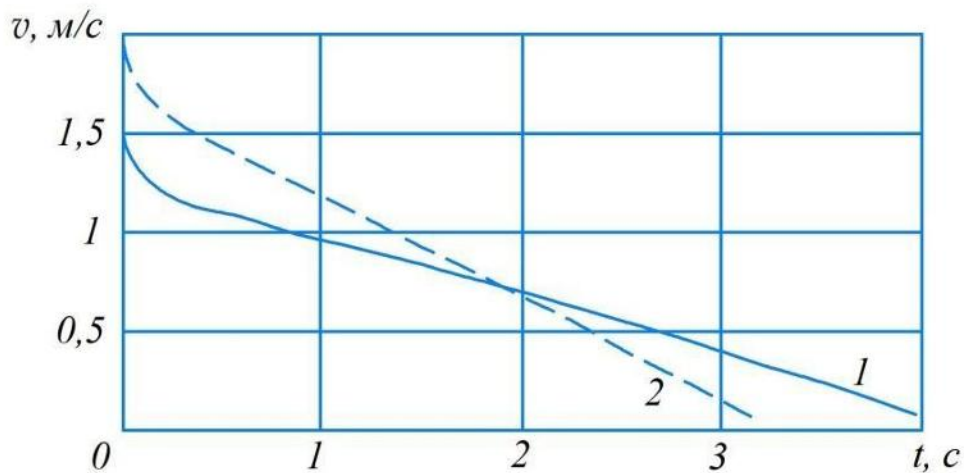


Рисунок 2.8 - Залежність лінійної швидкості частки  $v$  від часу  $t$  при різних кутових швидкостях обертання спіралі  $\omega_0$ :

1 - при  $\omega_{01} = 10 \text{ c}^{-1}$ , 2 - при  $\omega_{02} = 13 \text{ c}^{-1}$

Залежність кутової швидкості частки від часу  $t$  при різних кількості заходів спіралі представлена на рисунку 2.9.

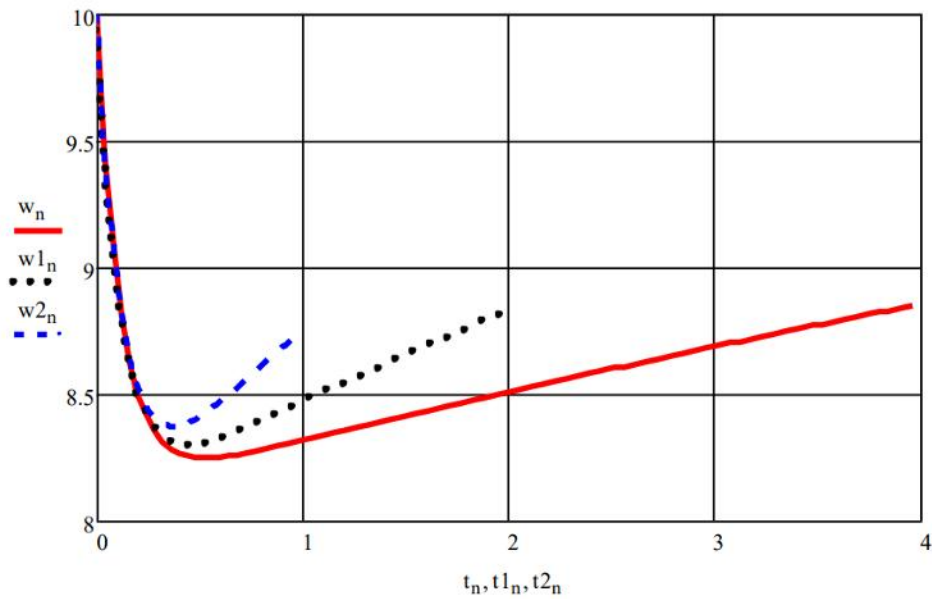


Рисунок 2.9 - Залежність кутової швидкості частинки від часу  $t$  при кутовій швидкості обертання спіралі  $\omega_0 = 10 \text{ c}^{-1}$ : суцільна лінія – однозахідна спіраль; точкова лінія – двозахідна спіраль; пунктирна лінія – чотиризахідна спіраль.

Залежність лінійного переміщення частки  $s$  від часу  $t$  представлені рисунку 2.10.

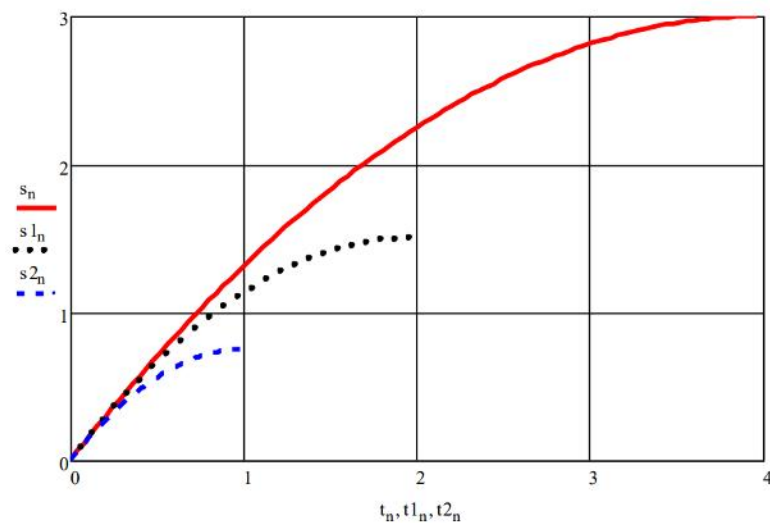


Рисунок 2.10 - Залежність лінійного переміщення частки  $s$  від часу  $t$  при кутовій швидкості обертання спіралі  $\omega_0 = 10 \text{ c}^{-1}$ : суцільна лінія – однозахідна спіраль; точкова лінія – двозахідна спіраль; пунктирна лінія – чотиризахідна спіраль.

Відповідно залежність лінійної швидкості частинки від експозиції сушіння  $t$  при використанні спіралі з різним числом заходів представлена на рисунку 2.11.

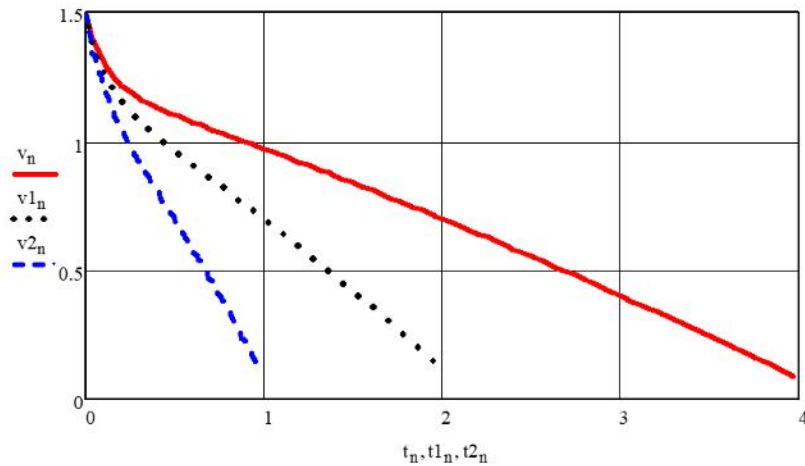


Рисунок 2.11 - Залежність лінійної швидкості частки від часу  $t$

при кутовій швидкості обертання спіралі  $\omega_0 = 10 \text{ c}^{-1}$  :

суцільна лінія – однозахідна спіраль; точкова лінія – двозахідна спіраль;  
пунктирна лінія – чотиризахідна спіраль.

Залежність зміни радіусу переміщення частки  $r$  від часу  $t$  різних видів спіралей представлені рисунку 2.12.

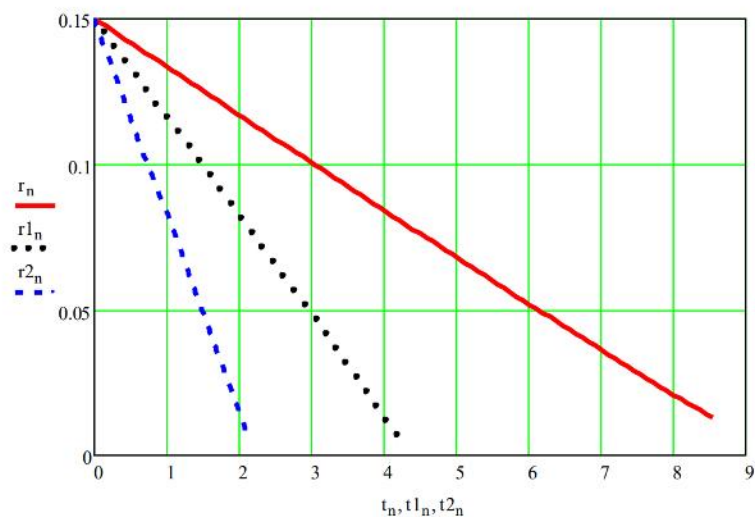


Рисунок 2.12 - Зміна радіусу переміщення частки  $r$  від часу  $t$

при частоті обертання спіралі  $n = 40 \text{ x6}^{-1}$  :

суцільна лінія – однозахідна спіраль; точкова лінія – двозахідна спіраль;  
пунктирна лінія – чотиризахідна спіраль.

Аналіз рисунків дозволив виявити особливості переміщення матеріальної частинки спіральним диском при різних кутових швидкостях обертання спіралі  $\omega_0$ . Так, наприклад, кутове  $\omega$ , лінійне  $s$  та переміщення частинки через  $3\text{ с}$  після початку обертання спіралі стабілізуються. Характер зміни кутової швидкості частки  $\omega$  та її лінійної швидкості  $v$  стабілізується вже через  $1\text{ з}$  після початку роботи.

Викладені раніше умови дозволяють гарантувати стабільне функціонування пристроїв, оснащених робочим органом у вигляді диска, що обертається, із встановленою на ньому плоскою пружиною у вигляді спіралі Архімеда. Запропонована сукупність теоретичних принципів та інженерних рішень забезпечить щадний режим сушіння насіння при збереженні високих якісних характеристик кінцевого продукту.

## **2.3 Обґрунтування тепло-, масообмінних характеристик процесу контактного сушіння насіння дрібнонасінних культур у сушарці**

### **2.3.1 Обґрунтування теплового режиму в сушильній камері засобу механізації**

Розрахунок теплового режиму, створюваного гріючою пластиною (дискон) в сушильній камері, що розробляється нами установки для сушіння насіння дрібнонасінневих культур, можна здійснити при значних спрощеннях, враховуючи, що максимальна температура нагрівання гріючої пластини може бути описана поліномом другого порядку.

Тому приймемо також припущення, що пластина отримує теплоту від нагрівальних елементів, розташованому безпосередньо на її поверхні. Теплообмін із навколишнім середовищем у своїй здійснюється відповідно до закону Ньютона.

Нехай у момент  $t = 0$  у точці  $x = y = 0, r = h/2$  знаходиться джерело теплоти одиничної потужності.

Тоді температура пластини, що гріє, визначиться рівнянням:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{cV} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{1}{cV} \delta(x) \delta(y) \delta \left( z - \frac{h}{2} \right) \delta(t); \quad (2.4)$$

і граничними умовами

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\pm h/2} = \mp \chi T \Big|_{z=\pm h/2}.$$

При відомій початковій температурі нагрівання пластини, застосувавши перетворення Лапласа і подвійне перетворення Фур'є по  $x$  і  $y$ , отримаємо:

$$p \tilde{\tilde{T}} = \frac{\lambda}{cV} \left[ -(\xi^2 + \eta^2) \tilde{\tilde{T}} + \frac{\partial^2 \tilde{\tilde{T}}}{\partial z^2} \right] + \frac{1}{cV} \delta \left( z - \frac{h}{2} \right); \quad (2.5)$$

$$\lambda \frac{\partial \tilde{\tilde{T}}}{\partial z} \Big|_{z=\pm h/2} = \chi \tilde{\tilde{T}} \Big|_{z=\pm h/2}; \quad (2.6)$$

де  $p$  - Параметр перетворення Лапласа; тире і тильдою позначені відповідно перетворення Лапласа та Фур'є. Припустимо, що

$$T(x, y, z, t) = \sum_{v=0}^m T_v(x, y, t) \left( v + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \sqrt{\frac{2}{h}} \left[ P_v \left( \frac{2z}{h} \right) \right]. \quad (2.7)$$

Підставляючи (2.7) в (2.5) і скалярно помножуючи результат на

$$\left( \mu + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \sqrt{\frac{2}{h}} \left[ P_\mu \left( \frac{2z}{h} \right) \right],$$

отримуємо:

$$\begin{aligned} \left[ p + \frac{\lambda}{cV} (\xi^2 + \eta^2) \right] \tilde{\tilde{T}}_\mu &= \frac{\lambda}{cV} \left( \mu + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \sqrt{\frac{2}{h}} \int_{-h/2}^{h/2} P_\mu \left( \frac{2z}{h} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dz + \\ &+ \frac{1}{cV} \left( \mu + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \sqrt{\frac{2}{h}}. \end{aligned} \quad (2.8)$$

Інтегруючи (2.8) частинами, враховуючи умови (2.5) і скориставшись теоремою складання для поліномів Лежандра, знаходимо [12]:

$$\int_{-h/2}^{h/2} P_\mu \left( \frac{2z}{h} \right) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} dz = -\sqrt{\frac{2}{h}} \sum_{v=0}^m \tilde{\tilde{T}}_v \left( v + \frac{1}{2} \right)^{1/2} [1 + (-1)^{v+\mu}] \left( \frac{\chi}{\lambda} + \frac{1}{h} l_{v,\mu} \right), \quad (2.9)$$

де  $l_{v,\mu} = \min(v^2 + v, \mu^2 + \mu)$ .

