

Луцький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)  
Факультет аграрних технологій та екології  
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))  
Кафедра аграрної інженерії ім. проф. Г.А.Хайліса  
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи

магістра

на тему: «Дослідження процесу сушіння зернового матеріалу в закрученому потоці теплоносія з модернізацією сушарки»

Виконав: студент 2 курсу, групи АІм - 21  
спеціальності 208 Агроінженерія  
за освітньо-професійною  
програмою «Агроінженерія»

Пилипюк В.С.

(прізвище та ініціали)

Керівник Забродоцька Л.Ю.

(прізвище та ініціали)

Гарант ОП Хомич С.М.

(прізвище та ініціали)

Рецензент Дударєв І.М.

(прізвище та ініціали)

Луцьк 2024

**ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет	<i>аграрних технологій та екології</i>
Кафедра	<i>аграрної інженерії ім. проф. Г.А.Хайліса</i>
Галузь знань	<i>20 Аграрні науки та продовольство</i>
Освітній ступінь	<i>магістр</i>
Спеціальність	<i>208 Агроінженерія</i>
Освітньо-професійна програма	<i>Агроінженерія</i>

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Завідувач кафедри аграрної інженерії  
ім. проф. Г.А.Хайліса  
доцент, к.т.н. \_\_\_\_\_ С.М.Хомич  
«30» грудня 2023 р.

**З А В Д А Н Н Я  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТУ**

Пилипюку Владиславу Сергійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження процесу сушіння зернового матеріалу в закрученому потоці теплоносія з модернізацією сушарки

керівник роботи Забродоцька Людмила Юріївна, доцент, к.т.н.

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

затверджена наказом ЛНТУ від «30» грудня 2023 р. № 445/01-02

2. Термін здачі студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Титульний аркуш .
2. Завдання на роботу магістра.
3. Реферат.
4. Зміст.
5. Вступ.
6. Основну частину.
7. Загальні висновки.
8. Перелік джерел посилань.
9. Додатки

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

	к-сть листів
1. Вихідні дані .....	1 лист
2. Теоретичні положення .....	1 лист
3. Апаратура та обладнання для експериментальних досліджень	1 лист
4. Результати експериментальних досліджень	1 лист
5. Планування та результати експерименту з використанням математичного методу планування	1 лист
6. Схема експериментальної установки чи досліджуваної машини (функціональна або принципова)	1 лист
7. Складальне креслення розроблюваного чи удосконаленого вузла	1 лист

## 6. Консультанти розділів проекту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Юхимчук С.Ф., доцент		

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Огляд літератури за темою, формування завдань досліджень	17.06. – 01.07.2024 р.	
2	Обґрунтування конструкції і теоретичні дослідження	20.08 – 31.08.2024 р.	
3	Розробка схеми експериментальної установки чи досліджуваної машини	01.09 – 30.09.2024 р.	
4	Розробка програми і методики експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2024 р.	
5	Реалізація та обробка результатів експериментальних досліджень	01.10 – 15.10.2024 р.	
6	Експериментальні дослідження з використанням математичного методу планування	15.10 – 01.11.2024 р.	
7	Розробка креслення розроблюваного чи удосконаленого вузла	01.11 – 15.11.2024 р.	
8	Узагальнення результатів та оформлення пояснювальної записки	15.11 – 25.11.2024 р.	
9	Оформлення ілюстративного матеріалу для захисту магістерської роботи	15.11 – 25.11.2024 р.	
10	Нормоконтроль	до 04.12.2024 р.	
11	Представлення кваліфікаційної роботи на перевірку на плагіат	04.12.– 14.12.2024 р.	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Пилипюк В.С.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Забродоцька Л.Ю.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Гарант ОПП

\_\_\_\_\_ (підпис)

Хомич С.М.

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Пилипюк В.С. Дослідження процесу сушіння зернового матеріалу в закрученому потоці теплоносія з модернізацією сушарки. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Агроінженерія» спеціальності 208 Агроінженерія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2024.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків і пропозицій, списку використаних джерел, додатків.

Кваліфікаційну роботу присвячено вирішенню актуальної задачі інтенсифікації процесу сушіння зернового матеріалу та розробці сушарки закрученим потоком теплоносія. Виявлено вплив вологості та температури на фізико-механічні властивості насіння гречки, а також запропоновано математичні рівняння, які адекватно описують отримані експериментальні залежності. Виявлено механізм та основні закономірності кінетики сушіння насіння гречки у закрученому потоці теплоносія. За результатами планування експериментів та статистичної обробки експериментальних даних встановлено вплив різних факторів на кінетику процесу сушіння, проведено теоретичну оптимізацію сушильних установок та виявлено раціональні інтервали зміни параметрів процесу.

Ключові слова: зерновий матеріал, гречка, сушіння, закручений потік, вологість, сушильний агент, час обробки, енергетичні параметри.

## ABSTRACT

Pylypyuk V.S. Process study of drying grain material in a swirling coolant flow with dryer modernization. Manuscript.

Master's Degree Qualifying Research Paper in Programme Subject Area 0888 Inter-disciplinary programs and qualifications involving agriculture, forestry, fisheries, and veterinary under Agricultural Engineering Educational Program. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2023.

The master's qualification work consists of an introduction, four sections, conclusions and proposals, a list of used sources, and appendices.

The qualification work is devoted to solving the current problem of intensifying the process of drying grain material and developing a dryer with a swirling flow of a coolant. The influence of humidity and temperature on buckwheat seeds' physical and mechanical properties is revealed, and mathematical equations are proposed that adequately describe the obtained experimental dependencies. The mechanism and main patterns of the kinetics of drying buckwheat seeds in a swirling flow of a coolant are revealed. Based on the results of experimental planning and statistical processing of experimental data, the influence of various factors on the kinetics of the drying process was established, theoretical optimization of drying units was carried out and rational intervals for changing process parameters were identified.

Keywords: grain material, buckwheat, drying, swirling flow, humidity, drying agent, processing time, energy parameters.

## ЗМІСТ

ЗАВДАННЯ. ....	2
РЕФЕРАТ. ....	3
ВСТУП. ....	6
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ, ФОРМУВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ. ....	9
1.1. Загальна характеристика зерна гречки. ....	9
1.2 Організація машинної технології переробки насіння гречки. ....	11
1.3 Способи та апарати для проведення процесу сушіння з використанням закручених потоків теплоносія. ....	14
Висновки до розділу. ....	18
2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ І ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ. ....	20
2.1 Дослідження руху теплоносія у сушильній камері. ....	20
2.2 Дослідження руху частки у сушарці. ....	22
2.3 Опис запропонованої конструкції. ....	25
Висновки до розділу. ....	36
3 ПРОГРАМА, МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. ....	27
3.1 Методика визначення щільності. ....	27
3.2 Методика визначення насипної щільності. ....	28
3.3 Методика вивчення кута природного укусу. ....	29
3.4 Методика визначення гранулометричного складу. ....	30
3.5 Методика проведення процесу сушіння зерна гречки на експериментальній установці. ....	31
4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. ....	35
Висновки до розділу. ....	39
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ. ....	40
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ. ....	41
ДОДАТКИ. ....	43

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Процес сушіння є основною стадією багатьох технологічних процесів у різних галузях промисловості, який значною мірою визначає теплоенергетичні показники виробництва та якість готового продукту.

Зниження енергетичних витрат на сушіння поряд з підвищенням інтенсивності вологовіддачі розглядається як найважливіше завдання при розробці нової технології сушіння та конструкцій сушарок, а також при вдосконаленні існуючих.

Значний внесок у теорію сушіння дисперсних матеріалів зробили такі вітчизняні та зарубіжні вчені як О.В. Ликов, П.А. Ребіндер, К.Г. Філоненко, П.Г.Романков, А.С. Гінзбург, Б.І. Котов, В.Ф. Дідух та багато інших.

Одним із перспективних напрямів створення нової сушильної техніки, що забезпечує, поряд з отриманням продукту заданої якості, економне енергоспоживання та ефективно вловлювання продуктів винесення, є розробка та впровадження у промисловість високоінтенсивних апаратів із закрученими потоками теплоносія. При русі дисперсного матеріалу в таких апаратах відбувається безперервна взаємодія частинок один з одним і зі стінкою сушарки, що призводить до збільшення відносної швидкості руху фаз, часу перебування матеріалу в сушарці, підвищенню концентрації твердої фази. Використання закручених потоків теплоносія, а також комбінування їх з різними гідродинамічними режимами дозволяє інтенсифікувати процес сушіння насінневого матеріалу та розширити сферу застосування сушильних апаратів. Враховуючи це, розробка ресурсозберігаючих машинних технологій сушіння зернового матеріалу у закрученому потоці теплоносія вимагає наукового обґрунтування та представляє як теоретичний інтерес, так і практичну цінність.

**Наукове та практичне значення одержаних результатів.** Запропоновано рекомендації для вибору раціональних параметрів та режимів апарату.

Визначено та обґрунтовано раціональні технологічні режими процесу сушіння зерна гречки в закрученому потоці теплоносія. Запропоновано конструкцію сушарки із закрученим потоком теплоносія.

**Об'єкт дослідження** – зерно гречки та технологічний процес його сушіння.

**Предмет дослідження** – закономірності впливу структури сипкого матеріалу та теплоносія на ефективність процесу та параметри сушарки.

**Мета й завдання роботи.** забезпечення процесу сушіння зерна гречки в сушарці із закрученими потоками теплоносія, а також визначення раціональних технологічних режимів сушіння зерна гречки.

Відповідно до поставленої мети вирішувалися такі завдання:

Досягнення мети вирішувалися такі основні завдання:

1. Вивчення зерна гречки як об'єкта дослідження, визначення фізико-механічних та теплофізичних характеристик сировини.

2. Провести системну оцінку структурно-механічних характеристик дисперсних продуктів як об'єктів сушіння.

2. Розробити математичні моделі процесу руху твердої дисперсної частинки в криволінійному каналі, тепло- та масообміну в процесі сушіння із закрученим потоком теплоносія.

3. Провести комплексні теоретичні та експериментальні дослідження гідродинамічних та кінетичних закономірностей процесів сушіння в закрученому потоці теплоносія та визначити раціональні інтервали зміни параметрів процесу.

4. Визначення оптимальних режимів установки для сушіння гречки.

**Методи та способи вирішення поставлених завдань.** При виконанні теоретичних досліджень використовували структурний аналіз та синтез, методи теорії сушіння, математичного моделювання та класичної механіки, чисельні методи розв'язання систем диференціальних та алгебраїчних рівнянь, методи постановки та обробки результатів досліджень.

