

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра харчових технологій

Допущено до захисту

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 р.

Зав. кафедри, к. с.-г. н., доцент

\_\_\_\_\_ Андрій ЧЕРНЕГА

(підпис)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА  
МАГІСТРА**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВОЛОГОВМІСТУ КОМПОНЕНТІВ  
ЗЕРНОСУМІШІ НА ЇХ СИПКІСТЬ ПРИ ЙОГО СУШІННІ**

Виконав – студентка II курсу, групи 11 м-з-тз  
освітньої програми Технології зерна та  
зернопродуктів  
спеціальності 181 «Харчові технології»  
Горобчук Катерина Михайлівна

Науковий керівник – канд. техн. наук, доцент  
Єремєєва Олена Анатоліївна

Умань–2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ САДІВНИЦТВА

Факультет інженерно-технологічний  
Кафедра харчових технологій  
Освітня програма Технології зерна та зернопродуктів  
Спеціальність 181 «Харчові технології»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Завідувач кафедри**  
\_\_\_\_\_ Андрій ЧЕРНЕГА  
« 30 » 06 2023 р.

**ЗАВДАННЯ  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

студентці **ГОРОБЧУК Катерина Михайлівна**  
(прізвище, ім'я, по батькові)

**1. Тема роботи** «Дослідження впливу вологовмісту компонентів зерноsumіші на їх сипкість при його сушінні»

**Керівник роботи** ЄРЕМЕЄВА Олена Анатоліївна, канд. техн. наук, доцент,  
затверджено наказом вищого навчального закладу від «30» червня 2023 р.

№ 01-06/161

**2. Строк подання студентом роботи** – «25» листопада 2023 р.

**3. Вихідні дані до роботи:** Вплив вологості частинок зернової суміші на її сипкість, вивчення фізичної суті дифузії води в капілярах зернини при конвективному способі його сушіння, встановлення механізму внутрішньої дифузії води і причину зростання витрат енергії з вилучення фізично зв'язаної води на завершальному етапі сушіння.

**4. Перелік питань, які потрібно розробити (назва розділів, які належить розробити):** Вступ. 1. Огляд літератури. 2. Умови, схема та методика проведення дослідження. 3. Результати дослідження. 4. Технологічна частина. 5. Охорона праці. 6. Економічна ефективність. Висновки. Рекомендації виробництву. Список використаних джерел. Додатки.

## 5. Консультанти розділів роботи

| Розділ        | ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта                                          | Підпис, дата   |                  |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------------------|
|               |                                                                                    | завдання видав | завдання прийняв |
| Охорона праці | ПРОКОПЕНКО Едуард Васильович, доцент кафедри прикладної інженерії та охорони праці |                |                  |

**6. Дата видачі завдання – «18» квітня 2023 р.**

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи           | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|-------|-----------------------------------------------|-------------------------------|----------|
| 1.    | Завершення наукових досліджень                | 30.08.23 р.                   |          |
| 2.    | Вступ                                         | 02.09.23 р.                   |          |
| 3.    | Огляд літератури                              | 23.09.23 р.                   |          |
| 4.    | Умови, схема і методика проведення досліджень | 07.10.23 р.                   |          |
| 5.    | Результати досліджень                         | 21.10.23 р.                   |          |
| 6.    | Економічна ефективність                       | 28.10.23 р.                   |          |
| 7.    | Охорона праці                                 | 04.11.23 р.                   |          |
| 8.    | Висновки                                      | 11.11.23 р.                   |          |
| 9.    | Рекомендації виробництву                      | 11.11.23 р.                   |          |
| 10.   | Список використаних джерел                    | 18.11.23 р.                   |          |
| 11.   | Додатки та матеріали для презентації          | 20.11.23 р.                   |          |
| 12.   | Подання здобувачем роботи                     | 27.11.23 р.                   |          |
| 13.   | Отримання рецензії                            | за <b>три доби</b> до захисту |          |