Підставляючи (2.9) (2.8), отримуємо систему  $(m + 1)$  алгебраїчних рівнянь

$$\begin{aligned} \left[ p + \frac{\lambda}{cv} (\xi^2 + \eta^2) \right] \widetilde{T}_\mu &= \sqrt{\frac{2}{H}} \frac{1}{cv} \left( \mu + \frac{1}{2} \right)^{1/2} - \frac{2\lambda}{cvh} \left( \mu + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \times \\ &\times \sum_{v=0}^m \left( v + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \widetilde{T}_v [1 + (-1)^{v+\mu}] \left( \frac{\chi}{\lambda} + \frac{1}{h} l_{v,\mu} \right), \mu = 0, 1, 2, \dots, m. \end{aligned} \quad (2.10)$$

Система рівнянь (2.10) розпадається на дві незалежні системи з парними та непарними індексами:

$$\begin{aligned} \left[ p + \frac{\lambda}{cv} (\xi^2 + \eta^2) \right] \widetilde{T}_{2\mu} &= \sqrt{\frac{2}{H}} \frac{1}{cv} \left( 2\mu + \frac{1}{2} \right)^{1/2} - \frac{4\lambda}{cvh} \left( 2\mu + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \times \\ &\times \sum_{v=0}^m \left( 2v + \frac{3}{2} \right)^{1/2} \widetilde{T}_{2v} \left( \frac{\chi}{\lambda} + \frac{1}{h} l_{2v+1,2\mu+1} \right), \mu = 0, 1, 2, \dots, m_2, \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$m_2 = E \left( \frac{m-1}{2} \right).$$

При цьому система (2.10) може бути представлена у більш компактному вигляді:

$$\left\{ G_1 + \left[ p + \frac{\lambda}{cv} (\xi^2 + \eta^2) \right] E \right\} \widetilde{T}^* = t_1, \quad (2.12)$$

$$\frac{4\lambda}{cvh} \left( 2\mu + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \left( \frac{\chi}{\lambda} + \frac{1}{h} l_{2v,2\mu} \right) \left( 2v + \frac{1}{2} \right)^{1/2};$$

$$t_{2\mu} = \frac{1}{cv} \left( 2\mu + \frac{1}{2} \right)^{1/2} \sqrt{\frac{2}{h}}.$$

Аналогічно система (2.10) має вигляд

$$\left\{ G_2 + \left[ p + \frac{\lambda}{cv} (\xi^2 + \eta^2) \right] E \right\} \widetilde{T}^{**} = t_2, \quad (2.13)$$

де  $G_2$  – квадратна матриця з елементами

$$\frac{4\lambda}{cvh} \left( 2\mu + \frac{3}{2} \right)^{1/2} \left( \frac{\chi}{\lambda} + \frac{1}{h} l_{2v+1,2\mu+1} \right) \left( 2v + \frac{3}{2} \right)^{1/2};$$

$$t_{2\mu+1} = \frac{1}{cv} \left(2\mu + \frac{3}{2}\right)^{1/2} \sqrt{\frac{2}{h}}.$$

Рішення рівнянь (2.12) та (2.13) можна подати у вигляді:

$$\begin{aligned} \tilde{\tilde{T}}_{2\nu} &= \Delta_{2\nu}^* (\gamma) / \Delta (\gamma); \quad \tilde{\tilde{T}}_{2\nu+1} = \Delta_{2\nu+1}^{**} (\gamma) / \Delta (\gamma), \\ \gamma &= -\left[p + \frac{\lambda}{cv} (\xi^2 + \eta^2)\right]; \quad \Delta^* = \text{Det}(G_1 - \gamma E); \quad \Delta^{**} = \text{Det}(G_2 - \gamma E); \end{aligned}$$

$$\tilde{\tilde{T}}_{2\nu} = \sum_{\mu=0}^{m_2} 2\nu, 2\mu, \quad \tilde{\tilde{T}}_{2\nu+1} = \sum_{\mu=0}^{m_2} \frac{\mu_{2\nu+1, 2\mu+1}}{\gamma - \gamma_{2\nu+1}}.$$

$$\frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\alpha}^{\infty} \frac{e^{-l(x\xi+y)}}{\gamma_{\nu} + \left[p + \frac{\lambda}{cv} (\xi^2 + \eta^2)\right]} d\xi d\eta = \frac{1}{2\pi} \frac{cv}{\lambda} K_0 \sqrt{\frac{cv}{\gamma} (x^2 + y^2) (p + \lambda_{\nu})};$$

$$K_0 \sqrt{\frac{cv}{\gamma} (x^2 + y^2) (p + \lambda_{\nu})} = \frac{1}{2} \frac{e^{-\frac{cvx^2+y^2}{\lambda} - \frac{4t}{t}}}{t} e^{-\gamma\nu},$$

$$T_t(x, y, t) = \frac{1}{4\pi} \frac{cv}{\gamma} \frac{e^{-\frac{cvx^2+y^2}{\lambda} - \frac{4t}{t}}}{t} \sum_{\nu=0}^m a_{\nu i} e^{-\gamma\nu}. \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} T(x, y, z, t) &= \frac{1}{4\pi} \frac{cv}{\gamma} \frac{e^{-\frac{cvx^2+y^2}{\lambda} - \frac{4t}{t}}}{t} \sum_{\nu=0}^m \sum_{\mu=0}^m a_{\nu i} \left(\nu + \frac{1}{2}\right)^{1/2} \times \\ &\times \sqrt{\frac{2}{h}} \left[P_{\nu} \frac{2z}{h}\right] e^{-\gamma\nu}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Таким чином, якщо на поверхні гріючої пластини сушарки в ділянці  $D$  розміщені джерела теплоти з щільністю теплового потоку  $g(x, y, t)$ , то температуру нагрівання пластини  $T_{\text{заг}}$ , створювану таким джерелом, можна визначити інтегралом:

$$\int_0^t \iint_D T(x - \xi, y - \eta, z, t - \tau) g(\xi, \eta, \tau) d\xi d\eta d\tau.$$

Зазначимо, що використовуваний метод передбачає зведення рішення рівняння теплопровідності до розв'язання рівнянь (2.15) порядку  $E(m^2)$ , що не становить особливих труднощів для обчислення при невеликих значеннях  $m$ .

### 2.3.2 Обґрунтування енергетичного коефіцієнта корисної дії засобу механізації процесу сушіння насіння дрібнонасінневих культур

Ступінь досконалості розроблюваного засобу механізації для здійснення теплового впливу на оброблюваний продукт, зокрема, і зерносушильної техніки, оцінюють за її енергетичним коефіцієнтом корисної дії (ККД), який є відношенням корисно використаної енергії (теплоти) до сумарно витраченої:

$$\eta_{\text{ен}} = q_{\text{пов}} / q_{\text{затр}}$$

Для будь-якої зерносушильної установки корисно використаною теплотою потрібно вважати лише ту кількість теплоти, яка витрачена на випаровування вологи із зерна. Ця теплота, кДж, віднесена до 1 кг сухого газу (повітря), записується у вигляді:

$$q_{\text{пов}} = r (d_2 - d_1) / 1000, \quad (2.16)$$

де  $r$  - питома теплота пароутворення, Дж/кг; її приймають за середньою температурою зерна, що обробляється:

$$\Theta = \frac{\Theta_1 + \Theta_2}{2}. \quad (2.17)$$

Якщо насінневий матеріал висушується до малої вологості, враховується також величина  $\Delta r$  - витрата енергії на подолання зв'язку вологи із зерном (права частина рівняння 2.15).

Що стосується витраченої теплоти, то для зерносушарок, вона є теплотою, що сприймається 1 кг газу в калорифері:

$$q_{\text{затр}} = c_p (t_1 - t_0). \quad (2.18)$$

Якщо розрахунок вести на 1 кг випарованої із зерна вологи, можна вважати

$$\eta_{\text{ен}} \approx r / q_{\text{кал}}, \quad (2.19)$$

де  $q_{\text{кал}}$  - витрата теплоти в калорифері, Дж, віднесений до 1 кг випарованої із зерна вологи.

В даний час набувають широкого поширення вторинні енергоресурси. Для зерносушильних установок це можна легко здійснити, якщо як сушильний агент використовувати відхідні гази будь-яких теплових агрегатів. При цьому

витраченою теплотою потрібно також вважати  $c_p(t_1 - t_0)$ , де  $t_1$  - температура газу, що надходить в зерносушильну камеру, і  $t_0$  - температура навколишнього середовища.

Тоді за всіх умов ККД власне зерносушарки (сушильної камери) представиться у вигляді:

$$\eta_{\text{ен}} = \frac{r(d_2 - d_1)}{c_p(t_1 - t_0)1000}. \quad (2.20)$$

Якщо зерносушильна установка має топку і потрібно врахувати втрати в ній, то для цього використовуємо вираз для визначення ККД топки:

$$\eta_{\text{ен}} = \frac{c_p(t_1 - t_0)}{B_{\text{уд}}Q_H^P}, \quad (2.21)$$

де  $B_{\text{уд}}$  - питома витрата палива на 1 кг сухого газу;

$$B_{\text{уд}} = B / L,$$

де  $B$  і  $L$  - годинна витрата палива та сухого сушильного агента відповідно.

Якщо значення твору  $c_p(t_1 - t_0)$  з (2.21) підставити в (2.20), то отримаємо:

$$\eta_{\text{ен}} = \frac{r(d_2 - d_1)}{\eta_T B_{\text{уд}} Q_H^P \cdot 1000}, \quad (2.22)$$

Тоді ККД всієї установки

$$\eta_{\text{ен.у}} = \eta_{\text{ен}} \eta_T = \frac{r(d_2 - d_1)}{B_{\text{уд}} Q_H^P \cdot 1000}, \quad (2.23)$$

або

$$\eta_{\text{ен.у}} = \frac{r(d_2 - d_1)}{B Q_H^P \cdot 1000}. \quad (2.24)$$

Якщо підставити

$$L = U \frac{1000}{d_2 - d_1}, \quad (2.25)$$

то отримаємо:

$$\eta_{\text{ен.у}} = \frac{rU}{B Q_H^P}. \quad (2.26)$$

Таким чином, у ході проведеного дослідження нами обґрунтовано необхідність розробки нового підходу до оцінки енергетичної ефективності

процесів термічної обробки та сушіння насіння дрібнонасіньєвих культур. Запропонований енергетичний коефіцієнт корисної дії дозволяє комплексно оцінити ефективність функціонування системи машин та обладнання з урахуванням особливостей структури посівного матеріалу, кліматичних умов регіону та якості кінцевого продукту.

### **2.3.3 Термодинамічний аналіз сушильного процесу в розроблюваному засобі механізації**

За останні роки з метою інтенсифікації процесу сушіння зерна почали застосовувати сушильні агенти з високою температурою; у зв'язку з цим потрібно було уточнити методики розрахунку зерносушильних установок, оскільки при високій температурі сушильного агента припущення про ізобарність процесу може призвести до помилок. Справді, якщо в атмосферних сушарках вважати  $B = p_{\text{п}} + p_{\text{в}} = \text{const}$ , то при збільшенні  $p_{\text{п}}$  в процесі сушіння  $p$  повинно зменшитися, тобто парціальний тиск робочого тіла, поданого в сушильну камеру повинно зменшитись [6].

При складанні теплового балансу сушильної камери необхідно припустити, що теплота, що вноситься повітрям в сушильну камеру, виражається його ентальпією  $I$ . Насправді повітря вносить лише свою внутрішню енергію  $U$ , а робота розширення при нагріванні повітря від  $T_0$  до  $T_1$  по суті, втрачена в калорифері. У сушильній камері ця втрата лише частково компенсується роботою атмосферного тиску, який стискає повітря при зниженні температури від  $T_1$  до  $T_2$ . Подальше стиснення повітря, яке супроводжується подальшим зниженням температури від  $T_2$  до  $T_0$  відбувається в атмосфері, тобто за межами зерносушильної камери.

Зазначені зміни стану повітря можна наочно показати в  $P - V$  - діаграмі (рисунок 2.13).