Експериментальні дослідження проводились за галузевими та розробленими методиками на стандартному обладнанні і приладах у лабораторних умовах. При проведенні експериментальних досліджень

застосовувалися математичні методи планування експерименту та їх обробка з використанням комп'ютерних технологій.

**Наукова новизна.** Виявлено вплив вологості та температури на фізико-механічні властивості насіння гречки, а також запропоновано математичні рівняння, які адекватно описують отримані експериментальні залежності.

Встановлені основні гідродинаміки взведеного шару значення і діапазон зміни основної кінетичної характеристика; за результатами планування експериментів та статистичної обробки експериментальних даних встановлено вплив різних факторів на кінетику процесу сушіння, проведено теоретичну оптимізацію сушарки та виявлено раціональні інтервали зміни параметрів процесу.

**Апробація результатів роботи.** Пилипюк В., Дулько А. Енергетичний розрахунок спіральної сушарки: тези IV студентської науково-технічної конференції «Сучасні технології у агровиробництві та природокористуванні». Луцьк: Факультет аграрних технологій та екології, ЛНТУ. – 2024. С. 107–109.

**Структура й обсяг роботи.** Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, перелік джерел посилань із 13 назв та 1 додатків. Основна частина викладена на 43 сторінках, містить 33 рисунки та 2 таблиці.

# 1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ЗА ТЕМОЮ, ФОРМУВАННЯ ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 1.1. Загальна характеристика зерна гречки

Гречка є провідною круп'яною культурою у країні, оскільки гречана крупа представляє собою багатий на легкозасвоювану, повноцінну за амінокислотним складом білком, а також мінеральними елементами та вітамінами продукт. Гречка – добрий медонос [1].



Рисунок 1.1 – Гречка

Гречка належать до виду – (*Fagopyrum esculentum*) трав'яниста рослина сімейства *Polygonaceae*. Листя стрілоподібнотрикутне або стрілоподібно-яйцевидне, 2,5...9,0 см завдовжки, верхівка відтягнута. Квітки гетеростильні та двостатеві. Оцвітину п'ятироздільна, жовтувато-зелена, біла або світло-рожева. Плоди – тригранні, матові горішки, 4,5..6,5 мм завдовжки. Насіння гречки містить білок 8 ... 16%. Насіння гречки відрізняється високим вмістом незамінних амінокислот. Гречка перевершує зерно проса, жита, пшениці,

Гречка належить до найбільш рентабельних культур у зоні, хоча її врожайність схильна до значних коливань у зв'язки з деякими біологічними особливостями та недотриманням технології обробітку. Гречка пред'являє підвищені вимоги до вологи, причому її максимальний витрата (50-60%) відбувається в період цвітіння - плодоутворення, який розтягнутий в часу і припадає на найспекотніший період літа. Високі температури ускладнюють також

перехресне запилення та запліднення гречки, особливо при низькій відносній вологість повітря.

Гречка – теплолюбна рослина, насіння починають проростати при температурі 7-8 ° С, а оптимальними є 25-30 °С. Сходи чутливі до заморозків, навіть легких (-2-3). Для культури небезпечні ранні терміни посіву через можливості повернення весняних холодів У те ж час затримка посіву вимагає проведення передпосівних культиваций, внаслідок чого відбувається висушення верхнього шару ґрунту, а насіння гречки під час сходів виносять сім'ядолі і потребують хорошого оброблення ґрунту. Система обробітку ґрунту під гречку повинна бути спрямована насамперед на боротьбу з бур'янами, накопичення та збереження вологи в орному шарі, забезпечення достатньої аерації, вирівняної та комкуватого стану поверхні ґрунту.

На сучасних гречаних заводах досягнуто досить високого ступеня використання природних ресурсів зерна та якості готової продукції. Процес переробки зерна гречки в крупу дуже енергоємний, має розгалужені потоки, при цьому недостатньо повно реалізуються резерви збільшення виходу та покращення якості готової продукції, що в основному пов'язано не тільки з побудовою технологічного процесу, режимами обробки сировини, а й з досконалістю використовуваного технологічного обладнання. При проектуванні нового устаткування, а й техніко-економічні дослідження наміченої споруди. Перш ніж вибрати будинок для будівництва, необхідно визначити продуктивність, асортимент, вихід готової продукції та інші умови [2].

Технологічна схема переробки зерна включає наступні операції: дворазовий пропуск зерна через сепаратори, камневідбірну машину, зволоження зерна, підсушування та попередній підігрів, пропарювання, сушіння та охолодження, фракціонування зерна на п'ять фракцій, лущення, сортування, контроль готової продукції готової продукції [2]. Аналіз експлуатації на гречаних заводах існуючого технологічного обладнання вказує на необхідність його вдосконалення.

## 1.2. Організація машинної технології переробки насіння гречки

Для системного та функціонального аналізу ресурсозберігаючої машинної технології лінії переробки насіння гречки розроблено операторну модель як систему процесів (рис. 1.2). У країні районовано близько 50 сортів гречки. Найбільш поширені такі сорти: Дев'ятка, Надійна, Оранта, Ольга, Руслана, Син-3/02, Софія та ін. [2].

Операторна модель технологічної системи комплексної переробки насіння гречки включає: А – підсистема утворення готової крупи, що містить оператори: І – зберігання готової крупи; ІІ – заключне очищення крупи від домішок; В – підсистема сушіння зерна та його лушення, що містить оператори: І - лушення зерна; ІІ – пропарювання з наступним сушінням зерна та його розсіванням; С – очищення зерна від великих, дрібних, легких та мінеральних домішок, що містить оператори: І – очищення зерна від дрібних та легких домішок; ІІ – очищення зерна від великих та мінеральних домішок.

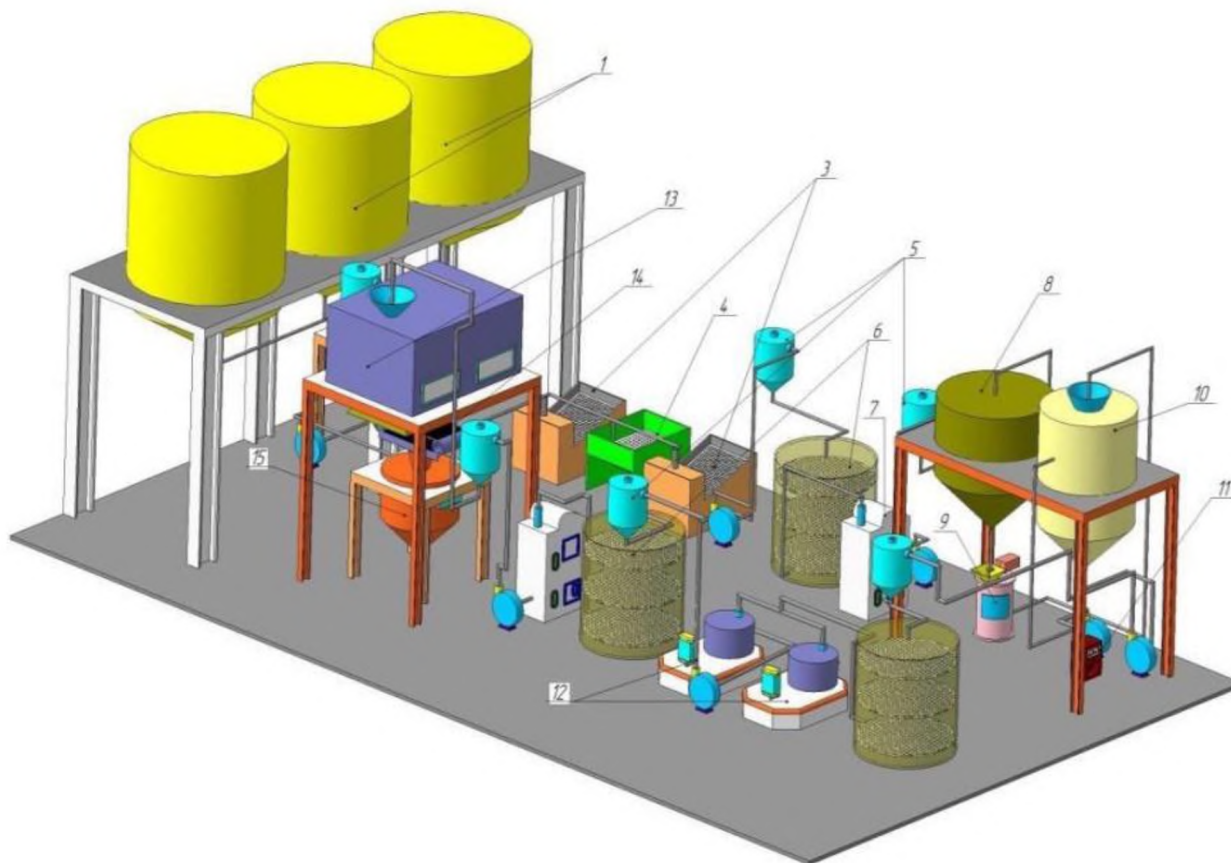


Рисунок 1.2 – Машинно-апаратна схема лінії переробки насіння гречки

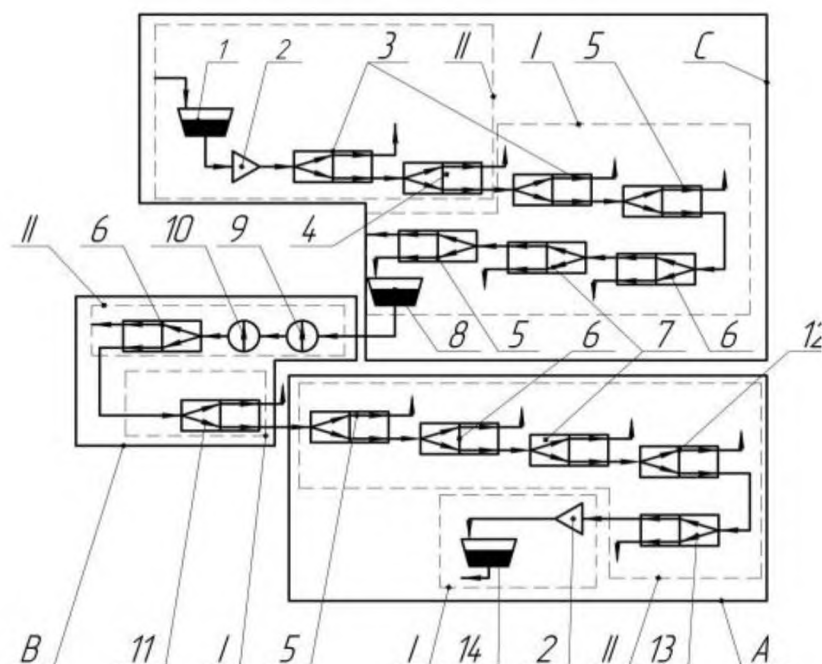


Рисунок 1.3 – Операторна модель технологічної системи переробки насіння гречки: 1 – бункер із вихідною сировиною; 2 – ваги автоматичні порційні; 3 – сепаратор повітряно-ситовий; 4 – каменевідділювач; 5 – циклон; 6 - розсівання круп'яної; 7 – аспіратор; 8 – бункер накопичувальний; 9 – пропарювач; 10 – сушарка із закрученим потоком теплоносія; 11 - верстат вальцедековий; 12 – падді-машина; 13 – магнітний сепаратор; 14 – силос

Розроблена технологічна лінія працює в такий спосіб. Насіння гречки з бункерів 1 направляють на зважування автоматичних вагах 2.