**Здобувач вищої освіти**

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

**Керівник роботи**

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

## **ВІДГУК**

**Складові анотації:** дані про автора, тема та обсяг кваліфікаційної роботи, короткий опис цілей роботи, використовувані елементи вивчення, результати і висновок.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП                                                                                                                 | 6  |
| РОЗДІЛ 1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЇ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ<br>ОБРОБКИ ЗЕРНА (огляд літератури)                                 | 10 |
| 1.1 Характеристика зерна як об'єкту зберігання. Фізіологічні процеси в<br>зерновій масі.....                          | 10 |
| 1.2 Вплив вологовмісту на ділимість суміші зерна.....                                                                 | 12 |
| 1.3 Методи та способи сушіння зерна.....                                                                              | 15 |
| 1.4 Режими сушіння зерна.....                                                                                         | 17 |
| Висновки до розділу 1.....                                                                                            | 21 |
| РОЗДІЛ 2 УМОВИ, СХЕМА ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ<br>ДОСЛІДЖЕННЯ                                                           | 23 |
| 2.1 Об'єкти і методи                                                                                                  | 23 |
| 2.2 Методи розрахунку структурно-механічних параметрів зерноsumіші...25                                               | 25 |
| 2.3 Методика проведення досліджень                                                                                    | 27 |
| 2.3.1 Впливу вологості аеродинамічно-легких домішок зерна на їх сипкість27                                            | 27 |
| Висновки по розділу 2.....                                                                                            | 28 |
| РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ                                                                      | 29 |
| 3.1 Дослідження впливу вологовмісту компонентів зерноsumіші на їх<br>сипкість.....                                    | 29 |
| 3.2 Дослідження впливу вологовмісту компонентів зернової суміші на<br>продуктивність та ефективність сепарування..... | 32 |
| РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ                                                                                                | 34 |
| РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ                                                                                      | 38 |
| ВИСНОВКИ                                                                                                              | 41 |
| РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ                                                                                              | 42 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                                                                                            | 43 |
| ДОДАТКИ                                                                                                               | 47 |

## Abstract

The author of the work is Kateryna Mykhaylivna Horobchuk. The topic of the work "Investigation of the influence of the moisture content of the components of the grain mixture on their flowability during its drying."

Grain cleaning and drying operations are technologically related. The productivity of grain cleaning is affected by the moisture content of the grain mixture, and the energy consumption of drying is related to the content of grain impurities, methods and parameters of heat and moisture exchange.

Grain cleaning, as a rule, precedes its drying and is carried out in various ways, and the productivity of the mixing separation equipment is largely related to the moisture content of the grain mixture and can decrease many times over with an increase in its moisture content.

Drying costs are determined by the ratio of the listed methods and modes, which ensure the lowest unjustified energy losses with exhaust gases, losses due to heated surfaces, inefficient fuel combustion, unsuccessful introduction of the working agent to the grain environment, as well as the content of impurities in the grain.

The paper investigated the influence of the moisture content of the components of the grain mixture on their flowability during its drying. The goal is achieved by clarifying the influence of the moisture content of the grain mixture on its division and the mechanism of internal diffusion of moisture of capillary-spaced bodies with the justification and development of theoretical, methodological and methodical principles for the optimization of heat-moisture exchange by establishing the dominant factors of influence on the intensification and energy-saving criteria of the drying process and its rational parameters, taking into account the peculiarities of the content of impurities on divisibility of grain mixture, chemical and dispersed composition of grain and environmental requirements for drying technology.

## ВСТУП

Забезпечення населення продуктами переробки зерна, як унікального за харчовими та технологічними властивостями продукту єднією з пріоритетних ознак розвиненого суспільства, а його виробництво становить складову продовольчої безпеки держави. Приймаючи до уваги особливості природно-кліматичних умов України, зернова індустрія має значний запас потенціалу та набуває важливого економічного чинника, як соціального показника з забезпечення внутрішнього ринку продуктами переробки зерна, такі експортного потенціалу надлишків зернопродуктів.