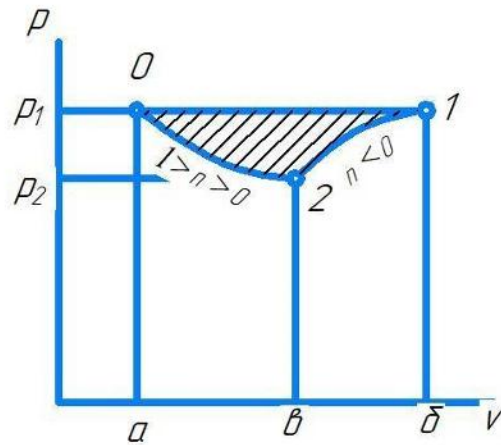


Рисунок 2.13 – Зміна стану повітря у процесі сушіння в  $P - V$  – діаграмі

Нехай точка 0 є початковим станом зовнішнього повітря. Розширення повітря при нагріванні їх у калорифері зобразиться лінією 0-1, паралельної осі  $V$ , оскільки відбувається при  $p = \text{const}$ .

У сушильній камері відбувається охолодження повітря, що супроводжується його стисненням, причому процес протікає при зменшенні парціального тиску повітря (лінія 1-2). Зміна стану повітря в атмосфері зображується лінією 2-0, що характеризує стиск повітря, що супроводжується його охолодженням і підвищенням тиску до початкового.

Відомо, що площа під лінією, що зображує процес зміни стану газу в координатах  $p - V$ , еквівалентна роботі, що здійснюється. Тому площа 0-1-б-а є роботою розширення повітря в калорифері; площа 1-2-в-б - роботою стиснення повітря в сушильній камері, і, нарешті, площа 2-0-а-в - роботою стиснення в атмосфері. Тоді площа 0-1-2 є роботою сушильного циклу.

Неважко бачити, що робота, витрачена в калорифері розширення повітря і зображена площею 0-1-б-а, більше роботи, яку повернув атмосферний тиск цього повітря, зображеної площею 1-2-0-а-б, на величину роботи циклу  $L$ . Ця робота становить одну з термодинамічних втрат, що виникають у процесі здійснення зерносушильного циклу.

Крім цієї втрати, є інша термодинамічна втрата, обумовлена також тим, що процес в сушильній камері не є ізобарним. Ця друга втрата наочно представлена  $T - S$ -діаграмою (рисунок 2.14).

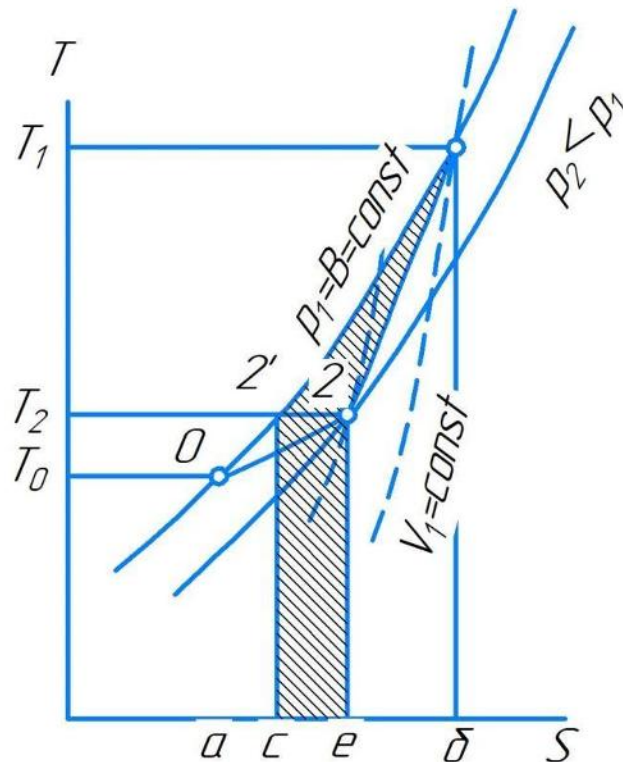


Рисунок 2.14 – Зміна стану повітря у процесі сушіння в  $T - S$  – діаграмі

Нехай на  $T - S$ -діаграмі точка 0 зображує початковий стан повітря перед надходженням його в калорифер. Ця точка лежить на ізобарі  $p_1 \approx B$ .

Процес нагрівання повітря в калорифері від  $T_0$  до  $T_1$  зобразиться відрізком 0-1 на ізобарі  $p_1 = \text{const}$ . У зерносушильній камері тиск сушильного агента знижується; тому точка 2, що зображує стан повітря при виході його з зерносушильної камери температурою  $T_2$  буде лежати на ізобарі  $p_2 = \text{const}$ , розташованої правіше ізобарі  $p_1 = \text{const}$ .

Зміна стану повітря в сушильній камері зобразиться лінією 1-2, що лежить між ізобарою  $p_1 = \text{const}$  і ізохорою  $V_1 = \text{const}$ . Ця лінія може розглядатися як політропа, яка описується рівнянням  $pV^n = \text{const}$ .

Неважко показати, що для процесу зміни стану газу в зерносушильній камері показник політропи  $n < 0$ . З рівняння політропи випливає, що показник політропи:

$$n = \frac{\ln \frac{p_1}{p_2}}{\ln \frac{V_2}{V_1}} \quad (2.27)$$

Використовуючи рівняння стану, можна замінити

$$n = \frac{\ln \frac{p_1}{p_2}}{\ln \frac{p_1}{p_2} + \ln \frac{T_2}{T_1}} \quad (2.28)$$

Так як для процесу видалення вологи із зерна в сушильній камері  $p_2 < p_1$ , то чисельник виразу (2.28) буде позитивним. Поряд з цим зазвичай в сушильній камері  $p_2$ , причому зміна  $T$  більш різке, ніж зміна  $p$ , тому знаменник виразу (2.28) виявляється негативним і показник політроп  $n < 0$ .

Величину  $n$  можна виразити як ставлення:

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v} \quad (2.29)$$

де  $c_p$  і  $c_v$  - теплоємність при постійному тиску та постійному обсязі відповідно;  $c$  - теплоємність, що відповідає процесу в зерносушильній камері.

Так як  $n < 0$ , то, отже, теплоємність  $c$  відповідна даному процесу, більше  $c_v$ , але менше  $c_p$ .

Зміна стану газу в атмосфері при виході з камери представлено політропою  $2-0$ , що лежить між ізотермою  $T_2 = \text{const}$  та ізобарою  $p_2 = \text{const}$ .

Отже, у цієї політропи показник  $n$  знаходиться від 0 до 1.

Оскільки диференціал теплоти  $dQ = TdS$ , то  $T-S$  - діаграмі відповідні площі становлять у масштабі теплоту, сприйняту чи віддану повітрям. Площа  $0-1-б-а$  еквівалентна теплоті, повідомленій повітрям у калорифері. Площа  $1-2-е-б$  представляє в масштабі теплоту, виділену повітрям в сушильній камері. Площа  $2-0-а-е$  еквівалентна теплоті, втраченій з повітрям, що йде з сушильної камери, а площа  $0-1-2$  представляє теплоту, еквівалентну роботі циклу.

Якщо процес вважати ізобарним, то теплота, виділена в сушильній камері, була б еквівалентна площі  $1-2'-с-б$ ; ця ж площа більша за площу  $1-2-е-б$ , еквівалентну дійсно виділеній теплоті, на величину площі, заштрихованої на діаграмі. Отже, припущення про ізобарність процесу, що відбувається в сушильній камері, призводить до завищення кількості виділеної теплоти

порівняно з кількістю теплоти, що дійсно виділяється. Так як фактично виділяється менше теплоти, то випаровується відповідно менше вологи і фактична продуктивність зерносушарки менша, ніж отримана з розрахунку з урахуванням ізобарності процесу.

Таким чином, відповідно до ентропійної діаграми термодинамічні втрати  $q_{\text{терм}}$ , обумовлені політропічністю процесу, що відбувається в сушильній камері, представлені заштрихованою площею 1-2'-c-e-2. Ця теплота витрачена на роботу циклу і на збільшення втрат теплоти з газом, що йде, у зв'язку з політропічністю процесу [22].

Таким чином, насправді, внаслідок зниження тиску сушильного агента в камері робота, що повідомляється йому атмосферним тиском при стиску, виявляється менше, ніж при ізобарному стиску. Це означає, що з політропічному процесі меншою мірою компенсується робота розширення газу за його нагріванні в калорифере. Виділена при цьому теплота  $Q = \Delta UL$ , тому при політропічному процесі вона буде меншою, ніж при ізобарному, хоча внутрішня енергія  $\Delta U$ , що визначається лише різницею температур, змінюється на одну й ту саму величину для обох процесів.

Якщо рівняння теплового балансу ізобарної теоретичної сушарки ввести термодинамічні втрати  $q_{\text{терм}}$ , то отримаємо рівняння балансу з урахуванням політропічності процесу:

$$q_{\text{кал}} = q_{\text{и}} + q_{\text{ух.в}} + q_{\text{терм}} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} q_{\text{терм}} &= 0,000015(T_1 + T_2)(d_2 - d_1) \text{ ккал/кг с. в.} = \\ &= 0,002299(T_1 + T_2)(d_2 - d_1) \text{ кДж/(кг с.в.).} \end{aligned}$$

Таким чином, в обґрунтування необхідно внести необхідні корективи, що враховують термодинамічні втрати в процесі сушіння зерна та виявляють дійсну потребу в теплоті, що відповідає заданій продуктивності зерносушильної установки.

Якщо термодинамічний аналіз застосувати до розгляду варіантів зерносушильного процесу (з рециркуляцією, з додатковим підігрівом повітря

в сушильній камері та ін.). Виявляється, що ці заходи дають не тільки технологічний ефект щодо регулювання режиму процесу, але і підвищують теплову ефективність роботи зерносушильної установки. Основною причиною цього є те, що замість одного циклу без рециркуляції відбувається  $(n + 1)$  циклів з рециркуляцією, а втрата теплоти з газами (при тій же температурі  $t_2$ ) збільшується незначно.

### **Висновки по розділу**

1. Використання контактного електротеплообмінника забезпечує достатню рівномірність розподілу енергії та температури у всій зоні теплообмінника, що дозволяє вибрати найбільш підходящий режим теплової обробки зерна згідно з технологічними вимогами.
2. Розроблені теоретичні моделі відображають ключові особливості процесу контактного сушіння тонких шарів зерна, що реалізується в пропонованій сушильній установці. Ці дані придатні для розрахунку температурних полів всередині шару, що обробляється, а також для оцінки інших характеристик процесів теплопередачі.
3. Оптимальна товщина шару зерна повинна лише трохи перевищувати максимальний діаметр зерна, оскільки це значно підвищує ефективність передачі теплоти від поверхні до зерна.
4. Встановлені співвідношення характеризують взаємозалежність експлуатаційних режимів теплової обробки та конструкційно-технологічних особливостей нової установки.
5. Запропоновані теоретичні викладки допомагають визначати найкращі конструкційні параметри та робочі режими встановлення, виходячи із заданих критеріїв якості кінцевого продукту теплової обробки.

### **3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ СУШКИ НАСІННЯ ДРІБНОНАСІННИХ КУЛЬТУР**

Для забезпечення ефективної техніко-економічної моделі функціонування розробленої нами контактної сушарки [14] на оптимізованих режимах необхідно забезпечити максимально можливу пропускну здатність. Її необхідно реалізувати з урахуванням технологічних особливостей дрібного насіння, для сушіння якого в основному і призначено розроблений засіб механізації. Крім того, важливо мінімізувати енергетичні витрати на процес випаровування вологи з матеріалу, що обробляється при дотриманні всіх технологічних параметрів процесу сушіння.

#### **3.1 Вибір та обґрунтування досліджуваних факторів**

Питання про вибір і обґрунтування числа факторів, що вводяться в дослідження, вирішується з кількох точок зору, і перш за все, з точки зору мети дослідження. Які параметри об'єкта вивчення ми хочемо дослідити, на які питання отримати відповіді або які гіпотези, висунуті на початку дослідження, хочемо підтвердити або спростувати – від цього залежить вибір критерію оптимізації та досліджуваних факторів.

Після вибору параметрів, що цікавлять нас, висувається гіпотеза про передбачуваний вплив на них тих чи інших факторів. Зазвичай число таких чинників дуже велике, їх необхідно виділити найістотніші. Більшість систем підпорядковується принципу Парето, який свідчить, що з погляду показників системи істотні деякі чинники з усіх, що у більшості систем 20 % чинників визначають 80 % властивостей системи, інші 80 % визначають лише 20 % властивостей [15].

Велике значення має також природа досліджуваних факторів (кількісні, якісні чи спільно ті та інші) з нею пов'язані як вид моделі досліджуваного явища, і спосіб аналізу експериментальних даних. Кількісним факторам відповідає регресійний аналіз, якісним – дисперсійний, змішаним – ковариційний.