За допомогою насоса 16 зважене насіння трубопроводами транспортують у повітряно-ситові сепаратори 3 для видалення великих, дрібних і легких домішок. Очищене насіння від домішок направляють у каменевідділювачі 4 для видалення мінеральних домішок.

Потім пневмотранспортом, за допомогою повітряного насоса 16 і циклону 5 насіння направляють на подальше очищення. Для очищення насіння гречки від важковіддільних домішок, а саме, насіння бур'янів, застосовується круп'яний розсів 6.

Використовується схема ситового сепарування з включає сита з круглими, довгастими і трикутними отворами в комбінації з фракціонуванням.

Фракціонування насіння на ситах з круглими отворами реалізується шляхом просіювання фракцій на ситах з довгастими і трикутними отворами. Для дрібної фракції - сита з круглими отворами  $\varnothing$  4...4,2 мм, сита з довгастими отворами розміром 2,2...2,4x20 мм і сита з трикутними отворами розміром 5...6 мм. Для великої фракції використовують сита з розмірами 2,4...2,6x20 мм і 7...8 мм. В аспіраторі 7 відокремлюються легкі домішки. Очищене насіння прямує в накопичувальний бункер 8.

Для обробки насіння високим тиском пари застосовується пропарювач 9. Так як після пропарювання вологість гречки становить 22%, то її направляють на сушіння в сушильний апарат із закрученими потоками теплоносія 10.

Перед лушенням гречка фракціонується на 3...6 частин крупності на розсівах 6. Для фракціонування насіння використовують набір сит з круглими отворами 4,5...4,2...4,0...3,8...3,6...3,3 мм.

Лушіння гречки здійснюють у вальцедекових верстатах 12. Гречку лущать дуже обережно так як підвищена крихкість ядра.

Використання гідротермічної обробки дозволяє інтенсифікувати лушення гречки, і при цьому знизити в продуктах лушення вміст подрібненого ядра з 2,5...3,5% до 1,5...2,5%.

Відлущена гречка за допомогою пневмотранспорту прямує на сортування. Сортування продуктів лушення проводиться у круп'яних розсівах.

Отримані сходом з сит нелущене насіння, розміром 0,2...0,3 мм після відокремлення від них лушіння в аспіляторах повертають на повторне лушення, однак, нелущене насіння направляти у вальцедекові верстати інших фракцій заборонено.

Ядрицю отримують сходом із сит з розмірами отворів 1,7 (1,6)×20 мм з деякою кількістю лушіння. Такі продукти всіх фракцій із систем переробки поєднують і направляють на контроль ядриці.

Аналогічно надходять із проходами проділу. Проділ з усіх систем об'єднують та направляють на контроль.

У розсіваннях 6 здійснюють контроль круп. Вони виділяють додатково домішки на ситах з круглими і трикутними отворами, але в ситах з отворами розміром  $1,6 \times 2,0$  мм – проділ і борошно.

Сходом із сита з отворами  $1,6 \times 20$  мм отримують ядрицю. В аспіраторах 7 з метою додаткового виділення домішок після провіювання круп ядрицю пропускають через падді-машину 13, а далі через магнітний сепаратор 14. Після зважування на терезах 2 готову ядрицю направляють силоси 15.

Далі з силосів 15 готову крупу направляють фасувальні машини на фасування і упаковку.

Далі відповідно до методики, описаної Додатку, визначено оптимальну кількість основних одиниць обладнання лінії. Результати розрахунків представлені у Додатку.

Таким чином, розроблена ресурсозберігаюча машинна технологія переробки насіння гречки є перспективною і дозволяє отримати якісні готові продукти.

### 1.3. Способи та апарати для проведення процесу сушіння з використанням закручених потоків теплоносія

Сушильні апарати із закрученим потоком теплоносія поділяють на:

- пневмотруби з різними вставками;
- циклонні апарати;
- вихрові апарати;
- спіральні прямоточні апарати;
- апарати із зустрічними закрученими потоками.

У пневмотрубках з різними гвинтовими вставками закручування здійснюється по спіралі, де частинки відкидаються на зовнішню стінку каналу, що призводить до значної кількості зіткнень частинок між собою і стінкою,

підвищення відносної швидкості та інтенсифікації міжфазного тепло- і масообміну.

Циклонні сушарки є найбільш простими конструктивним виконанням, що є циліндричною або циліндроконічною камерою з тангенціальним введенням теплоносія і продукту.

Вихрові сушарки (рис. 1.4) порівняно з циклонними характеризуються більшою утримуючою здатністю та кращою сепарацією, компактністю та можливістю розвивати високу поверхню контакту фаз. Однак, вони значно ближче до апаратів ідеального змішування, ніж пневмотруби та циклонні сушарки.

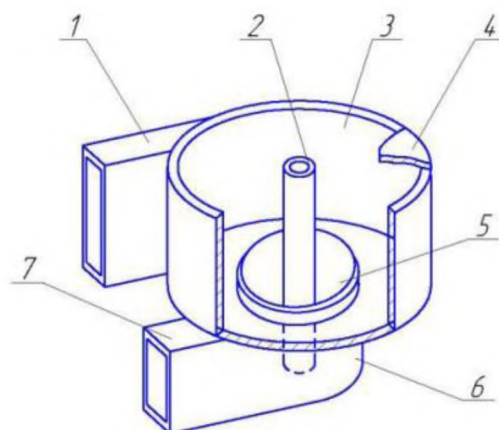


Рисунок 1.4 – Вихрова сушарка :1 – вхідний патрубок; 2 – труба;  
3 – вихрова камера; 4 – кришка; 5 – відбійне кільце; 6 - ралик; 7 – патрубок

Спіральні сушарки являють собою горизонтальний пневмотранспортний канал зі зменшуючим радіусом кривизни. Переваги гідродинамічного режиму ідеального витіснення полягає в цих апаратах у підвищенні рушійної сили процесу сушіння.

Істотна хаотизація руху частинок дисперсного продукту обумовлена інтенсивною взаємодією частинок одна з одною та зі стінкою сушильної камери.

Апарати зі швидкими закрученими потоками є вертикальними циліндричними камерами, в нижній частині якої по осі через завихрювач

вводиться закручений потік гарячого теплоносія разом з частиною вологого дисперсного продукту.

У верхню частину камери тангенційно вводиться другий потік теплоносія з другою частиною вологого продукту.

Обертання центрального та периферійного потоків теплоносія та матеріалу відбувається в одну сторону, але їхній осьовий (вертикальний) рух спрямований усередині апарату в різні боки.

Завдяки односторонньому обертанню вторинний потік «підкручує» центральний потік, забезпечуючи рівномірність обертання теплоносія та дисперсного продукту по всій висоті камери.

Застосування закручених потоків у сушарках використовується як у «чистому» вигляді, так і в більш ефективному – комбінованому, у поєднанні з іншими гідродинамічними режимами.

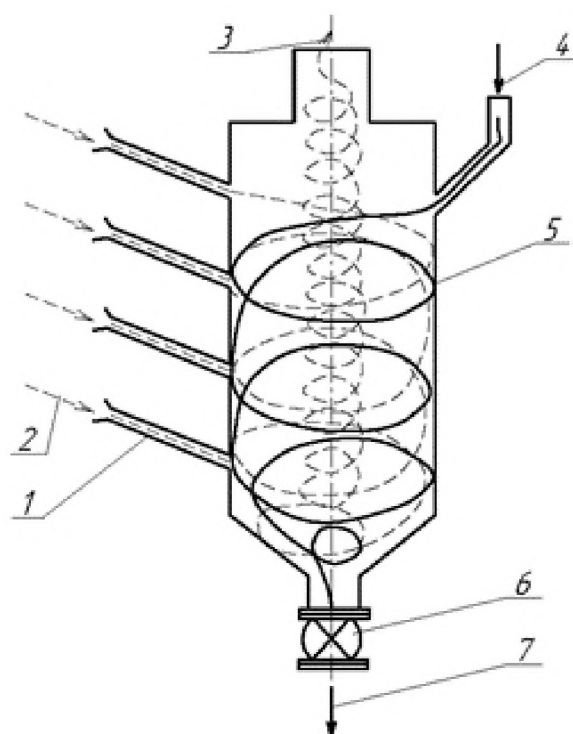


Рисунок 1.5 – Спіральна сушарка : 1 – тангенціальні сопла; 2 – теплоносій; 3 – вихід теплоносія; 4 – вхід вологого матеріалу; 5 – корпус сушарки; 6 – вивантажувальний пристрій; 7 – сухий матеріал

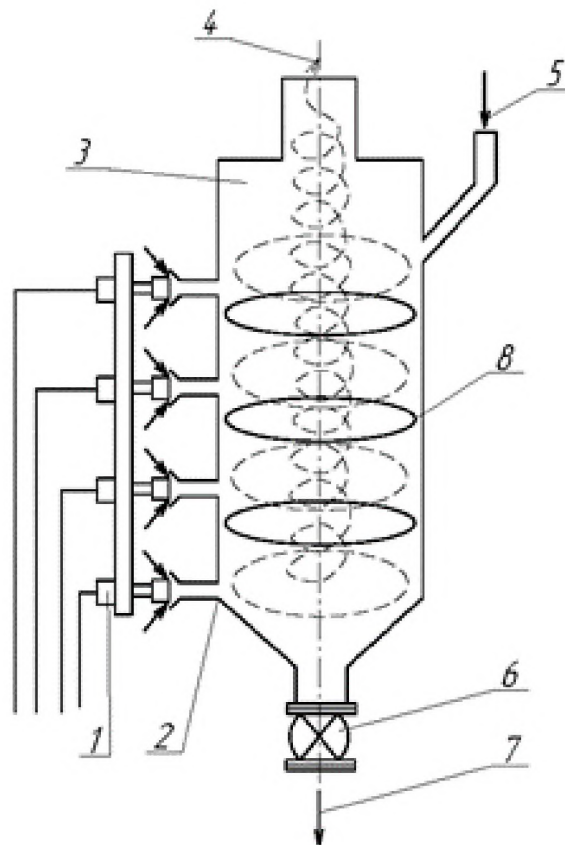


Рисунок 1.6 – Кільцева сушарка :1 – вентиль; 2 – тангенціальні сопла; 3 – вихід теплоносія; 4 – вхід теплоносія; 5 – вхід вологого матеріалу; 6 – вивантажувальний пристрій; 7 – сухий матеріал ; 8 - кільця