Приводять зерно в стійкий стан зберігання технологією після збирання підготовки зерна (ТППЗ), що обов'язково містить етапи очищення зерна від домішок та його сушіння до критичного вологовмісту. Із перевищенням вмісту вологи в зерні над критичними значеннями суттєво скорочується тривалість безпечного зберігання зерна, за яких не погіршуються його якісні показники. Із різноманітних способів приведення зерна до стійкого стану зберігання, технологія його сушіння до цього часу є найбільш розвинутою та найбільш доцільною на ближню перспективу. Операції очищення та сушіння зерна є технологічно пов'язаними. На продуктивність очищення зерна впливає вологовміст зерноsumіші, а енергоємність сушіння пов'язана із вмістом домішок зерна, способів та параметрів тепловологообміну.

Очищення зерна, як правило, передуює його сушінню і здійснюють різноманітними способами, а продуктивність устаткування сумішеподілу більшою мірою пов'язана із вологістю зерноsumіші і з підвищенням її вологовмісту може багатократно зменшуватися.

Затрати на сушіння визначаються співвідношенням перелічених способів і режимів, що забезпечують найменші невинновдані втрати енергії з відпрацьованими газами, втрати через нагріті поверхні, неефективне спалювання палива, не вдале підведення робочого агента до зернового середовища, а також вмісту домішок в зерні.

Незважаючи на ряд заслужуючих уваги комбінування способів і

режимів сушіння, впливу вологовмісту на процеси фракціонування, такі співвідношення однозначно не виявлені та недостатньо науково обґрунтовані, а вплив пошарового вологовмісту зернин компонентів зернової суміші на їх фізичні властивості обмежено досліджено. Найменших затрат можна досягти зменшенням домішок зерна та усуненням недоліків і використання переваг кожного способу сушіння протягом всього періоду сушіння і зберігання.

Отже проблема підвищення продуктивності технології післязбиральної доробки зернової суміші та зниження рівня витрат енергії на її сушіння залишається невирішеною і актуальною.

Проте поступове виснаження природних ресурсів енергоносіїв з одночасним зростанням їх вартості, залежність вітчизняних підприємств від імпорту його поставок та негативний вплив теплових викидів в атмосферу зумовлюють необхідність вдосконалення технології сушіння.

Вдосконалення технології післязбиральної обробки зерна можливо лише на основі поглибленого розуміння механізму ділимості зернової суміші та дифузії вологи, управління домінуючими факторами впливу на масо-теплообмінні процеси, застосуванні системного підходу з обґрунтованим врахуванням ролі й місця кожного елементу в технологічному ланцюзі післязбиральної обробки зерна, впливу зв'язків з рештою елементів сушильного агрегату.

Питанням вдосконалення процесу сушіння та факторам інтенсифікації тепловологообмінним процесам присвячено праці О.Г.Бурдо, А.С.Гінзбурга, М.О.Грішина, В.І.Жидко, Б.Є. Мельника, Г.О.Єгорова, М.В.Остапчука, Л.А. Трисвятського, Е.М. Воблікова, М.І.Маліна, А.І.Стародубцевої, тощо. Поряд з цим, незважаючи на актуальність питань зменшення енергоємності та інтенсифікації ТППЗ, висвітлення збалансованих зв'язків й рівня інтенсифікації процесів подільності ЗС і її сушіння з економічними показниками та якістю зерна в ускладнених умовах функціонування аграрної індустрії пов'язаних з факторами входження країни в СОТ, зростаючих обсягів вітчизняного виробництва й експорту зерна з одночасною експансією продукцією імпорту

виробників аграрної продукції й зерносушильних агрегатів, – особливо актуально постає питання комплексного вирішення проблеми наукового обґрунтування та розробки практичних засад енергоощадної і високопродуктивної ТППЗ із аспектами екологічної безпеки.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Концепція роботи – розроблення високопродуктивної та енергоощадної технології приведення зерна в стійкий стан зберігання покращенням його сипкості та зменшенням внутрішнього опору дифузії вологи із капілярно-шпаруватих тіл.