Кожен фактор може брати участь в експерименті одним із трьох способів:

- 1) залишатися на постійному рівні, тобто. відігравати роль граничних умов;
- 2) змінюватися випадковим чином і цим вносити помилку в експеримент;
- 3) може бути вимірюваним та керованим.

Нарешті, чинники мають задовольняти умовам їхньої сумісності, тобто. досліджувана система повинна допускати спільний вплив на неї досліджуваних факторів у всьому діапазоні їх зміни, що визначається, з одного боку, метою дослідження, з іншого – технічними, економічними чи іншими обмеженнями досліджуваної системи.

Питання вибору кількості рівнів пов'язані з виглядом майбутньої моделі. Якщо модель служить цілям знаходження оптимальних умов роботи виробу або системи, то фактори достатньо мати на двох крайніх рівнях – максимальному та мінімальному. Якщо модель варта з'ясування механізму явищ, тобто визначення впливу факторів у діапазоні їх зміни, то двох крайніх рівнів недостатньо, необхідні проміжні значення. Проте слід пам'ятати, кожен додатковий рівень збільшує кількість експериментів.

Кожен представник якісного чинника є рівнем, та його впорядкування є довільним. Якщо досліджуються кількісні чинники, то визначення лінійних ефектів достатньо мати два рівня, для квадратичних ефектів – три. Загальне правило таке: число рівнів дорівнює мінімальному числу необхідних визначення функції точок. При знаходженні інтервалу між сусідніми рівнями необхідно, щоб інтервал був не меншою за подвійну помилку застосовуваного для оцінки даного фактора засобу контролю. В іншому випадку рівні фактора будуть невиразні. Для кількісних чинників це становище має значення, для якісних – ніякого.

Аналіз даних істотно спрощується, якщо зробити рівні рівновіддаленими один від одного. Таке розташування є ортогональним, що полегшує визначення коефіцієнтів поліноміальних моделей.

Однак у деяких випадках план дослідження і, отже, модель, тобто. число досліджуваних чинників та його рівнів, визначаються обмеженістю в часі, обмеженістю наявних ресурсів тощо. Тут потрібні певні компроміси.

При виявленні рішення екстремальної задачі – обґрунтуванні оптимального спільного впливу факторів на процес сушіння, враховували існуючі уявлення про фізичний зміст процесу теплового впливу на матеріал, що обробляється. При цьому провели попередній відсів несуттєвих факторів, що діють, а також виявили в запозичені фактори процесу. Обидві зазначені категорії чинників під час вирішення оптимізаційного завдання в облік не брали. Чинники, які можна контролювати, становили основу для обробки результатів проведених експериментальних досліджень.

Слід зазначити, що внутрішньогрупові та міжгрупові параметри залежні один від одного. Наприклад, параметри процесу теплового контактного сушіння впливають на загальний механізм теплопідведення, тобто. впливають на теплотехнічні та конструктивні параметри та ін. Масштабний аналіз процесів, що протікають при контактній сушці дає можливість розкрити основні залежності цих параметрів від тих чи інших факторів.

Для обґрунтування оптимальних режимів роботи проекрованої сушарки при роботі з дрібним насінням будемо використовувати фактори процесу, які можна контролювати і якими можна керувати (таблиця 3.1).

Фактори, наведені в таблиці 3.1, є вхідними параметрами в кібернетичній моделі проекрованої сушарки для сушіння насіння дрібнонасіневих культур.

Вихідними параметрами у разі вирішення сформованої математичної моделі стануть: пропускна здатність установки для сушіння насіння, споживана потужність та підсумкова якість насіння дрібнонасіневих культур, що піддаються тепловій обробці [16].

Таблиця 3.1 - Фактори, що впливають на процес сушіння насіння

Найменування фактора	Позначення	Розмірність	Взаємопов'язані фактори
1. Температура поверхні	$X_1$	°C	$X_9$
2. Швидкість руху насіння	$X_2$	м/с	$X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_{11}$
3. Подача зерна до сушарки	$X_3$	кг/с	$X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_{11}$
4. Крок спіралі	$X_4$	м	-
5. Висота витків спіралі	$X_5$	м	-
6. Площа поперечного перерізу завантажувального бункера	$X_6$	м <sup>2</sup>	-
7. Площа поперечного перерізу вивантажувального вікна	$X_7$	м <sup>2</sup>	-
8. Діаметр спіралі	$X_8$	м	-
9. Встановлена потужність нагрівальних елементів	$X_9$	кВт	$X_2, X_3$
10. Встановлена потужність приводу транспортуючого робочого органу	$X_{10}$	кВт	$X_2, X_3, X_5, X_6, X_7, X_8, X_{11}$
11. Частота обертання спіралі	$X_{11}$	с <sup>-1</sup>	$X_2, X_3$
12. Число заходів спіралі	$X_{12}$	-	$X_2, X_3, X_4, X_{11}$

Проранжуємо вибрані чинники за рівнем важливості. Слід зазначити, що в установці контактного типу, що розробляється, для забезпечення якісного теплового впливу на насіння необхідно оптимізувати дві системи:

- 1) систему розподілу насіння по поверхні та одночасного їх транспортування одиничним шаром;
- 2) систему теплопідведення, що забезпечує рівномірне і з мінімальними тепловими втратами підведення теплоти до насіння, що рухається.

З урахуванням існуючих теоретичних та експериментальних обґрунтувань процесів теплового впливу на насіння при контактному теплопідведенні нами були виявлені фактори, що надають суттєву дію на процес: температура поверхні, що гріє  $X_1$  і частота обертання транспортуючого робочого органу  $X_{11}$ . Причому дані параметри відносяться до категорії і керованих та контрольованих. Оптимізуючи цільову функцію процесу сушіння насіння в розробленій сушарці, необхідно враховувати

пропускну здатність установки, яка, у свою чергу, залежить від взаємопов'язаних факторів: швидкості руху насіння  $X_2$  або від частоти обертання робочого органу, що транспортує,  $X_{11}$ .

Крім того, одним з пошукових завдань експериментального блоку досліджень, що проводиться нами, стало виявлення впливу кількості заходів спіралі транспортуючого робочого органу на якісно-енергетичні характеристики процесу сушіння насіння дрібнонасінневих культур.

При експериментальному рішенні оптимізаційної моделі з обґрунтування параметрів роботи створеної сушарки важливо застосовувати таку цільову функцію, яка поєднає в собі такі параметри, як універсальність, вимірюваність, і, головне, мати можливість бути чітко інтерпретованою на основі існуючих фізичних законів.

### **3.2 Аналіз показників та методів проведення основного дослідження**

Системні методи дослідження, що є продуктом системних уявлень, теорій, моделей, широко використовуються при проведенні досліджень процесів сушіння зерна та насіння дрібнонасінневих культур. При цьому вже отримані певні і досить важливі результати. По-перше, системи мають властивість ієрархічності. Це означає, що й можна розділити більш дрібні системи, які, своєю чергою, діляться на підсистеми. Відмінність систем і підсистем друг від друга полягає у відмінності їх структур.

Розвиток уявлень про рівні у будові та організації систем є передумовою розкриття характеру показників виробів, або штучно створених людиною систем, їх взаємодії, формування та управління. Системний підхід до досліджень характеризується спільним аналізом будови системи та взаємодії елементів, її складових, тобто. аналіз її структури. По-друге, системи та підсистеми поводяться відносно автономно. У зв'язку з цим важливого значення набувають дослідження з питань взаємовідносин різних систем та взаємодії вищих систем з нижчими. Використання апарату математичної статистики, теорії ймовірностей, теорії інформації та ін. сприяє виробленню

більш загальних, абстрактніших характеристик функціонування систем, які є кодовим записом їх існування, оскільки виражають поведінку, взаємодію елементів і систем, структуру систем. Важливу роль методології досліджень займають питання кодування інформації, перекодування, взаємодії кодів тощо.

Наші знання та уявлення про системи нерозривно пов'язані з методами їх дослідження, оскільки постановка завдання дослідження з необхідністю веде до створення методів її вирішення, які розробляються найчастіше до появи теорії питання.

Історично в науці склалися та отримали розвиток методи: макроскопічний (функціональний) та мікроскопічний (елементний). В основу макроскопічного методу дослідження покладено пізнання властивостей та поведінки системи, тобто пізнання таких властивостей, які характеризують системи у їхньому зовнішньому прояві. Звичайно, тут враховують той факт, що системи утворені з окремих елементів, проте закони взаємодії та взаємозв'язку між елементами залишаються в основі невідомими. При дослідженні системи піддають впливам на вході і реєструють їх реакції у відповідь на виході. При мікроскопічному, або елементному методі властивості, що характеризують спільність системи в цілому, дослідники прагнуть вивести з властивостей елементів, що становлять систему. У цьому передбачається, що властивості системи загалом надають зворотного впливу властивості елементів у системі.

Обидва методи, як макроскопічний, так і мікроскопічний, виникли і проникли в інші області досліджень з класичної механіки, де властивості системи в цілому визначаються сумою властивостей її елементів. При дослідженнях систем типу механічних обидва методи дають однаково правильні результати; застосування цих методів для систем дифузних, де не можна чітко розмежувати дію чинників різної фізичної природи, відразу ж виявляє їх обмеженість.

У експериментальних дослідженнях нині переважно використовують метод однофакторного експерименту, у якому змінюється один досліджуваний чинник і стабілізуються інші. Вибір рівнів стабілізованих факторів є довільним та обумовлюється досвідом, інтуїцією, волею і навіть настроєм експериментатора. Сам метод відповіді питання виборі рівня стабілізованих чинників не дає.

Схематично план, наприклад, проведеного двофакторного експерименту з оптимізації енерговитрат на процес сушіння зерна, в якому кожен фактор береться на п'яти рівнях, представлений на рисунку 3.1, де хрестиками позначені поєднання досліджених рівнів факторів X і Z.

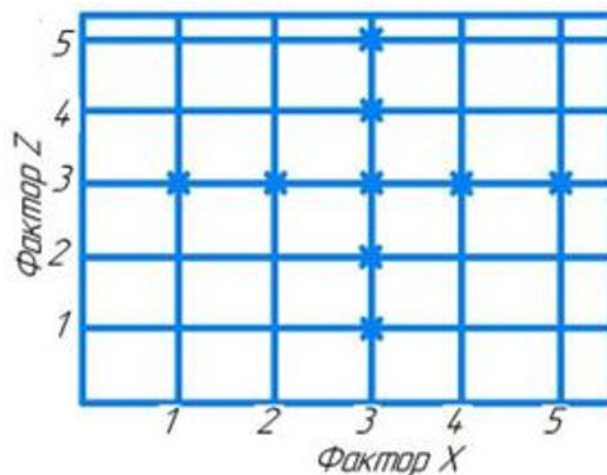


Рисунок 3.1 – Схема двофакторного експерименту

Одночасно однофакторний метод дозволяє нам знаходити такі відносно прості функції, як

$$y = ax^n + bz^m; y = ax^n + b^m; y = ax + b^{cx}.$$

При цьому мають місце і складніші випадки, такі як

$$y = ax \sin^{bx/z};$$

$$y = a + bx^n + kxz; y = ax^{bz};$$

які навряд чи можуть бути встановлені за допомогою цього методу.

Варіюючи один фактор і стабілізуючи інші на довільно вибраних рівнях, припускаємо, що рівень стабілізованого фактора представляє весь його діапазон. При однофакторному методі можна отримати локальний оптимум

щодо кожного дослідженого фактора. Глобальний оптимум по всіх змінних можна отримати суто випадково, оскільки через велику кількість поєднань багато областей факторного простору змінних залишаються недослідженими. Загальна кількість експериментів за однофакторним методом

$$n = p^k,$$

де  $p$  - число рівнів факторів;  $k$  - число досліджуваних факторів.

В результаті досліджень за однофакторним методом виходить маса графіків, які мають переважно ілюстративний характер. Якщо розглядати чинники як сукупність елементів системи, кожен рівень - як елемент, усе вищевикладене залишається справедливим і щодо систем, тобто. при однофакторному методі досліджувати систему, що складається з  $p$  елементів, кожен із яких перебуває на  $k$  рівнях (варіантах), практично неможливо.

Як за теоретичних, і при експериментальних методах нами досліджувалися конкретні системи та отримані дані поширювалися всю сукупність, тобто. використовувався метод індукції. Проте індуктивним методом який завжди вдається розкрити властивостей, властиві сукупності систем. Кожна система, зокрема і штучна, тобто. створена дослідником, має властивість масовості. Сукупність систем має ще ряд властивостей: випадковість, різноманітність, незалежність і стійкість частот показників.

Отримання будь-якого параметра системи є випадковою подією. Окрема випадкова подія (параметр системи) є подія з багатьох можливих, тобто. сукупність систем має різноманітність. Будь-які прямі зв'язки та зумовленість показників окремих систем відсутні, тобто. сукупність має незалежність показників. Кожна подія у випадковому масовому явищі може відтворюватися в масовому масштабі, причому зі зростанням числа подій відносна частота кожного з них має стійкість.