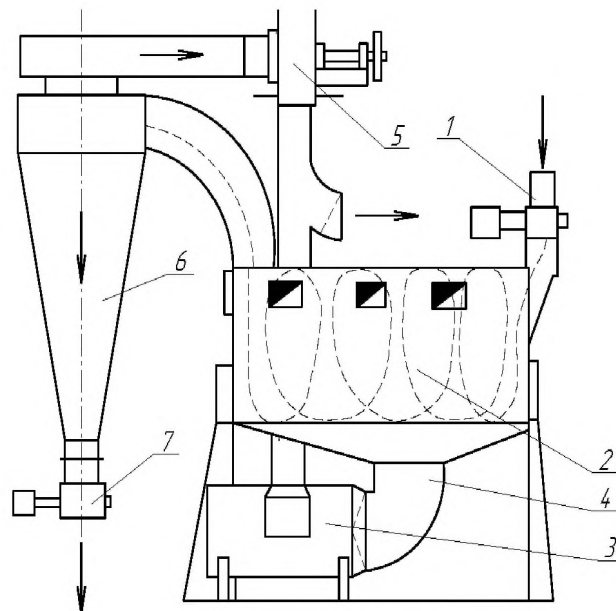


Рисунок 1.7 – Циклонна сушарка :1 – вхід вологого матеріалу; 2 – камера; 3 – топка для нагрівання теплоносія; 4 – повітропровід; 5 – вентилятор; 6 – циклон; 7 – вивантажувальний пристрій

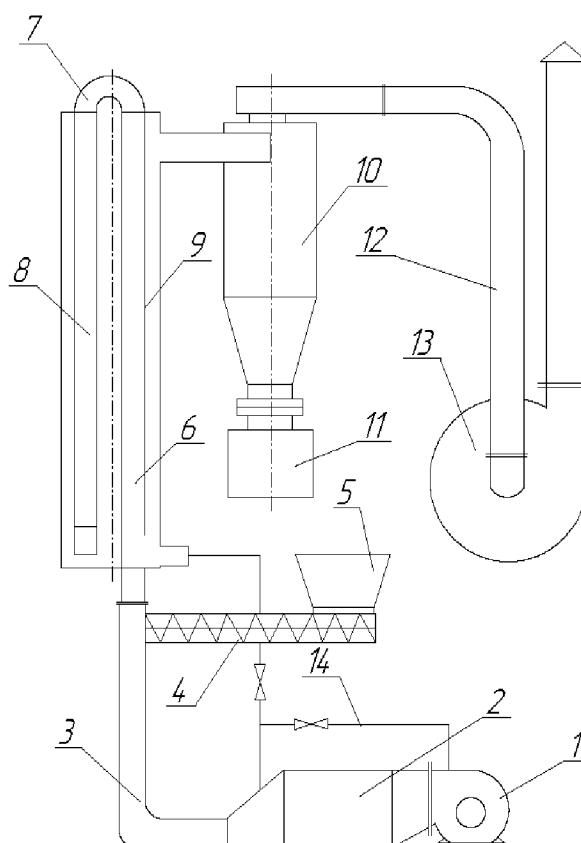


Рисунок 1.8 – Пневматична сушарка : 1 – топка; 2 – камера; 3 – коліно; 4 – завантажувальний пристрій; 5 – дозатор вологого матеріалу; 6 – труба для попереднього підсушування; 7 – коліно; 8, 9 – труба; 10 –циклон; 11 – затор; 13 – вентилятор

### Висновки до розділу

Таким чином, аналізуючи огляд сучасної техніки та технології сушіння дисперсних продуктів встановлено, що в основному застосовуються барабанні, шахтні, ротатійні конвективні сушарки, що володіють суттєвими недоліками: великі метало- та габаритоемність, складності ремонту та обслуговування, великі експлуатаційні та капітальні витрати. Для дрібнонасінневих культур процес сушіння в них при різних режимах протікає відносно малоефективно порівняно з процесом сушіння традиційних зернових культур унаслідок незначних ефективних діаметрів міжзернових каналів; низька гідродинамічна активність і, як

наслідок, низькі коефіцієнти тепломасопередачі; мала величина поверхні контакту насіння з теплоносієм.

В даний час актуальним є підвищення інтенсивності процесу сушіння та створення вискоефективних сушарок, що дозволяють значно підвищити ресурсозбереження та покращити якісно готових дисперсних продуктів, що є одним з основних завдань агропромислового сектору.

## 2 ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ І ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО ТЕХНІЧНОГО ЗАСОБУ

Процес сушіння частинки (рис. 2.1) здійснюється у сушарці із закрученим потоком теплоносія, вологі частинки подаються у сушарку за допомогою верхнього патрубка. Теплоносій осьового потоку подається через завихрювач з витратою  $G_{oo}$  та кутовою швидкістю  $\Omega_{oo}$ , а тангенціальний потік з витратою  $G_{to}$ . Завихрювач та тангенціальний потік організують закручування теплоносія в сушарці:

$$G_{\text{вот}} = G_{oo} + G_{to} \quad (2.1)$$

Висушений продукт виводиться через патрубок зверху камери.

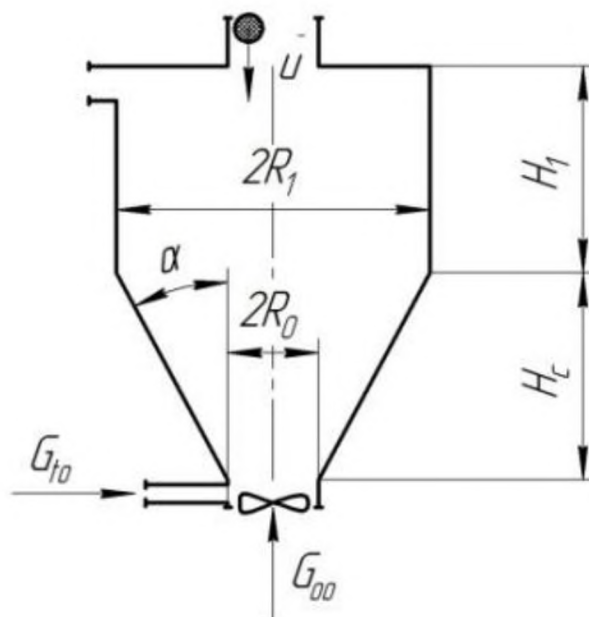


Рисунок 2.1. – Розрахункова схема

### 2.1 Дослідження руху теплоносія у сушильній камері

Вважаємо, що на початку вхідної ділянки створюється циркуляційний рух потоку теплоносія з кутовою швидкістю  $\Omega$  та осьовою швидкістю  $U_o$ . Попередньо

встановлено, що момент сил тертя потоку повітря об стінки сушильної камери малий і не надає значного впливу на траєкторії руху теплоносія, який можна вважати постійним по висоті сушильної камери.

Швидкості теплоносія у вхідних патрубках:

$$U_{oo} = \frac{G_{oo}}{\pi \cdot R_o^2 \cdot \rho_{\text{воз}}} \quad (2.2)$$

$$U_{to} = \frac{G_{to}}{\pi \cdot R_t^2 \cdot \rho_{\text{воз}}}, \quad (2.3)$$

де  $G_{oo}$  та  $G_{to}$  – масові витрати в осьовому та тангенціальних патрубках, відповідно;

$R_o, R_t$  – радіуси осьового та тангенціального патрубків.

Швидкість подачі осьового потоку теплоносія

$$U_{zo} = U_{oo} + U_{to} \cdot \left( \frac{R_t}{R_o} \right)^2 \quad (2.4)$$

Кутову швидкість теплоносія в нижньому патрубку знайдемо з умови збереження моменту кількості руху:

$$J_{oo} \cdot \Omega_{oo} + G_{to} \cdot U_{to} \cdot R_o = J_o \cdot \Omega_o \quad (2.5)$$

де  $J_o$  – момент інерції потоку, що обертається масою  $G_{\text{воз}}$ ;

$\Omega_{oo}$  – кутова початкова швидкість осьового потоку теплоносія;

Момент інерції осьового теплоносія

$$J_{oo} = \frac{1}{2} G_{oo} R_o^2 \quad (2.6)$$

Тоді

$$J_o = \frac{1}{2} G_{\text{воз}} R_o^2 \quad (2.7)$$

Виходячи з того, що

$$G_{to} = \pi R_t^2 U_{to} \rho_{\text{воз}} \quad (2.7)$$

$$G_{\text{воз}} = \pi R_o^2 U_{zo} \rho_{\text{воз}} \quad (2.8)$$

З рівняння (2.5) з врахуванням (2.6) – (2.8) отримаємо

$$\Omega_o = 4 \frac{U_{zo}^2 R_o^2}{U_{zo} R_o^3} + \Omega_{oo} \frac{G_{oo}}{G_{ooz}}. \quad (2.9)$$

Отримаємо умову сталості моменту кількості руху теплоносія по висоті камери:

$$J_o \Omega_o = J \Omega. \quad (2.10)$$

$$\Omega = \Omega_o \frac{J_o}{J}. \quad (2.11)$$

$$\Omega = \Omega_o \left( \frac{R_o}{R} \right)^2, \quad (2.12)$$

де  $R$  - радіус сушильної камери, м.

Звідси випливає, що кутова швидкість теплоносія залишається постійною в циліндричній частині сушильної камери і зменшується за осьовою координатою в конічній частині:

$$U_z = U_{zo} \left[ \frac{R_o}{R(z)} \right]^2. \quad (2.13)$$

$$U_r = \begin{cases} U_z \cdot \operatorname{tg} \gamma & \text{при } Z < H \\ 0 & \text{при } H_1 < Z < H_1 + H_2 \end{cases} \quad (2.14)$$

$$U_\theta = \Omega r, \quad (2.15)$$

У довільній точці модуль вектора швидкості теплоносія розраховується як

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_z^2 + U_\theta^2}. \quad (2.16)$$

## 2.2 Дослідження руху частки у сушарці

Рух частки гречки будемо розглядати в циліндричній системі координат:  $r$ ,  $Z$ ,  $\theta$ . Сила тяжіння  $G$  та аеродинамічний опір  $F_v$  є основними, що характеризують рух частки [10].