**Мета і завдання досліджень.** Дослідити вплив вологовмісту компонентів зерноsumіші на їх сипкість при його сушінні. Мета досягається уточненням впливу вологовмісту зерноsumіші на її подільність та механізму внутрішньої дифузії вологи капілярно шпаруватих тіл із обґрунтуванням і розробленням теоретико-методологічних і методичних засад оптимізації тепловологообміну встановленням домінуючих факторів впливу на інтенсифікацію й енергоощадні критерії процесу сушіння та раціональних його параметрів з урахуванням особливостей вмісту домішок на подільність зернової суміші, хімічного й дисперсного складу зерна і екологічних вимог до технології сушіння.

**Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:**

- Дослідити як впливає волога компонентів зерноsumіші на її сипкість при сушінні;
- визначити втрати енергії, зміни показників якості зерна та ВРГ в кожному елементі на кожному етапі сушіння прямоотечірного зерносушильного агрегату;
- вияснити закономірності міжфазового тепловологообміну для шару зерна різної товщини.

**Об'єкт досліджень** – технологія сушіння зерна.

**Предмет досліджень** – зерно, якість зерна та закономірності дифузії теплоти та вологи, взаємодії газоповітряних сумішей і зернового шару в умовах існуючих технологічних лініях сушіння зерна.

**Методи досліджень** – аналітичні, виробничо-дослідні, фізико-технологічні, розрахунково-статистичні, за критерієм економічної доцільності та виробничої актуальності застосовуючи систем автоматизації і комп'ютерної технології.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Напідставі досліджень впливу вологості частинок зернової суміші на її сипкість, вивчення фізичної суті дифузії вологи в капілярах зернини при конвективному способі сушіння встановлено механізм внутрішньої дифузії вологи і причину зростання витрат енергії звилучення фізично зв'язаної вологи на завершальному етапі сушіння та розроблено фізичну модель інтенсифікації процесів дифузії вологи за рахунок витрат енергії на подолання опору переміщенню вологи в капілярах тіла.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розробці режимів та способів підвищення ефективності сепарування та енергоощадного сушіння зерна, методики розрахунків пов'язаних з енергоощадним сушінням, інтенсифікацією подільності зернової суміші і тепломасообмінних процесів, розробки рекомендацій післязбиральної обробки зерна та втілення в практичну діяльність розроблених технологічних рішень і методик по післязбиральній обробці зерна.

**Апробація результатів.** Основні результати роботи доповідались на конференції науковій молодих учених, аспірантів і студентів Уманського Національного Університету садівництва присвяченій 120-річчю від дня народження С.С. Рубіна (УНУС, м. Умань, 2020 р).

**Публікації.** За результатами роботи опублікована одна теза доповіді наукової конференції.

**Структура роботи.** Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку бібліографічних джерел (52 найменувань) та додатків. Робота викладена на 42 сторінках основного тексту, містить 6 рисунків та 8 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

## **СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНОЛОГІЇ ПІСЛЯЗБИРАЛЬНОЇ ОБРОБКИ ЗЕРНА**

За кількістю зерна, що виробляється за рік на душу населення протягом останнього десятиріччя, країни посідають такі місця: Канада – до 1680 кг, Австралія – 1490 кг, США – до 1050 кг, Україна – 840 кг [25, 30, 39, 45 – 51]. Проте останнім часом цей показник вітчизняного виробництва зерна зростає і вже в 2008 р було зібрано близько 950 кг, а в 2009 році, за даними Мінагрополітики України та Української Аграрної конфедерації, близько 910 кг на душу населення [45 – 52]. Загальносвітовий дефіцит виробництва зерна та значний потенціал вітчизняного виробництва дозволяє експортувати надлишки зернопродуктів.