Перелічені властивості сукупності систем не встановлюються і не виявляються індуктивним методом дослідження, але є вихідними положеннями класичного побудови теорії ймовірностей, тому і теоретичні, і

експериментальні результати дослідження можуть бути правильно зрозумілі та інтерпретовані лише з ймовірнісних позицій.

Необхідність дослідження систем спричиняє і розробку методів їх дослідження та аналізу результатів. При цьому далеко не байдуже з точки зору результатів, з яких ідейних позицій здійснюється підхід до досліджень, які вихідні передумови, на яких базується проведення експерименту. У зв'язку з обмеженістю людських, матеріальних, фінансових та інших ресурсів, які можуть використовуватися в наукових дослідженнях, проблема оптимізації досліджень та експериментів може бути сформульована наступним чином: отримання максимуму інформації про об'єкт, що досліджується, при витраті певної, фіксованої кількості ресурсів або використання мінімуму ресурсів для отримання певної інформації.

Підвищення ефективності досліджень шляхом оптимального використання ресурсів призводить до визначення їх пропорційності та комбінації. Але цей шлях вирішення проблеми ефективності експерименту не може і не повинен бути головним і єдиним, оскільки йдеться про такий специфічний предмет, як інформація. Під час розробки методів дослідження нами було пред'явлено такі вимоги.

1. Методи мають бути ефективними з погляду економії живої та суспільної праці дослідників та виробників.
2. Методи повинні враховувати та розкривати природу та механізм досліджуваних процесів та явищ. Застосовувані нині експериментальні методи носять, переважно, індуктивний характер. При їх застосуванні не розкриваються або, принаймні, не оцінюються кількісно властивості, властиві всій сукупності систем, що вивчаються.
3. Вони мають не просто фіксувати показники систем, а й керувати ними.

Метою проведення нами наукових досліджень є, зрештою, отримання інформації про досліджувані об'єкти чи системи, зокрема, обґрунтування параметрів та режимів роботи розробленого нами пристрою для сушіння насіння дрібнонасіневих культур. У цьому полягає відмінність наукових

досліджень про виробництва матеріальних об'єктів. Однак з точки зору ефективності у всіх виробництв центральною є проблема вимірювання витрат та результатів праці. Тому шляхи підвищення ефективності наукових досліджень полягають як у зменшенні або мінімізації витрат для отримання певних результатів, так і максимізації результатів при фіксованих витратах.

Ефективність досліджень визначається багатьма чинниками і, зокрема, вибором напрямів досліджень та організацією в межах обраних напрямів.

Використання концепцій вибірки та генеральної сукупності призводить до економії витрат та часу під час обстеження об'єктів масового характеру. По вибірці кінцевого обсягу з певною ймовірністю складається судження про властивості генеральної сукупності загалом. Класичний підхід до організації вибірки, мабуть, єдиним при організації вибірки для самостійних елементів. Якщо дослідити системи, що складаються хоча б із кількох взаємозамінних елементів, то можливий інший комбінаторний підхід до організації вибірки.

Цей підхід базується на тому, що якщо в системі якийсь один елемент замінюється однаковим, то ця заміна впливає на всю систему. При організації вибіркового контролю систем, що складаються з елементів  $N$  кожна, значно скорочується кількість досліджуваних об'єктів  $k$  при врахуванні того, що заміна кожного  $n$ -го елемента однорідним утворює в функціональному відношенні іншу систему.

Повна кількість поєднань  $kN$  елементів по  $k$  становить

$$C_{kN}^k = \frac{kN}{(kN-N)!N!} \quad (3.1)$$

Наприклад, при  $k = 9$ ,  $N = 7$   $C = 4,68 \cdot 10^6$ . Таку кількість поєднань неможливо перевірити, і тому їх перебір мають бути накладені спеціальні обмеження.

### 3.3 Елемент системи як об'єкт дослідження

При системному підході у дослідженнях властивості елементів від початку ставляться у залежність з інших елементів системи. Звичайно,

дослідження елементів систем ведуть ізольовано, але в такому пізнанні значна і навіть вирішальна роль надається встановленню зв'язків позасистемних характеристик із системними.

Присутність того чи іншого елемента в системі обумовлюється її структурою, яка визначає склад елементів і їх зв'язок між собою. Зв'язки елементів у системах такі, що стосовно системі кожен елемент є підлеглим, наявність його залежить від структури системи та взаємодії її частин. Положення про взаємопов'язаність та взаємозумовленість елементів у системах є одним з найважливіших у системних дослідженнях та аналізі їх результатів. Пізнання об'єктів у складі систем є глибшим проникненням як у сутність самих об'єктів, і систем. Досвід показує, що характеристики елементів, визначені поза системами, не завжди однозначно відповідають системним характеристикам, що, входячи в систему і взаємодіючи з нею, елемент змінює свої властивості. Ця зміна є відображенням якості неоднозначності елементів, тобто при дослідженні елемента в різних системах кількісні його характеристики впливу на показники системи будуть змінюватися від системи до системи. У зв'язку з неоднозначністю показників елементів принципове значення має розподіл показників за рівнем їх спільності відповідно до правил теорії інформації. Робота систем, їх існування записуються мовою систем, причому запис є кодуванням існування системи. Кодовий запис відноситься і до елемента, закономірності функціонування якого слід шукати на вищих рівнях кодування. Але, оскільки в окремих випадках елементами систем є також системи, вищевикладене щодо елементів залишається справедливим щодо систем. Властивості елементів, перераховані вище, властиві однаково також і системам. Відповідно пізнання систем передбачає пізнання їх властивостей в цілому, властивостей елементів та способів їх зв'язку.

### 3.4 Кодування факторів і методика складання план-матриці експериментів

Припустимо, що слід досліджувати вплив кількох чинників на критерій оптимізації і оцінити вплив кожного елемента та його сукупний вплив.

Викладені вище припущення щодо впливу режимів роботи на критерій оптимізації справедливі не лише у розглянутому конкретному випадку. Є досить багато аналогічних випадків, коли вплив інших елементів системи спотворює значною мірою вплив досліджуваних елементів. Отже, необхідно виробити певний систематичний спосіб змішування різних елементів, щоб, з одного боку, скоротити кількість експериментів і, з іншого, спростити та впорядкувати статистичний аналіз. Така система розроблена та заснована на сукупності правил, схожих на правила звичайної арифметики.

При використанні, наприклад, 9 складових числа в арифметиці такими числами є 0; 1; 2; ...; 6; 7; 8. За допомогою цих правил було отримано схему поєднань  $k$  факторів сушіння на  $p$  досліджуваних рівнях (рисунок 3.5).

0	1	2	3	4	5	6	7	8	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	-----		-----		5				2 = 1 x 2	-----				6				
2			-----						4 = 2 x 2									
3			-----						6 = 3 x 2									
4			-----						8 = 4 x 2									
5	-----								1 = (5 x 2) - 9	-----					6			
6	-----								3 = (6 x 2) - 9									
7			-----						5 = (7 x 2) - 9									
8			-----						7 = (8 x 2) - 9									

Рисунок 3.2 – До обґрунтування кількості поєднань взаємодіючих факторів експерименту

Верхній перший рядок у всіх квадратах однаковий. Стівпці утворені за правилами множення. При множенні чисел 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8 на одиницю виходять ті самі числа. Ці числа утворюють перший стівпець першого квадрата.

Помножуючи числа 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8 на 2, отримуємо 0; 2; 4; 6; 8; 1; 3; 5; 7. Перші стівпці третього та четвертого квадратів отримані множенням

тих самих чисел відповідно на 3 і 4. Потім, дотримуючись правил додавання, доповнюємо квадрати. Під сумою мається на увазі сума чисел за модулем 9, так що, наприклад:  $7 + 6 = 4(13 - 9)$ ;  $3 + 6 = 0(9 - 9)$ ;  $3 + 2 = 5$ .

Шляхом такої побудови виходить  $n - 1$  числових квадратів ( $n = 9$ ).

У кожному з квадратів будь-яке число зустрічається один раз на рядку і один раз на стовпці. У другому квадраті дома цифри 0 першого стоять послідовно цифри 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8 і таке інше для кожного квадрата. Подібне розміщення чисел відоме під назвою ортогональних латинських квадратів. Таблиця поєднань (таблиця 3.2) складається з чисел, що мають однакове позиційне розташування у квадраті; кожен рядок таблиці визначає поєднання факторів та їх рівнів чи умови проведення експерименту.

Таблиця 3.2 - Поєднання незалежних факторів дослідження та рівнів їх варіювання

№ п/п	Рівний фактор				ів			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>	
1	0	0	0	0	0	0	0	
2	1	1	1	1	1	1	1	
3	2	2	2	2	2	2	2	
4	3	3	3	3	3	3	3	
5	4	4	4	4	4	4	4	
6	5	5	5	5	5	5	5	
7	6	6	6	6	6	6	6	
8	7	7	7	7	7	7	7	
9	8	8	8	8	8	8	8	
10	1	2	0	4	5	7	8	
11	2	3	1	5	6	8	0	
...	...	...	...	...	...	...	...	
77	3	2	4	0	8	6	5	
78	4	3	5	1	0	7	6	
79	5	4	6	2	1	8	7	
80	6	5	7	3	2	0	8	
81	7	6	8	4	3	1	0	

При проведенні досліджень, наприклад, семи факторів ( $a, b, c, d, e, f, g$ ) на 9 рівнях кожен загальна кількість експериментів за однофакторним методом становить  $n = p^k = 9^7 = 4,68 \cdot 10^6$ .

При застосуванні ортогональних латинських квадратів 9-го порядку кількість експериментів можна зменшити в  $9-5$  разів, і тоді загальна їх кількість становитиме  $n = p^{k-5} = 9^{7-5} = 81$ .

Розташування чисел в латинських квадратах є оптимальним, тому що кожна цифра зустрічається в кожному стовпчику та рядку один раз. Три ортогональні квадрати утворюють латинський квадрат третього порядку, *ортогональних* квадратів - латинський квадрат  $n$ -го порядку [21].

Однією з основних вимог при проведенні багатфакторних досліджень процесу сушіння насіння дрібнонасіневих культур нами було встановлено рандомізацію умов проведення експериментів. Вимога рандомізації у тому, щоб зробити випадковими ті систематично діючі чинники, які важко піддаються обліку та контролю. Ці чинники розглядалися нами як випадкові величини, і, отже, їх облік вівся статистичними методами. Як засіб рандомізації використовували таблицю випадкових чисел.

### **Висновки по розділу**

1. Описані методи оптимізації вибірки факторів та умов проведення досліджень дозволять мінімізувати вплив випадкових помилок та підвищити точність вимірювань. Використання плану повного факторного експерименту дозволяє встановити оптимальні поєднання незалежних факторів, що забезпечують найбільший ефект проведених досліджень.
2. Порівняльний аналіз ефективності різних підходів до обробки експериментальних даних, включаючи регресійний аналіз, дисперсійний аналіз та кореляційний аналіз, дозволяє вибрати оптимальний, що підходить для проведених досліджень процесу сушіння.

## ВИСНОВКИ

1. На підставі проведеного аналізу відомих технологій та засобів механізації сушіння зерна виявлено, що краще використовувати комбінований спосіб сушіння, однак для зерносушарок щодо невеликої продуктивності вигідніше використовувати контактний спосіб підведення теплоти. При цьому товщина оброблюваного шару повинна незначно перевищувати максимальний розмір насіння, що висушується. Реалізація цього принципу можлива на основі застосування робочих органів, виконаних у формі архімедової спіралі, що поєднують процеси сушіння і транспортування зерна.

2. Встановлено, що ефективний пристрій для сушіння насіння дрібнонасінневих культур повинен включати в себе циліндричний кожух, зовнішня поверхня якого покрита шаром теплоізолюючого матеріалу, завантажувальний бункер, вивантажувальне вікно, співвісно встановлений всередині кожуха з можливістю обертання спіральний робочий орган і електронагрівальний елемент.

3. Використання контактного підведення теплоти забезпечує гнучкість розподілу енергії та температури теплообмінником, дозволяючи вибирати найбільш підходящий режим теплової обробки насіння. Розроблені теоретичні моделі відображають ключові особливості процесу контактного сушіння тонких шарів зерна, що реалізується в пропонованій сушильній установці.

4. Отримані аналітичні вирази придатні для розрахунку температурних полів всередині шару, що обробляється, а також для оцінки інших характеристик процесів теплопередачі. Виявлено, що забезпечення товщини шару насіння, що трохи перевищує їх максимальний діаметр, значно підвищує ефективність передачі теплоти до насіння від поверхні.