Переважна система координат є неінерційною. Тому за принципом Даламбера додамо відцентрову силу інерції:

$$F_{\text{ц}} = \frac{m_{\text{ч}} \cdot v_{\theta}^2}{r_{\text{ч}}}, \quad (2.17)$$

де  $m_{\text{ч}}$  – маса частинки, кг;  $r_{\text{ч}}$  – радіус частинки, м

$$m_{\text{ч}} = \frac{1}{6} \pi \cdot d_{\text{ч}}^3 \cdot \rho_{\text{ч}} \quad (2.18)$$

Тоді диференціальні рівняння динаміки насіння мають вигляд:

$$m_{\text{ч}} \cdot \frac{d\vec{u}}{d\tau} = \vec{G} + \vec{F}_v + \vec{F}_{\text{ц}}. \quad (2.19)$$

У проекціях на осі координат  $r$ ,  $z$ ,  $\theta$  рівняння буде

$$m_{\text{ч}} \frac{du_r}{d\tau} = \frac{1}{2} C_D \cdot (U_r - u_r) \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot U_{\text{отн}} \cdot S_M + \frac{m_{\text{ч}} \cdot u_{\theta}^2}{r_{\text{ч}}}, \quad (2.20)$$

$$m_{\text{ч}} \frac{du_{\theta}}{d\tau} = \frac{1}{2} C_D \cdot (U_{\theta} - u_{\theta}) \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot U_{\text{отн}} \cdot S_M, \quad (2.21)$$

$$m_{\text{ч}} \frac{du_z}{d\tau} = \frac{1}{2} C_D \cdot (U_z - u_z) \cdot \rho_{\text{воз}} \cdot U_{\text{отн}} \cdot S_M - m_{\text{ч}} g, \quad (2.22)$$

де  $C_D$  – коефіцієнт аеродинамічного опору частки;

$U_{\text{отн}}$  – швидкість сушильного агента щодо гречки, м/с;

$S_M$  – площа міделевого перерізу, м<sup>2</sup>.

Коефіцієнт аеродинамічного опору  $C_D$ :

$$C_D = 0,4 + \frac{24}{Re} + \frac{4}{Re^{0,5}}, \quad (2.23)$$

де  $Re = U_{\text{отн}} \cdot d_{\text{ч}} / \nu_{\text{нов}}$  – число Рейнольдса.

Швидкість теплоносія (щодо частинки) можна представити в наступному вигляді:

$$U_{\text{отн}} = \sqrt{(U_z - u_z)^2 + (U_r - u_r)^2 + (U_{\theta} - u_{\theta})^2} \quad (2.24)$$

$$S_m = \frac{\pi d_u^2}{4} \quad (2.25)$$

Координати частинки гречки:

$$\frac{dZ_u}{d\tau} = u_z, \quad (2.26)$$

$$\frac{dZ_u}{d\tau} = u_u, \quad (2.27)$$

$$\frac{d\theta_u}{d\tau} = u_\theta. \quad (2.28)$$

Початкові умови: координати  $r_{ch}$ ,  $Z_{ch}$ ,  $\theta_{ch}$  та швидкості  $u_{rч}$ ,  $u_{zч}$ ,  $u_{\thetaч}$  при  $\tau=0$

З умови симетрії граничні умови мають вигляд:

$$\left. \frac{du_r}{dr} \right|_{r=0} = 0, \quad (2.29)$$

$$\left. \frac{du_z}{dr} \right|_{r=0} = 0, \quad (2.30)$$

$$\left. \frac{du_\theta}{dr} \right|_{r=0} = 0. \quad (2.31)$$

На стінці сушильної камери граничні умови характеризуються умовою відображення падаючої частки (рис. 2.2).

$$U_r = -\xi \sqrt{u_u^2 + u_z^2} \cdot \cos(\alpha + 2\gamma), \quad (2.32)$$

$$U_z = -\xi \sqrt{u_u^2 + u_z^2} \cdot \sin(\alpha + 2\gamma). \quad (2.33)$$

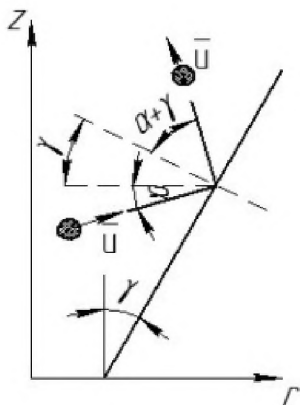


Рисунок 2.2. – Розрахункова схема

### 2.3 Опис запропонованої конструкції

Сушарка з регульованим закрученим потоком теплоносія (рис. 2.3) містить сушильну камеру з вікном для виведення суміші відпрацьованого сушильного агента та висушеного продукту, розташованим у верхній частині сушильної камери, з тангенціально встановленим патрубком для введення тангенційного потоку тепло; патрубок для подачі вологого дисперсного матеріалу та патрубок для введення осьового потоку теплоносія, виконаний по осі камери в її нижній частині; ґрати для утримання матеріалу у разі її зупинки.

Завихрювач розташований у нижній частині патрубку для подачі осьового потоку сушильного агента.

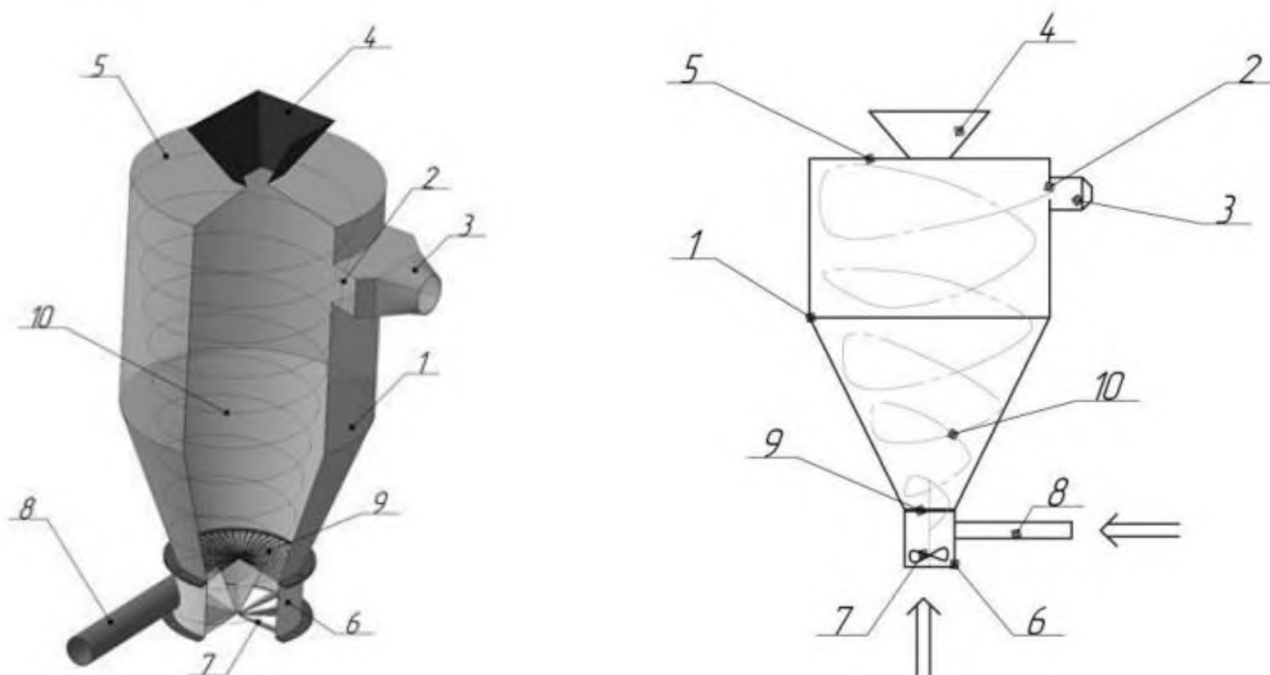


Рисунок 2.3. – Сушарка з регульованим закрученим потоком теплоносія:

1 – сушильна камера; 2 – вивідне вікно; 3, 4, 6, 8 – патрубки; 5 – кришка;

7 – завихрювач; 9 - решітка; 10 – траєкторії закручених потоків

## Висновки до розділу

За результатами проведеного аналізу можна зробити наступний висновок – ефективно та якісно сушіння насіння гречки може бути здійснене в тепло-масообмінних апаратах із закрученими потоками теплоносія сушильного агенту. Цей спосіб сушіння дозволить скоротити час сушіння, що забезпечить збереження поживної та біологічної цінності, зокрема незамінні амінокислоти, тим самим підвищити якість сипкого матеріалу. Розглянута нова принципова схема сушарки.

### 3. ПРОГРАМА, МЕТОДИКА І РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для розробки раціональних режимів сушіння дисперсних продуктів необхідно провести комплексну оцінку об'єктів досліджень. Необхідно знати щільність, порізність, гранулометричний склад та кут природного укосу тощо. Дані характеристики дозволять розробити раціональні режими не тільки обробки, а й зберігання, транспортування, а також спроектувати високоефективні сушильні апарати із закрученими потоками теплоносія.

#### 3.1 Методика визначення щільності зерна гречки

Від структури, хімічного складу та вологості залежить щільність сипучих матеріалів. Дослідження з вивчення щільності насіння гречки проводилися з використанням пікнометра методом гідростатичного зважування (рис. 2.1).



Рисунок 3.1 – Пікнометр

У кожній наважці обсяг  $V$ ,  $\text{м}^3$ , розраховували як:

$$V = \frac{m_n - m_e}{\rho_{ж}}, \quad (3.1)$$

де  $m_n, m_e$  – маса наважки та матеріалу, кг;

$\rho_p$  – щільність ефіру (етилового) при 20 °С, кг/м<sup>3</sup>.

Щільність матеріалу визначали:

$$\rho = \frac{m_n}{V}, \quad (3.2)$$

де  $m_n$  і  $V$  - маса та обсяг наважки.

Вплив вологості  $W^c$  на щільність матеріалів наведено на рис. 3.2.