На підприємства системи хлібопродуктів надходять партії зерна та насіння більш як ста різних зернових, бобових, олійних і кормових культур, що вирощуються вітчизняними сільгосптоваровиробниками.

Загальна ємність складських ємностей в Україні складає біля 34 млн. тонн, в тому числі елеваторна – 12 млн. тонн, решта – 19 млн. тонн – складська [14–43]. З урахуванням коротких агротехнологічних термінів збирання зерна (до 3 – 5 міс на рік) продуктивність технологічних ліній післязбиральної обробки відповідно зростає, що підвищує до них технологічні та конструктивні вимоги.

### **1.1 . Характеристика зерна як об'єкту зберігання. Фізіологічні процеси в зерновій масі**

Крім харчової цінності та відносно невисокої вартості продуктів перероблення зерна, важливість його обумовлена також високими технологічними показниками. Такими, як сипкість і транспортабельність, здатність тривалого стійкого зберігання, невисокої енергоємності зберігання, тощо.

Ці та ряд інших особливостей зерна сформували повсякденне використання зернопродуктів та стали основою харчування людей.

До основних зернових культур відносять пшеницю, жито, рис, кукурудзу, ячмінь, овес, просо, чумизу, гречку, до ернобобових – горох, квасолу, нут, а до олійних – соняшник, ріпак, сою, льон, коноплю, тощо.

За хімічним складом зерно поділяють на крохмаломістке, білкове та олійне. До першої групи відносять зерно злаків та гречки. Крохмалю та вуглеводів вони містять в середньому 70...80 %, білків – 10...16 %, жирів – 1,5...6 %. До другої групи належить насіння бобових, які містять 20...30 % білків та 60...65 % вуглеводів. Насіння та плоди олійних культур належать до третьої групи і містять 25...50 % жиру та 20...40 % білків [13, 16, 22, 30, 46].

Вміст різних речовин у зерні кожної культури змінюється навіть у межах одного сорту залежно від метеорологічних умов, родючості ґрунту та технології вирощування, але сортові й видові особливості зберігаються.

Сипкість зерна характеризується коефіцієнтом зовнішнього та внутрішнього тертя, а також кутом природного нахилу. Зернова маса має велику рухомість або сипкість. Сипкість залежить значною мірою від форми, розмірів і характеру поверхні зерна, його вологості, кількості домішок та їх складу. Так, чим більше відхиляється форма зерна від кулеподібної, тим менша його сипкість. Зерно з шорсткуватою поверхнею й вологе також менш сипке. Домішки, як правило, зменшують його сипкість [7, 15, 23, 32, 45, 50].

Кут природного нахилу зернових, залежно від їх стану, змінюється від 20 до 60° і характеризує стан сипкості зернової маси [2, 5, 10, 30, 31, 34].

Переміщення зернової маси супроводжується самосортуванням, тобто нерівномірним розподілом компонентів зернової маси у межах насипу або зернової ємності.

Самосортування – результат сипкості й неоднорідності частинок, з яких складається зернова маса. Неоднорідність зерна за формою, питомою вагою, масою 1000 зернин сприяє різній парусності зерна, тобто різній швидкості переміщення кожної частинки в повітряному потоці.

Самосортування зернової маси найбільш проявляється під час завантажування та розвантажування зерносховищ або ємностей. При самосортуванні в зерновій масі можуть утворюватися неоднорідні ділянки за фізіологічною активністю. Нагромадження легких домішок і пилу створює умови для самозігрівання.

Під час зберігання зерна мають значення загальні розміри шпарин і їх структура. Чим більша шпаруватість, тим менша об'ємна густина зернової маси. В зв'язку з цим для її розміщення необхідна більша за об'ємом ємність сховища. Розмір і форма шпарин впливають не тільки на газопроникливість зернової маси, але й на сорбційні властивості зерна при активному вентильованні.