5. Сформульовані в результаті теоретичних досліджень залежності дозволяють визначити оптимальне співвідношення часу сушіння матеріалу, швидкості сушіння та пропускної спроможності пропонованої установки.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Дацишин О. В. Технологічне обладнання зернопереробних та олійних виробництв / О. В. Дацишин, А. І. Ткачук, О. В. Гвоздєв та ін. / За редакцією О. В. Дацишина. Навчальний посібник. – Вінниця: Нова Книга, 2008. – 488с.
2. Станкевич, Г. М. Сушіння зерна : підручник для студентів закладів вищої освіти, які навчаються за спец. "Технологія зберігання і переробки зерна" та працівників зернової галузі. / Г. М. Станкевич, Т. В. Страхова, А. В. Борта. — Вид. 2-ге, перероб і допов. — Одеса : КП ОМД, 2021. — 248 с.
3. Станкевич, Г.М. Дослідження аеродинамічних властивостей та активного вентиляювання дрібнонасіненних культур / Г.М. Станкевич, Л.К. Овсянникова, О.Г. Соколовська // Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка «Механізація с/г виробництва та переробки с/г продукції». - Харків, 2010. - Вип. 103. - С. 409
4. Активне вентиляювання та сушіння зерна / Гапонюк О.І., Остапчук М.В., Станкевич Г.М. та ін. - Одеса: ВМВ, 2014. -326 с.
5. Дослідження процесу сушіння зернових дрібнонасіненних культур / Г.М. Станкевич, Л.К. Овсянникова, Н.О. Валентюк та ін. // «Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини»: Всеукр. наук.практ. конф., присвячена 50-річчю заснування Харківського державного університету харчування та торгівлі, 0102 червня 2017 р.: [тези] / редкол.: О.І. Черевко [та ін.]. Х.: ХДУХТ, 2017. С. 71-72.
6. Атаназевич В.И. Сушка зерна. М.: Агропромиздат, 1989. – 240 с.
7. Станкевич Г.М., Страхова Т.В. Атаназевич В.І. Сушіння зерна. Київ, Либідь, 1997. – 352 с.

8. Інструкція по сушінню продовольчого, кормового зерна, насіння олійних культур та експлуатації зерносушарок. Одеса–Київ, 1997. – 72 с.
9. Автоматизація технологічних процесів сільськогосподарського виробництва/ І.І.Мартиненко, Б.Л.Головинський, В.П.Лисенко та інші; за редакцією І.І.Мартиненко. – К.: Урожай, 1995. – 224 с.
10. Гончар В.Ф., Тищенко Л.П. „Електрообладнання та автоматизація сільськогосподарських агрегатів і установок”: Навчальний посібник – К.: Вища школа, Головне видавництво, 1989. – 343 с.
11. Довідник сільського електрика/ В.С. Олійник, В.М.Гайдук, В.Ф.Гончар та ін.: за редакцією В.С.Олійника. – 3-е вид. перероблене і доповнене. – К.: Урожай, 1989. – 265 с.
12. Проектування систем електрифікації та автоматизації сільського господарства. Підручник» / І.І.Мартиненко, В.П.Лисенко, Л.П.Тищенко, В.С.Лукач. – К.: Вища школа, 1999. – 201 с.
13. Попович М. Г., Лозинський О. Ю., Клепиков В. Б. та ін. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи. — К.: Либідь, 2005. — 680 с.
14. Сен П. Тиристорні електроприводи постійного струму/П.Сен// Пер. з англ. - М.: Вища школа, 1985. - 232 с.
15. Ковчин С.А., Сабінін Ю.А. Теорія електроприводу/С.А.Ковчин, Ю.А.Сабінін. - С-Пб: Вища школа, 1999. - 496 с.
16. Гольц М.Є., Гудзенко О.Б. Швидкодіючі електроприводи постійного струму із широтно-імпульсними перетворювачами / М.Є.Гольц, А.Б.Гудзенко. - М.: Вища школа, 1986. - 184 с.
17. Забродін Ю.С. Промислова електроніка/Ю.С.Забродін. - М.: Вищ. школа, 1982. - 496 с.
18. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування: Підручник. — 2-ге вид., перероб. — К.: Либідь, 2007. — 656 с.

- 19.Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.І. Сушіння зерна: підруч. – К.: Либідь, 1997. – 351 с.
- 20.Подпряттов Г.І., Скалецька Л.Ф, Сеньков А.М. Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва. – К.: Вища освіта, 2004. – 272 с.
- 21.Пузік Л.М., Пузік В.К. Технологія зберігання і переробки зерна: навч. посіб. – Харків: ХНАУ, 2013. – 312 с.
- 22.Станкевич Г.М., Овсянникова Л.К., Соколовська О.Г. Обробка та зберігання дрібнонасіненних олійних культур: монографія. – Одеса: КП ОМД, 2016. – 128 с.
- 23.Станкевич, Г.М. Обробка та зберігання дрібнонасіненних олійних культур: монографія / Г.М. Станкевич, Л.К. Овсянникова, О.Г. Соколовська. - Одеса: Вид-во КП «Одеська міська друкарня», 2016. – 128 с.
- 24.Овсянникова, Л.К. Фізико-технологічні властивості сучасних сортів дрібнонасіненних культур / Л.К. Овсянникова // «Зернові продукти і комбікорми», Volume 17, Issue 1 |2017. №65/Березень/March/ С. 9-15. DOI: [10.15673/gpmf.v17i1.307](https://doi.org/10.15673/gpmf.v17i1.307)
- 25.Овсянникова, Л.К. Зростання виробництва дрібнонасіненних культур потребує вивчення фізико-механічних і технологічних властивостей для удосконалення їх післязбиральної обробки / Л.К. Овсянникова, С.С. Орлова, Л.О. Валецька //Sciences of Europe (Praha, Czech Republic) Vol. 1, №17 (17) (2017), S. 89-94. DOI: [10.15673/gpmf.v17i3.656](https://doi.org/10.15673/gpmf.v17i3.656)
- 26.Technology cleaning the millet / L.K. Ovsyannikova, L.A. Valevskaya, J.V. Grischuk and oth. // Proceedings of the International Scientific Conference «Topical Issues of Science and Education» July 17, 2017, Warsaw, Poland. Vol. 1. S. 16-18.
- 27.Остапчук, М.В. Математичне моделювання на ЕОМ: підруч. / М.В. Остапчук, Г.М. Станкевич. - Одеса: Друк, 2006. - 313 с.

**Мета дослідження** – розробка установки для сушіння насіння дрібнонасінневих культур з обґрунтуванням оптимальних конструктивних параметрів та режимів її роботи, що забезпечують мінімізацію енергетичних витрат на процес сушіння та необхідну якість готового продукту при дотриманні економічно ефективної пропускної спроможності.

**Об'єкт досліджень** – технологічний процес контактного сушіння насіння дрібнонасінневих культур.

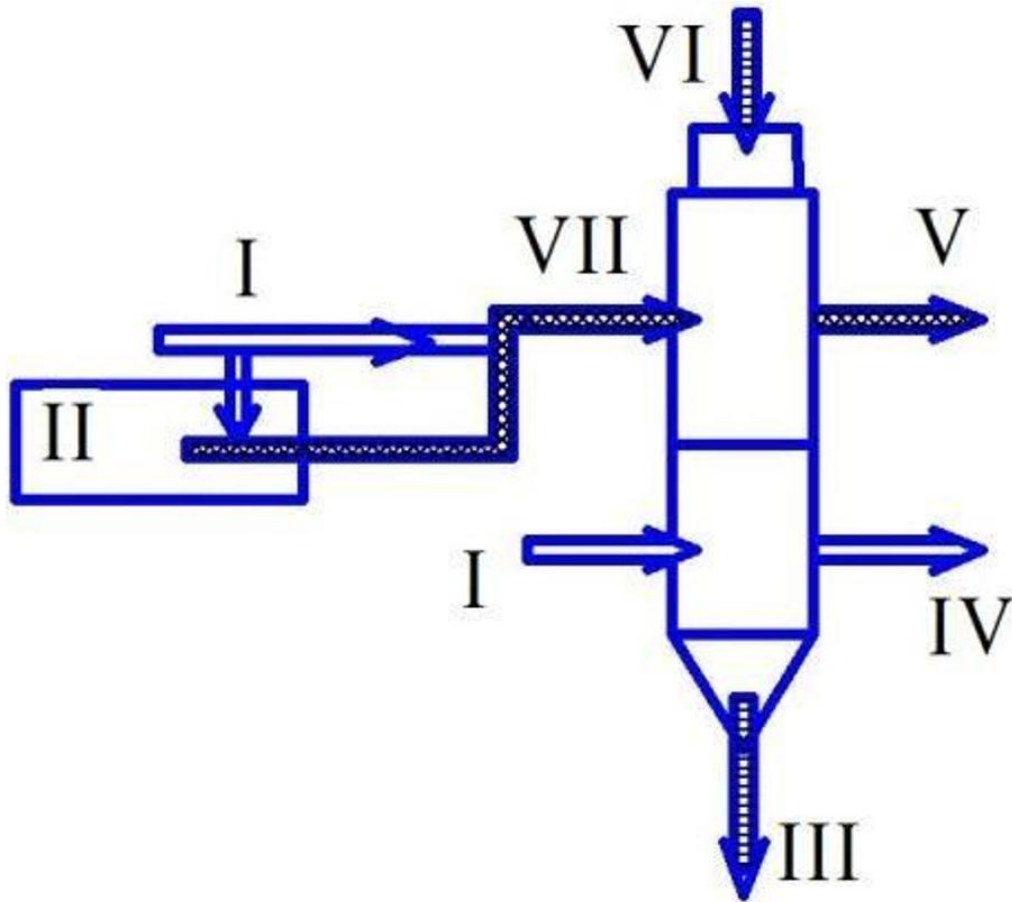
**Предмет дослідження** – параметри технологічного процесу контактного сушіння насіння дрібнонасінневих культур та технічний засіб для реалізації цього процесу.

# Класифікація способів сушіння



Загальна схема реалізації процесу сушіння зерна  
конвективним способом

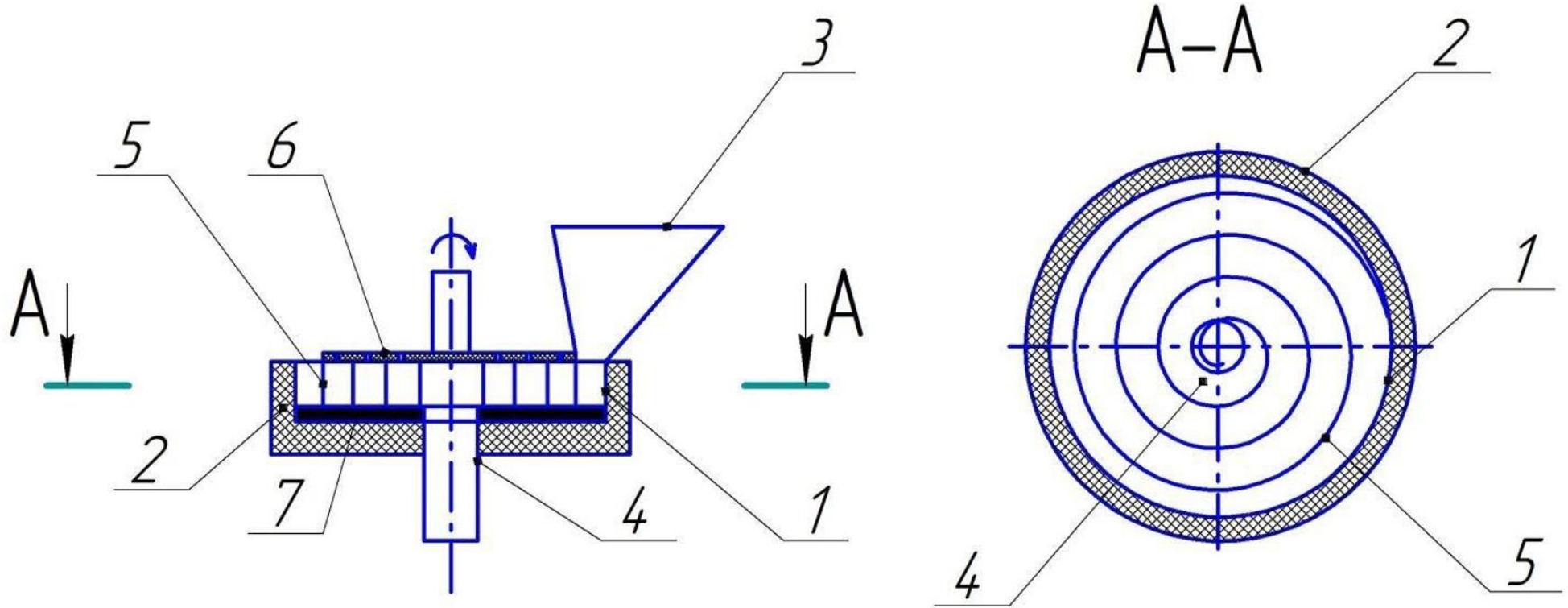
3



- I – атмосферне повітря;
- II – топкові гази;
- III – просушене зерно;
- IV - відпрацьоване повітря;
- V - агент відпрацювання сушіння;
- VI – зерно на сушіння;
- VII - агент сушіння