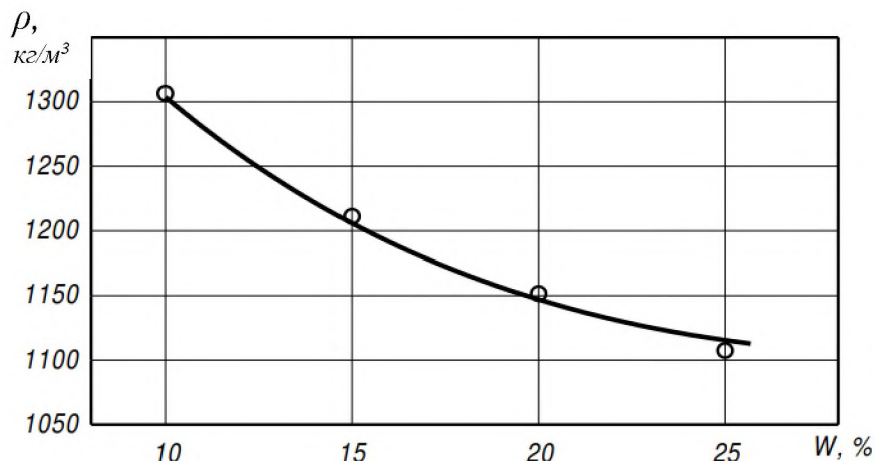


Рисунок 3.2 – Вплив вологості на щільність насіння гречки

В результаті проведеної роботи встановлено, що при підвищенні вологості щільність знижується. Цей факт пояснюється якісним та кількісним її станом.

### 3.2 Методика визначення насипної щільності

Величина насипної щільності зерен гречки визначається відношенням одиниці маси до одиниці об'єму. Дана величина залежить від вологості матеріалу і його щільності, а також від форми зернівки, фракційного складу та їх шорсткості.

Визначення насипної щільності здійснювали за допомогою літрової пурки (при температурі навколишнього повітря  $293 \pm 1,5$  К) і розраховували як [11]:

Експериментальні дослідження проводився під впливом сили гравітації для маси частинок. Розрахункова формула мала такий вигляд:

$$\rho_n = \frac{G}{V} \quad (3.3)$$

де  $G$  – маса наважки, кг;

$V$  – об'єм наважки, м<sup>3</sup>.

Вплив вологості на насипну щільність матеріалу представлено на рис. 3.3.

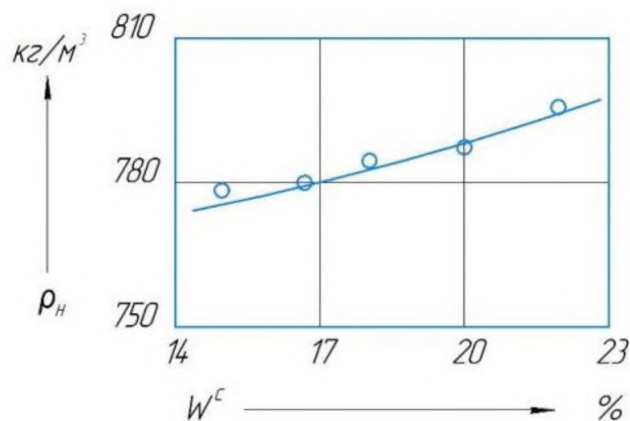


Рисунок 3.3 – Залежність насипної щільності зерна гречки  $\rho_n$  від вологості  $W_c$

Дослідженнями встановлено, що зі збільшенням вологості насипна щільність об'єктів сушіння збільшується, що зумовлено підвищенням коефіцієнта внутрішнього тертя.

### 3.3 Методика вивчення кута природного укосу

Сипучість дисперсних продуктів обумовлюється вільним переміщенням однієї частинки щодо іншої при пересуванні всього шару і визначається кутом природного укосу. Кут природного укосу визначали на експериментальній установці (рис. 3.4) способом обвалення (статичний кут). Матеріал поміщали в ємність прямокутного типу, а потім прибирали одну з бічних поверхонь. Відбувалося обвалення шару продукту, а кут, утворений схилом обрушився продукт і горизонталлю і є статичний кут природного укосу. Результати досліджень наведено на рис. 3.5.



Рисунок 3.4 – Експериментальна установка

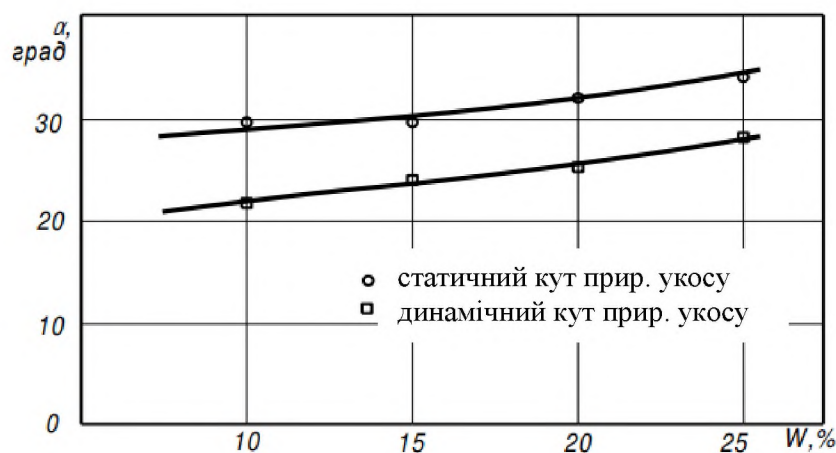


Рисунок 3.5 – Залежності кутів природного укосу зерна гречки від вологості  $W_c$

З наведеного графіку видно, що величина кута природного укосу підвищується зі зростанням вологості: 5 до 25 % –  $34^\circ$  до  $46^\circ$  (динамічний від  $27^\circ$  до  $40^\circ$ ).

#### 3.4 Методика визначення гранулометричного складу

При дослідженні фракційного складу застосовується еквівалентний діаметр, що дорівнює діаметру кулі середньої частки продукту:

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{6V_m}{\pi}}, \quad (3.4)$$

де  $V = G/n\rho_c$  – об'єм частинки матеріалу, м<sup>3</sup>;

$G$  – маса довільної наважки, кг;

$n$  – кількість частинок у наважці.

Найбільш поширеним є метод розсіву на сита. Розміри частинок одержаних фракцій обмежені розмірами отворів сит.

Результати гранулометричного складу подаються у вигляді графіку на рис. 3.6.

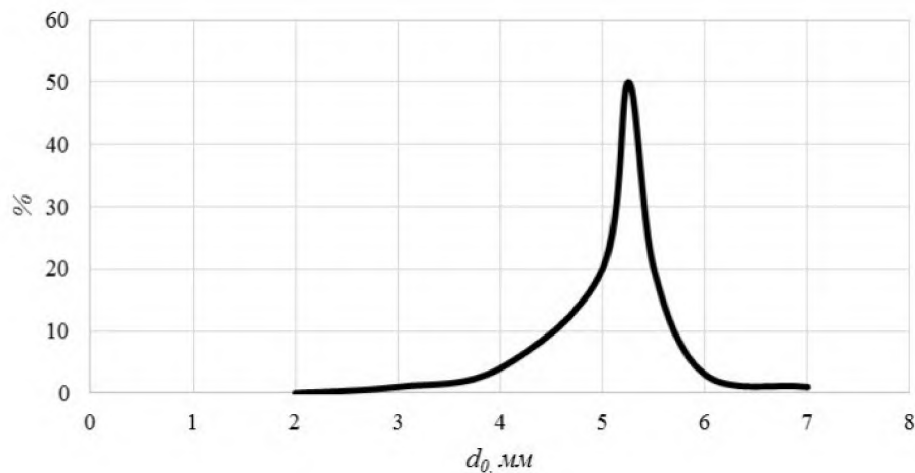


Рисунок 3.6 – Гранулометричний склад насіння гречки

3.3 Методика проведення процесу сушіння зерна гречки на експериментальній установці

З метою дослідження процесу сушіння насіння гречки нами було спроектовано та виготовлено оригінальний експериментальний сушильний апарат із закрученим потоком теплоносія, представлений на рис. 3.7.

Задана температура теплоносія, що підводиться в сушильну камеру, підтримується автоматично за допомогою одноканальних регуляторів та трифазного твердотільного реле. Багатофункціональним приладом вимірювалася

температура відпрацьованого теплоносія та контролювалася відносна вологість теплоносія на виході з сушильного апарату (рис. 3.8).

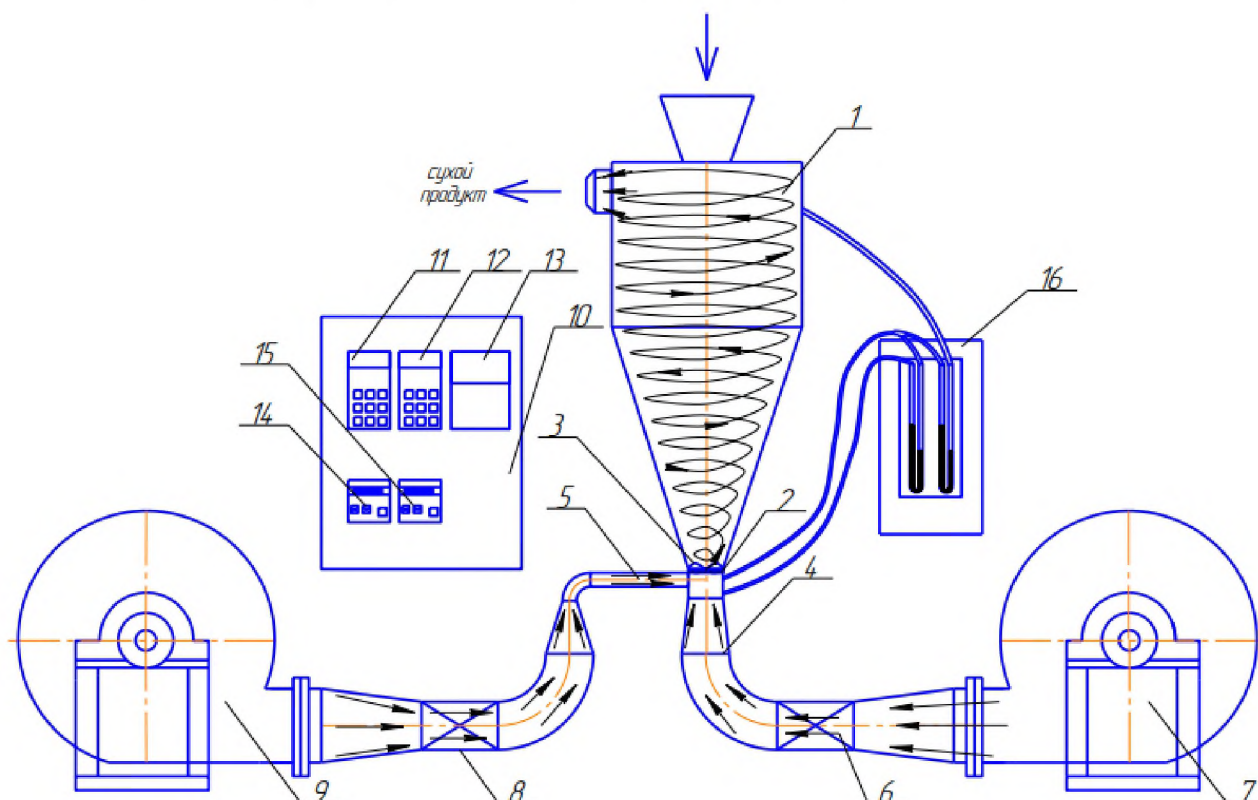


Рисунок 3.7 – Схема експериментального сушильного апарату:

1 – камера сушильна змінна; 2- завихрювач; 3 - решітка утримуюча; 4 – патрубок осьовий; 5 – тангенціальний патрубок; 6, 8 – калорифери; 7, 9 – вентилятори;  
10 – щит управління; 11, 12 - частотні перетворювачі; 13 – лічильник електричний; 14, 15 – регулятори температури у калориферах, 16 – манометр диференціальний

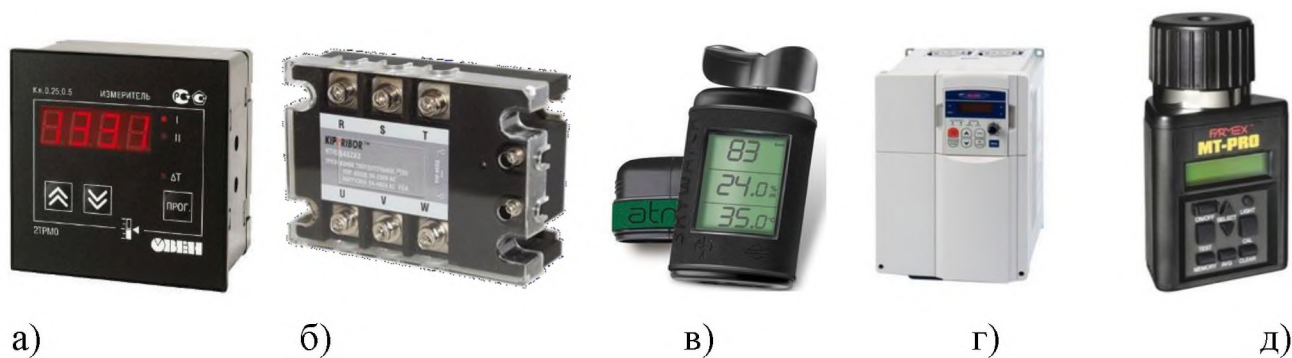


Рисунок 3.8 – Допоміжні прилади: а – терморегулятор; б – реле;  
в – багатофункціональний прилад; г – частотний перетворювач; д – вологомір

*Витрата і швидкість теплоносія.* Вимірювання швидкості теплоносія на вході та виході із сушильної камери також здійснювалося приладом SKYWATCH ATMOS. Частотними перетворювачами Веспер Е2-8300 здійснювалося регулювання витрати теплоносія.

*Конфігурація сушильної камери.* Насіння гречки висушувалося в конічно-циліндричній камері (3.9) в нижній частині, у меншій основі якої, встановлений завихрювач (рис. 3.) і виконано циліндричне кільце, до якого тангенціально (за дотичною) підключено патрубок для підведення закручування потоку теплоносія. Внутрішній діаметр нижньої основи конуса – змінюється від 50 до 150 мм, внутрішній діаметр циліндричної частини – 300 мм, висота циліндричної частини – 200 мм, висота конічної частини – 200 мм, внутрішній діаметр тангенціального патрубку – 30 мм.

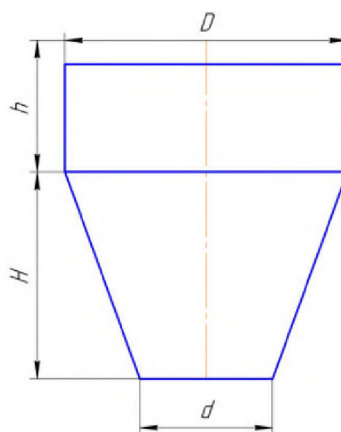


Рисунок 3.9 – Сушильна камера



Рисунок 3.10 – Завихрювач

*Гідродинаміка і кінетика процесу сушіння.* Експерименти проводилися з насінням гречки, початковою відносною вологістю 22 %.

Шляхом зважування визначалося початкове питоме навантаження на газорозподільну решітку  $G_p$ , кг/м<sup>2</sup>, і обсяг конуса конічної частини сушильної камери до  $G_k$ , кг/м<sup>3</sup>. Для дослідження кінетики насіння гречки сушарка прогрівався гарячим теплоносієм протягом 20...25 хвилин. Через верхню частину сушильної камери здійснювалося завантаження вологого продукту та відбір проб. Діапазон часу при відборі проб складав 1 хвилину. Після проведення експерименту визначалася вологість гречки електронним вологоміром (рис. 3.8), а також перевірялася методом висушування до постійної маси сушильній шафі при температурі 378 К протягом 3-х годин. Дослідження кінетики сушіння гречки проводилося у стаціонарному режимі. Значення теплоносія у кожному досвіді підтримувалися постійними у наступному діапазоні значень: витрата тангенціального потоку теплоносія від 4 до 110 м<sup>3</sup>/год; витрата осьового потоку теплоносія змінювався від 200 до 1200 м<sup>3</sup>/год; температура на вході в сушарку – від 333 К до 383 К; питоме навантаження на об'єм конічної частини сушильної камери до  $G_k = 25,2$  кг/м<sup>3</sup>.

## РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

На підставі вивчення літературних джерел для дослідження визначено: температура  $T$  сушильного агенту, співвідношення діаметрів конічної частини корпусу  $D/d$  і витрата  $Q_t$  потоку сушильного агенту, що тангенціально підводиться. Знаючи їх взаємний вплив на процес сушіння, можна визначити оптимальний режим та конструкцію сушильної камери.

В якості оцінки критеріїв обрано:  $Y_1$  – питомі енергетичні витрати (визначають енергоємність сушіння), (кВт·год)/кг<sub>вл</sub>;  $Y_2$  – вологонапруження об'єму сушильної камери (визначає продуктивність сушіння), кг<sub>вл</sub>/(м<sup>3</sup>·год).

Досліджувані чинники сумісні та некорельовані між собою. Інтервали їх зміни зведені у табл. 4.1.

Таблиця 2.1 – Межі вимірювання вхідних факторів

Умови планування	Кодоване значення	Значення факторів		
		$x_1$	$x_2$	$x_3$
		$D/d$	$T_{ca}$	$Q_t$
Основний інтервал	0	0,33	358	57
Інтервал варіювання	$\Delta$	0,10	15	31,5
Верхній рівень	+1	0,43	373	88,5
Нижній рівень	-1	0,23	343	25,5

План досліджень було закладено у матрицю планування. Матриця планування з результатами експериментальних досліджень наведено у табл. 2.2:

Для обробки отриманих експериментальних даних (при рівні значущості  $q=0,05$ ) використовували статистичні критерії: перевірка окремих регресійних коефіцієнтів на значущість – критерій Стьюдента; перевірка однорідності дисперсій – критерій Кохрена; адекватність – Фішера.

За експериментальними даними (табл. 4.2), при врахуванні значущості отримано регресійні рівняння, що характеризують процес сушіння насіння гречки під дією досліджуваних параметрів:

Таблиця 4.2 – Матриця планування та результати експерименту

Досліди	Кодоване значення			Фізичне значення факторів			Питомі енергетичні витрати, $Y_1$ (кВт·год)/кг <sub>вкл</sub> ;	Напруження об'єму $Y_2$ , кг <sub>вкл</sub> /(м <sup>3</sup> ·год).
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$D/d$	$T_{ca}$	$Q_t$		
1	-1	-1	-1	0.23	343	25,5	2,749	4,868
2	-1	+1	-1	0.23	373	25.5	3,140	5,813
3	+1	-1	-1	0.43	343	25.5	2,110	5,494
4	+1	+1	-1	0.43	373	25.5	2,380	6,729
5	-1	-1	+1	0.23	343	88.5	2,960	5,394
6	-1	+1	+1	0.23	373	88.5	3,167	6,580
7	+1	-1	+1	0.43	343	88.5	2,258	6,174
8	+1	+1	+1	0.43	373	88.5	2,361	7,777
9	-1,682	0	0	0.17	358	57	3,247	5,357
10	+1,682	0	0	0.5	358	57	1,634	6,785
11	0	-1,682	0	0.33	333	57	2,168	5,127
12	0	+1,682	0	0.33	383	57	2,617	7,200
13	0	0	-1,682	0.33	358	4	2,572	5,440
14	0	0	+1,682	0.33	358	110	2,766	6,661
15	0	0	0	0.33	358	57	2,501	5,989
16	0	0	0	0.33	358	57	2,409	5,989
17	0	0	0	0.33	358	57	2,409	5,989
18	0	0	0	0.33	358	57	2,409	5,989
19	0	0	0	0.33	358	57	2,409	5,989
20	0	0	0	0.33	358	57	2,409	5,989

$$y_1=2,6-0,11x_1-0,09x_2-0,03x_3-0,04x_1^2-0,06x_2^2-0,03x_3^2-0,06x_1x_2-0,03x_1x_3-0,08x_2x_3;$$

$$y_2=15,27+0,28x_1+0,75x_2+0,97x_3-0,68x_1^2-0,28x_2^2-0,36x_3^2+0,27x_1x_2+0,11x_1x_3+0,37x_2x_3.$$

В результаті проведення 20-ти дослідів отримано інформацію про вплив параметрів сушіння та отримано математичну модель, що дозволяє розрахувати

питомі енерговитрати на 1 кг висушеного насіння гречки, вологонапругу сушильної камери, в рамках обраних діапазонів зміни вхідних параметрів.

*1. Вплив співвідношення діаметрів патрубків конічної частини сушильної камери на кінетику сушіння*

З графіків, поданих на рис. 4.1 видно, що співвідношення діаметрів конічної частини сушильної камери надає значний вплив на швидкість сушіння насіння гречки.