## **1 . 2 Вплив вологовмісту на ділимість суміші зерна.**

Майже всі із відомих методів та способів фракціонування зернової суміші реалізуються завдяки її сипкої властивості, тобто здібності переміщатися по нахиленій поверхні [12, 21, 31, 45, 48, 50, 53]. Сипкість зернової суміші характеризується кутом природного нахилу і залежать від ряду факторів [12, 21, 23, 45, 48, 52]. Зокрема гранулометричного складу і характеристики (форми зернини, її розмірів та стану поверхні), вмісту та видового складу домішок, вологості зерна та інших факторів [19, 10, 23, 24, 26, 29, 35]. Зі збільшенням вологості зернової суміші кут природного нахилу зростає, а сипкість – зменшується [29, 30, 31, 45, 48, 52].

За даними Л.О.Трисвятського, із збільшенням вологості ряду зернових культур кут природного нахилу може зростати до 60 % і більше відсотків [37] і із збільшенням вологості зерна його сипкість і, як наслідок, продуктивність сепаратора, суттєво зменшуються.

Оскільки із вмістом води зерна пов'язані і його фізико-механічні властивості, то очевидно, що і ділимість суміші біде змінюватися із зміненням вологовмісту суміші зерна, окремих її компонентів чи поверхневих шарів

зернини.

Вода, що входить до складу зерна, є його невід'ємною складовою без якої невідбувається жодний біохімічний процес життєдіяльності зерна, як живого організму.

Для води характерна наявність ряду аномалій та нестабільність фізичних властивостей [29], що особливо проявляється в зернині. За Самойловим О.Я. та Дрост-Хансеном [30, 42] аномалії води пов'язані з її структурою. Модель цієї структури містить два положення щодо признання тісної подібності та впорядкованості молекул для обох агрегатних станів води (рідина-лід) мають свої особливості; та положення щодо наповненості щілин важурній тетраедричній решітці молекулами води.

Наведена формула Томсона може бути застосована для капілярів, радіус яких знаходиться в діапазоні  $0,5 \times 10^{-7} < r < 10^{-5}$  см. Для капілярів більшого розміру (радіус  $> 10^{-5}$  см) тиск насиченої пари над його меніском не суттєво відрізняється від тиску над рівною поверхнею.

Оскільки зерно характеризується наявністю лише мікрокапілярів (радіус яких менший  $1 \times 10^{-5}$  см), тому для нього тиск насиченої пари над поверхнею меніска капіляра відрізняється від цього ж показника для рівної поверхні.

Із відмічених авторами [9 – 36, 41 – 52] аномалій, виділимо ті прояви цих аномалій властивостей капілярно-зв'язаної води, що на нашу думку, можуть мати найбільше значення для масообмінних процесів в зерні:

а) трансляційне переміщення молекул відбувається не в вигляді неперервної дифузії, а рідкими скачками із одного стану рівноваги в інший, сусідній [11, 36];

б) значні відмінності поляризованості молекул води встановлено Дрост-Хансеном при температурі 36 та 60 °C [19 – 46]. Дрост-Хансеном відмічено чотири таких порігових значень температури: 15, 30, 45 та 60 °C і встановлено, що наявність розчинених в воді речовин – слабо впливають на ці температурні переходи;

в) капілярну вологу не можна розглядати як однорідну систему.

Дерягіним Б.В. та Талаєвим М.В. [ 46 ] встановлено різну структуру води в капілярах з  $r=1...15$  мкм ( $1 \times 10^{-4}$  см... $15 \times 10^{-4}$  см). Капілярна вода має іншу структурну модифікацію, що визначає особливі властивості: більша в'язкість, менша пружність насичених парів, менш летка (гірше випаровується). Найбільша густина приходить на від'ємні температури –  $30...-40$  °С. А при подальшому зниженні температури, ця вода не кристалізується, в неї зростає густина, зменшується рухомість, вода мутніє проте не перетворюється в кригу;

г) при нагріванні до температури  $150$  °С ця капілярна рідина не «закипає», а «випаровується» з поверхні як звичайна вода. Густина такої «перегрітої» рідини повільно зростає і за своїми механічними властивостями вона починає нагадувати гліцерин.