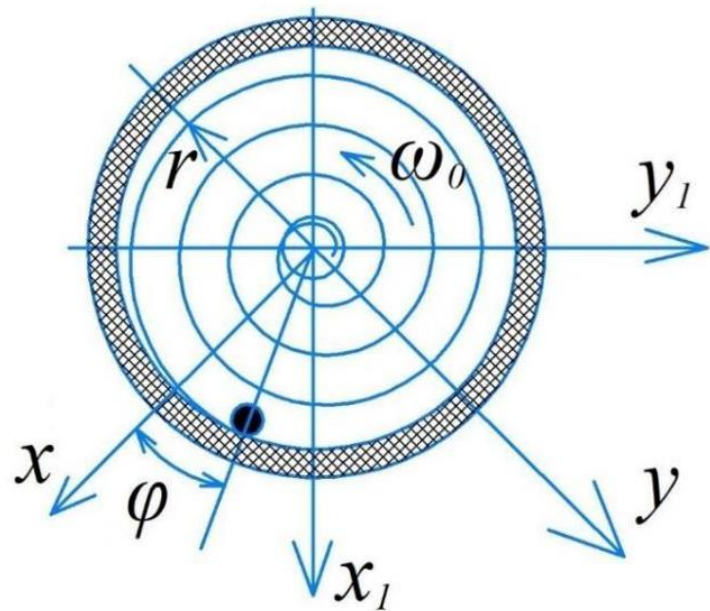
# Установка для сушіння насіння дрібнонасінневих культур

4

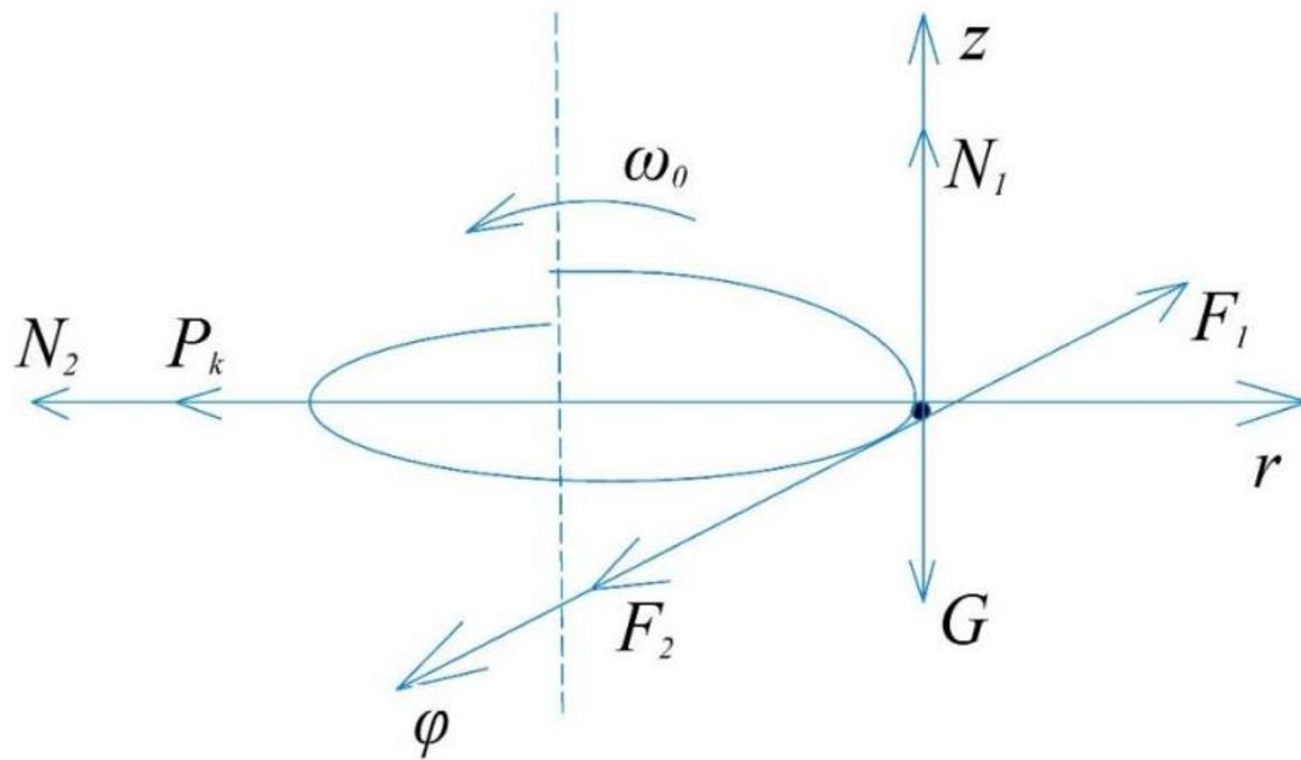


1 – кожух, 2 – теплоізолюючий матеріал, 3 - завантажувальний бункер,  
4 – вивантажувальне вікно пристрою , 5 – транспортуєчий робочий орган,  
6 – пластина, 7 – нагрівальний елемент у формі плоского кільця

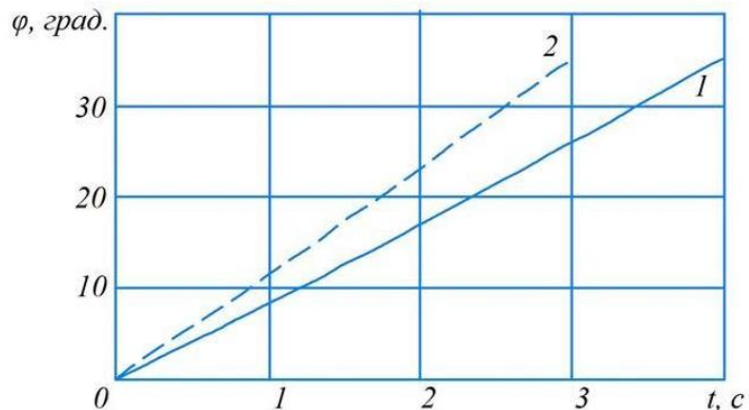
Рух частки між витками спіралі



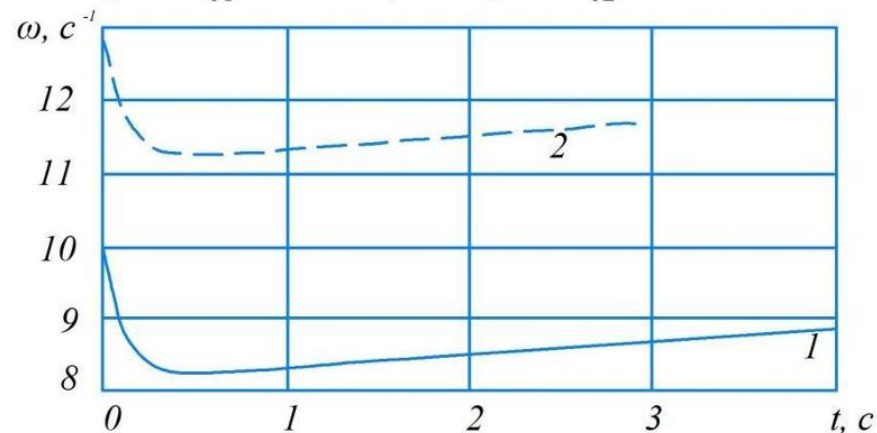
Сили, що діють на частинку, що рухається по диску під дією спіралі



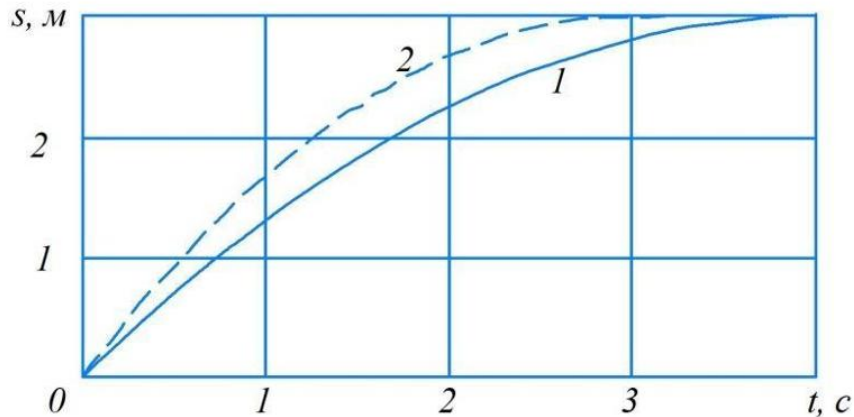
Залежність кутового переміщення частки  $\varphi$  від часу  $t$  при різних кутових швидкостях обертання спіралі  $\omega_0$ :  
1 - при  $\omega_{01} = 10 \text{ с}^{-1}$ , 2 - при  $\omega_{02} = 13 \text{ с}^{-1}$



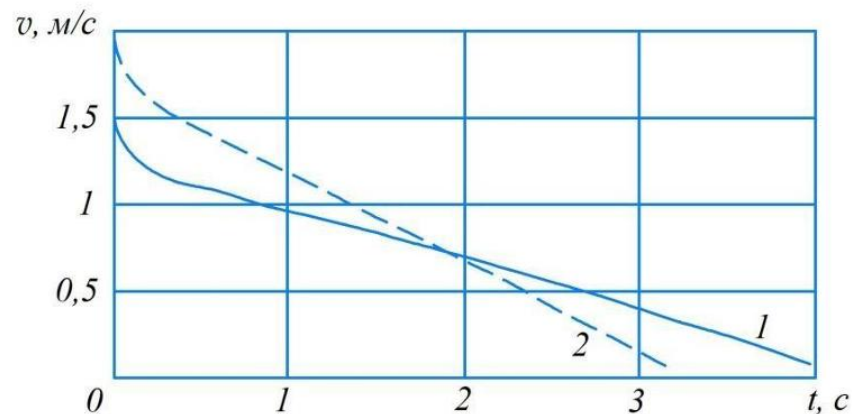
Залежність кутової швидкості частки  $\omega$  від часу  $t$  при різних кутових швидкостях обертання спіралі  $\omega_0$ :  
1 - при  $\omega_{01} = 10 \text{ с}^{-1}$ , 2 - при  $\omega_{02} = 13 \text{ с}^{-1}$



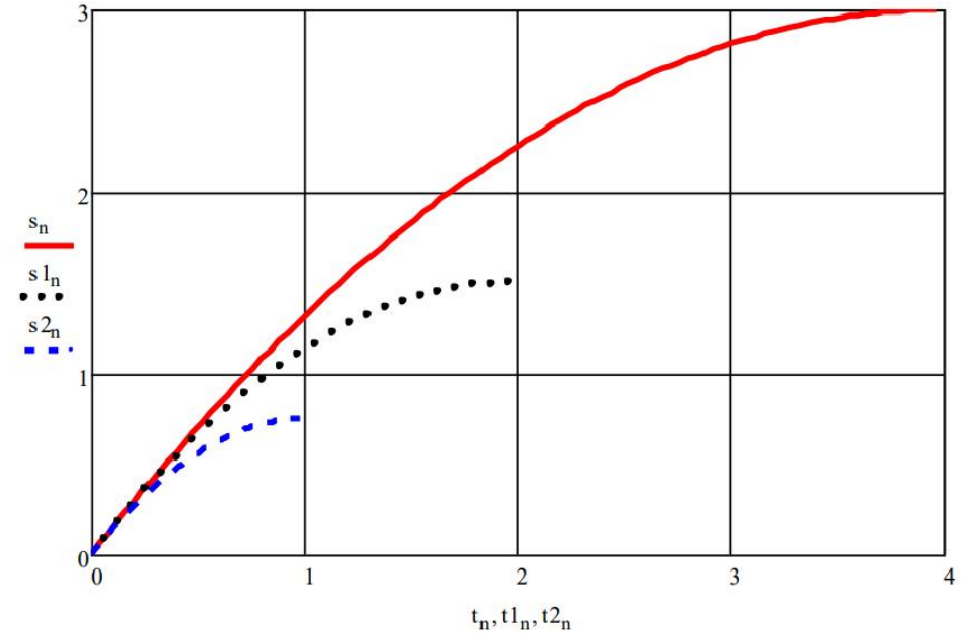
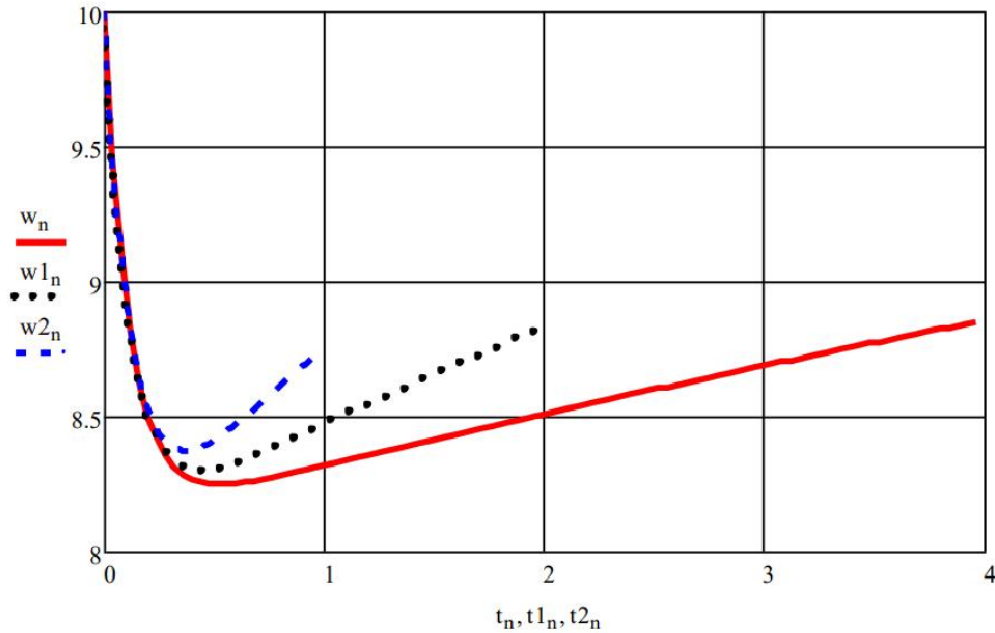
Залежність лінійного переміщення частки  $s$  від часу  $t$  при різних кутових швидкостях обертання спіралі  $\omega_0$ :  
1 - при  $\omega_{01} = 10 \text{ с}^{-1}$ , 2 - при  $\omega_{02} = 13 \text{ с}^{-1}$