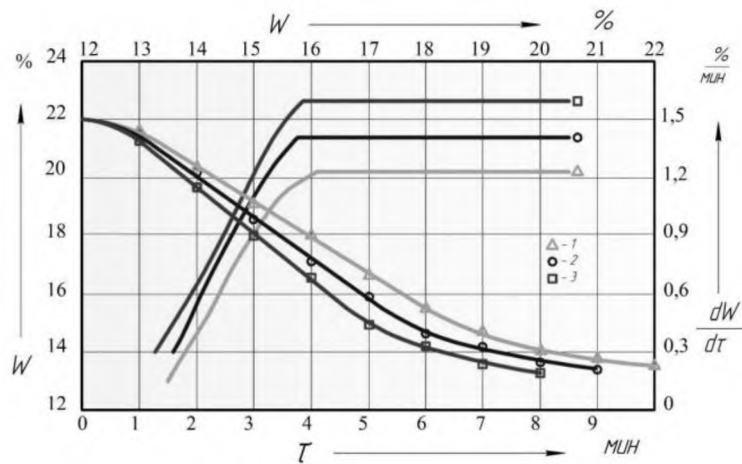


Рисунок 4.1 – Криві сушіння та швидкості сушіння насіння гречки:

1 –  $D/d=0,5$ ;  $T_{ca}=358$  К;  $Q_{\tau}=31$  м<sup>3</sup>/год

2 –  $D/d=0,33$ ;  $T_{ca}=358$  К;  $Q_{\tau}=31$  м<sup>3</sup>/год

3 –  $D/d=0,17$ ;  $T_{ca}=358$  К;  $Q_{\tau}=31$  м<sup>3</sup>/год

*2. Вплив температури теплоносія на кінетику сушіння*

З графіків, поданих на рис. 4.2 видно, що температура теплоносія є одним із найбільш значних параметрів, що впливають на швидкість сушіння насіння гречки. Зі збільшенням температури теплоносія відзначається зменшення критичної вологості. Пояснюється це тим, підвищення температури інтенсифікує внутрішню термодифузію вологи.

З графіків видно, що значна частина вологи випаровується під час постійної швидкості сушіння.

Встановлено, що насіння гречки містить високу кількість осмотичної та адсорбційно-пов'язаної вологи, а наявність періоду постійної швидкості

сушіння свідчить про перевищення інтенсивності термодифузії вологи над інтенсивністю вологообміну.

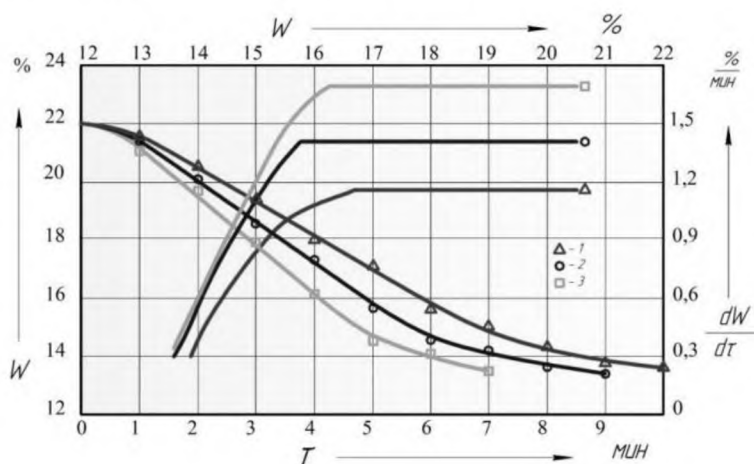


Рисунок 4.2 – Криві сушіння та швидкості сушіння насіння гречки:

1 –  $D/d=0,33$ ;  $T_{ca}=358$  К;  $Q_{\tau}=31$  м<sup>3</sup>/год

2 –  $D/d=0,33$ ;  $T_{ca}=358$  К;  $Q_{\tau}=31$  м<sup>3</sup>/год

3 –  $D/d=0,17$ ;  $T_{ca}=358$  К;  $Q_{\tau}=31$  м<sup>3</sup>/год

### 3. Вплив витрати потоку теплоносія на кінетику сушіння

На рис. 4.3 представлено вплив витрати тангенціального витрати теплоносія на кінетику сушіння насіння гречки.

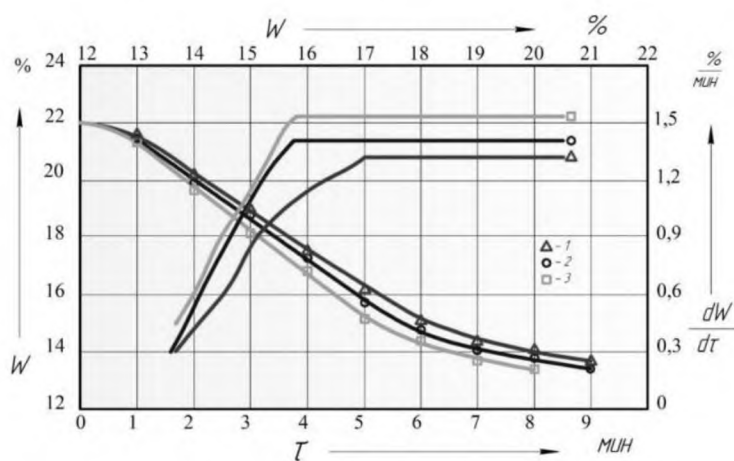


Рисунок 4.3 – Криві сушіння та швидкості сушіння насіння гречки:

1 –  $D/d=0,33$ ;  $T_{ca}=358$  К;  $Q_{\tau}=4$  м<sup>3</sup>/год

2 –  $D/d=0,33$ ;  $T_{ca}=358$  К;  $Q_{\tau}=31$  м<sup>3</sup>/год

3 –  $D/d=0,17$ ;  $T_{ca}=358$  К;  $Q_{\tau}=110$  м<sup>3</sup>/год

### Висновки до розділу

1. Отримані криві (рис. 4.1) показують, що початку процесу сушіння має місце короткочасна стадія прогріву матеріалу, і тривалість цього періоду залежить від висоти шару насіння (ніж менше співвідношення, тим вища висота шару).
2. Отримані криві (4.2) свідчать про те, що витрата теплоносія впливає на кінетику сушіння незначною мірою в порівнянні з іншими параметрами.
3. Отримані криві (4.3) свідчать про те, що витрата теплоносія впливає на кінетику сушіння незначною мірою в порівнянні з іншими параметрами.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблено новий системний концептуальний підхід до створення ресурсозберігаючих машинних технологій сушіння дисперсних продуктів у закрученому потоці теплоносія, спрямованих на інтенсифікацію, збереження та раціональне використання матеріальних та енергетичних ресурсів.

2. З використанням існуючих експериментальних методів проведено системну оцінку об'єктів сушіння; досліджено вплив вологості та температури на фізико-механічні властивості насіння гречки, а також запропоновано математичні рівняння, що адекватно описують отримані експериментальні.

3. Розроблено математична модель розподілу полів швидкостей теплоносія та частки гречки в циліндроконічній сушильній камері, що дозволяє обчислити коефіцієнти тепло-масовіддачі від поверхні частки до теплоносія.

4. Розроблено математичний опис процесу руху дисперсного матеріалу в кільцевому каналі вихрової камери, що встановлює зв'язок між висотою кільцевого каналу та мінімальною витратою теплоносія.

5. Вивчено механізм та основні закономірності кінетики сушіння насіння гречки; визначено чисельні значення та діапазон зміни основних кінетичних характеристик; за результатами планування експериментів та статистичної обробки експериментальних даних встановлено вплив різних факторів на кінетику процесу сушіння. На основі багатofакторного статистичного аналізу проведено теоретичну багатокритеріальну оптимізацію процесів сушіння в закрученому потоці теплоносія, виявлено раціональні інтервали зміни параметрів процесу сушіння: насіння гречки: співвідношення діаметрів конічної частини  $d/D = 0,2...0,34$ ; температура теплоносія –  $358...373$  К; кількість теплоносія, що підводиться через тангенціальний патрубок –  $25,5...57,0$  м<sup>3</sup>/год.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Успішне вирощування гречки. АгроБізнес: веб-сайт. URL: <https://agro-business.com.ua/agro/ahronomiia-sohodni/item/12297-uspishne-vyroshchuvannia-hrechky.html>
2. Нові рішення і технології переробки зерна гречки. АГРО-СИМО-МАШБУД. URL: <https://simo.com.ua/ua/public/novye-resheniya-i-te>
3. Зберігання насіння гречки. АгроБізнес: веб-сайт. URL: <https://agro-business.com.ua/agro/zberihannia/item/14322-zberihannia-nasinnia-hrechky.html>
4. Онлайн-каталог сортів гречки. URL: <https://pdatu.edu.ua/pro-universytet/onlajn-katalog-sortiv-grechki.html>
5. Пилипюк В., Дулько А. Енергетичний розрахунок спіральної сушарки: тези IV студентської науково-технічної конференції «Сучасні технології у агровиробництві та природокористуванні». Луцьк: Факультет аграрних технологій та екології, ЛНТУ. – 2024. С. 107–109. URL: <https://drive.google.com/file/d/1kiqDoHIYM4UQvwzICjFS-kiuF7CflZDA/view?usp=sharing>
6. Котов Б.І. До питання зниження енергоємності процесів сушіння зерна / Б.І. Котов, В.О. Лісецький // Перспективи розвитку механізації, електрифікації та технічного сервісу сільськогосподарського виробництва: матеріали міжнародної науково-технічна конференція. – Глеваха: ІМЕСГ, ІТС. – 1996. – С. 67.
7. Дідух В.Ф. Науково-технологічні основи механізованого сушіння неоднорідних матеріалів: дис. ... доктора техн. наук: 05.05.11 / Володимир Федорович Дідух. – Луцьк, 2003. – 274 с.
8. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських матеріалів: монографія / В.Ф. Дідух. – Луцьк: ЛДТУ, 2002. – 165 с.
9. Дударєв І.М. Розрахунок машин зі спіральними робочими поверхнями [Текст] : монографія / І. М. Дударєв; Луц. нац. техн. ун-т. - Луцьк : Інформ.-вид. від. Луц. НТУ, 2017. – 227 с.

10. Забродоцька Л.Ю. Дослідження та вдосконалення процесу сушіння вороху насіння трав : Монографія / Л.Ю. Забродоцька, Р.В. Кірчук. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2013матеріалу3. – 164 с.
11. Мужилівський М.А. Дослідження процесу сушіння зерна проса в сушарках з використанням СВЧ-нагріву: робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр» за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування / Микола Анатолійович Мужилівський. – Вінниця, ВНАУ, 2020. – 115 с.
12. Котов Б.І. Розрахунок кінетики сушіння неоднорідних рослинних матеріалів / Б.І. Котов, А.В. Спирін, І.А. Зозуляк, А.В. Півнюк // Всеукраїнський науково-технічний журнал «Техніка, енергетика, транспорт АПК» №1 (96) 2017 – С.93-95.
13. Спирін А.В. Розрахунок кінетики сушіння неоднорідних рослинних матеріалів / А.В. Спирін, Б.І. Котов, І.А. Зозуляк, А.В. Півнюк // Техніка, енергетика, транспорт АПК – Вінниця, 2016 – №4, С.52-54.