Залежність лінійної швидкості частки  $v$  від часу  $t$  при різних кутових швидкостях обертання спіралі  $\omega_0$ :  
1 - при  $\omega_{01} = 10 \text{ с}^{-1}$ , 2 - при  $\omega_{02} = 13 \text{ с}^{-1}$

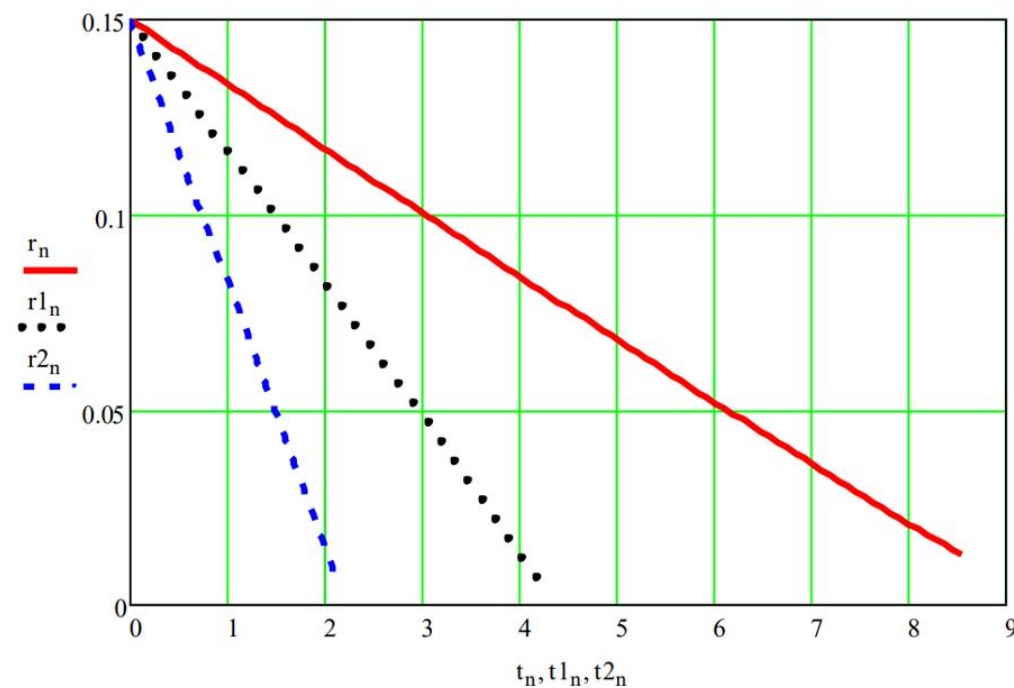
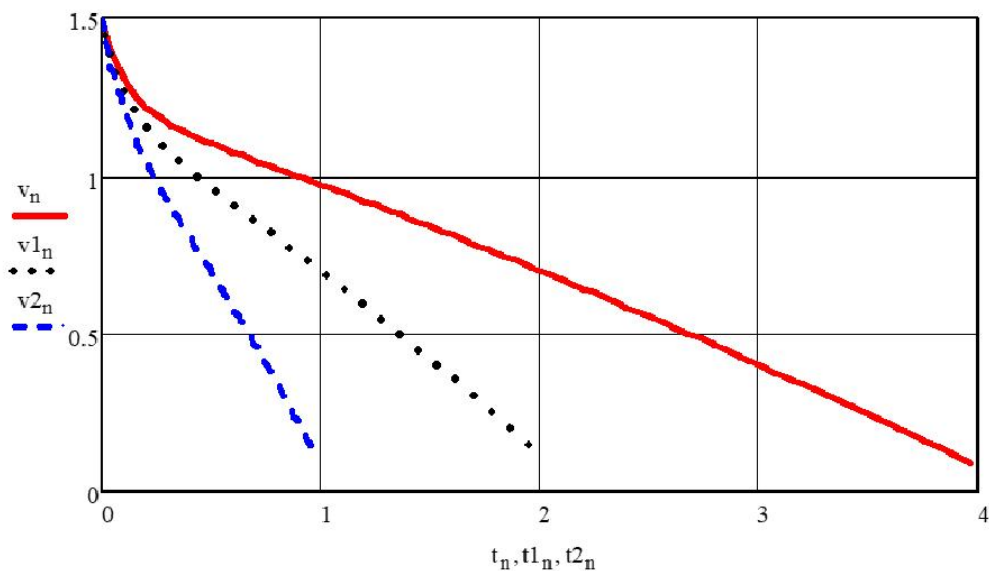


Залежність кутової швидкості частинки від часу  $t$  при кутовій швидкості обертання спіралі  $\omega_0 = 10 \text{ c}^{-1}$   
 суцільна лінія – однозахідна спіраль; точкова лінія –  
 двозахідна спіраль; пунктирна лінія – чотиризахідна спіраль.



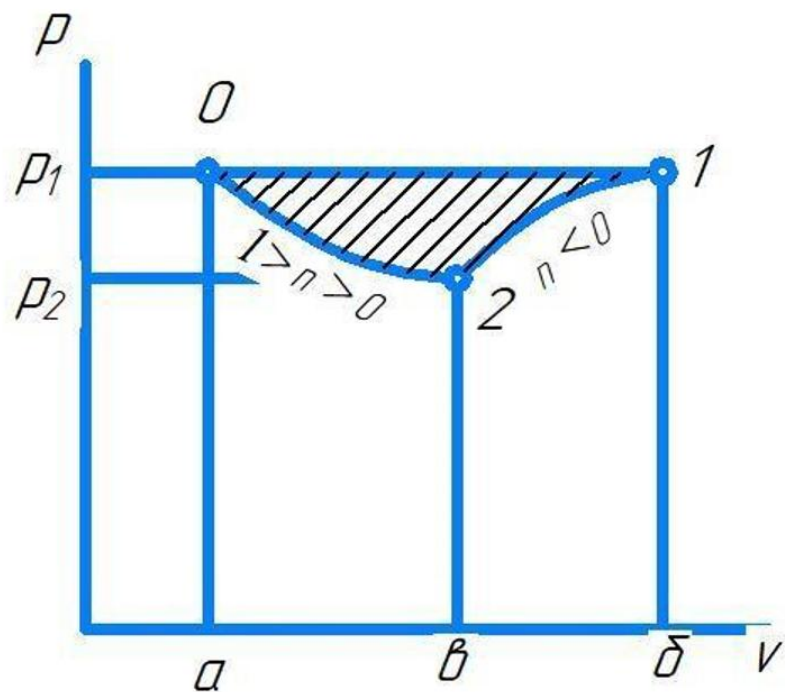
Залежність лінійного переміщення частки  $s$  від часу  $t$   
 при кутовій швидкості обертання спіралі  $\omega_0 = 10 \text{ c}^{-1}$ :  
 суцільна лінія – однозахідна спіраль; точкова лінія –  
 двозахідна спіраль; пунктирна лінія – чотиризахідна спіраль

Залежність лінійної швидкості частки від часу  $t$   
 при кутовій швидкості обертання спіралі  $\omega_0 = 10 \text{ c}^{-1}$  :  
 суцільна лінія – однозахідна спіраль; точкова лінія –  
 двозахідна спіраль; пунктирна лінія – чотиризахідна спіраль

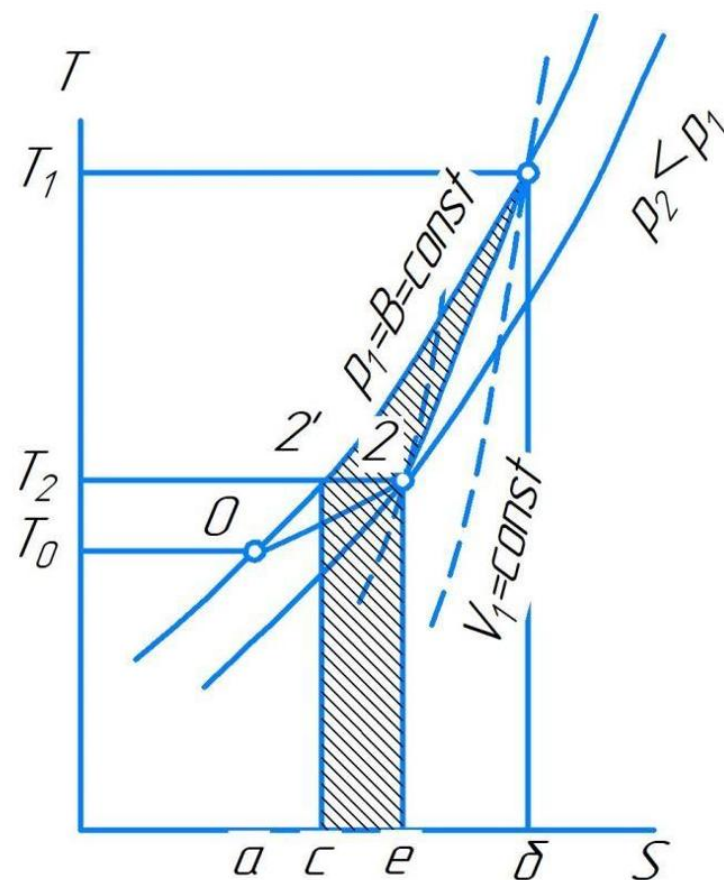


Зміна радіусу переміщення частки  $r$  від часу  $t$   
 при частоті обертання спіралі  $n = 40 \text{ xv}^{-1}$  :  
 суцільна лінія – однозахідна спіраль; точкова лінія –  
 двозахідна спіраль; пунктирна лінія – чотиризахідна спіраль

Зміна стану повітря у процесі сушіння в  $P - V$  – діаграмі



Зміна стану повітря у процесі сушіння в  $T - S$  – діаграмі



## ВИСНОВКИ

1. На підставі проведеного аналізу відомих технологій та засобів механізації сушіння зерна виявлено, що краще використовувати комбінований спосіб сушіння, однак для зерносушарок щодо невеликої продуктивності вигідніше використовувати контактний спосіб підведення теплоти. При цьому товщина оброблюваного шару повинна незначно перевищувати максимальний розмір насіння, що висушується. Реалізація цього принципу можлива на основі застосування робочих органів, виконаних у формі архімедової спіралі, що поєднують процеси сушіння і транспортування зерна.
2. Встановлено, що ефективний пристрій для сушіння насіння дрібнонасіньєвих культур повинен включати в себе циліндричний кожух, зовнішня поверхня якого покрита шаром теплоізолюючого матеріалу, завантажувальний бункер, вивантажувальне вікно, співвісно встановлений всередині кожуха з можливістю обертання спіральний робочий орган і електронагрівальний елемент.
3. Використання контактного підведення теплоти забезпечує гнучкість розподілу енергії та температури теплообмінником, дозволяючи вибирати найбільш підходящий режим теплової обробки насіння. Розроблені теоретичні моделі відображають ключові особливості процесу контактного сушіння тонких шарів зерна, що реалізується в пропонованій сушильній установці.
4. Сформульовані в результаті теоретичних досліджень залежності дозволяють визначити оптимальне співвідношення часу сушіння матеріалу, швидкості сушіння та пропускної спроможності пропонованої установки.