В процесах вологообміну зерна його дисперсність відіграє пріоритетну роль.

Згідно наведеної класифікації П.А.Ребіндера та А.В.Ликова [21 – 25, 29] за формами зв'язку або утримування вологи, зерно відноситься до капілярношпаринуватих колоїдних тіл. Тобто в ньому мають місце форми зв'язку вологи, що характерні для капілярношпаринуватих матеріалів (утримуєма капілярними силами) та колоїдних (адсорбційно-зв'язана і осматично-утримуєма волога).

Кількісна характеристика зв'язаної вологи прямо пов'язана з дисперсністю зерна, тобто з параметрами внутрішньої та зовнішньої питомої поверхні зерна. А якісна складова, або енергія зв'язку вологи з пористою тканиною зерна за О.Ф.Буляндру [32] пов'язана з характером взаємодії складових дисперсного середовища з вологою.

Як на рівні окремої зернини так і зернової маси шпаруватість несе основне транспортне навантаження масообміну системи. Шпарини, або порожнини можуть бути різними за розмірами й формою, можуть бути ізолюваними та пов'язаними між собою. Кількісну оцінку шпаруватості прийнято характеризувати показником об'ємної шпаруватості  $P_v$ , тобто відношення загального об'єму шпарин  $V_n$  до об'єму зернини  $V_z$ :

$$P_v = V_n / V_z; \quad (1.15)$$

Інколи користуються ще показником поверхневої шпаринуватості  $P_s$ , як відношення ефективної площі поверхні шпарин  $A_n$  до загальної площі поверхні зерна  $A_z$ :  $P_s = A_n / A_z$ ;

Шпарувата структура зернини визначає її проникливість, або пропускну (транзитну) можливість шпарин, тобто спроможність пропускати гази чи рідину під дією рушійного потенціалу. Якісну характеристику проникливості оцінюють коефіцієнтом проникливості і визначають із закону Дарсі.

До важливих показників, що впливають на масообмінні процеси в зерновій масі, відноситься шпаруватість шару, густина зернин та аеродинамічна характеристика.

### 1.3 Методи та способи сушіння зерна

Технічні засоби здійснення різних методів сушіння зерна різноманітні, що пов'язано з конструкціями сушарок. В сушінні зерна найпоширенішим є конвективний метод, при якому теплова енергія передається зерну від нагрітого газу (повітря або сушильного агенту – суміші повітря з продуктами згоряння палива). Те, що нагрітий газ водночас є теплоносієм та сорбентом вологи, зумовлює відносну простоту конструкцій конвективних сушарок.

Для існуючих конструкцій сушарок вітчизняного виробництва з конвективним методом сушіння характерним є порівняно невисокий коефіцієнт корисної дії (ККД.) – 35...45 %. Його можна підвищити удосконаленням техніко-технологічних параметрів сушарок.

В сушарках з кондуктивним методом теплообміну, теплота передається лише кондуктивно (теплопровідністю) – при контакті з нагрітою поверхнею теплоносія (теплообмінник або частково висушене зерно), а вологообмін відбувається або конвективно (подачею підготовленого повітря) або кондуктивно (з поверхні більш вологого продукту до менш вологого).

Теплообмінники в кондуктивних сушарках підігрівають парою, гарячою

водою або газом.

Під час конвективного сушіння зерно може знаходитися в різних станах: щільному нерухомому, гравітаційно псевдозрідженому, рухомому, віброкиплячому, падаючому або завислому.

Стан зернового шару визначає активну поверхню зерна, що контактує з агентом

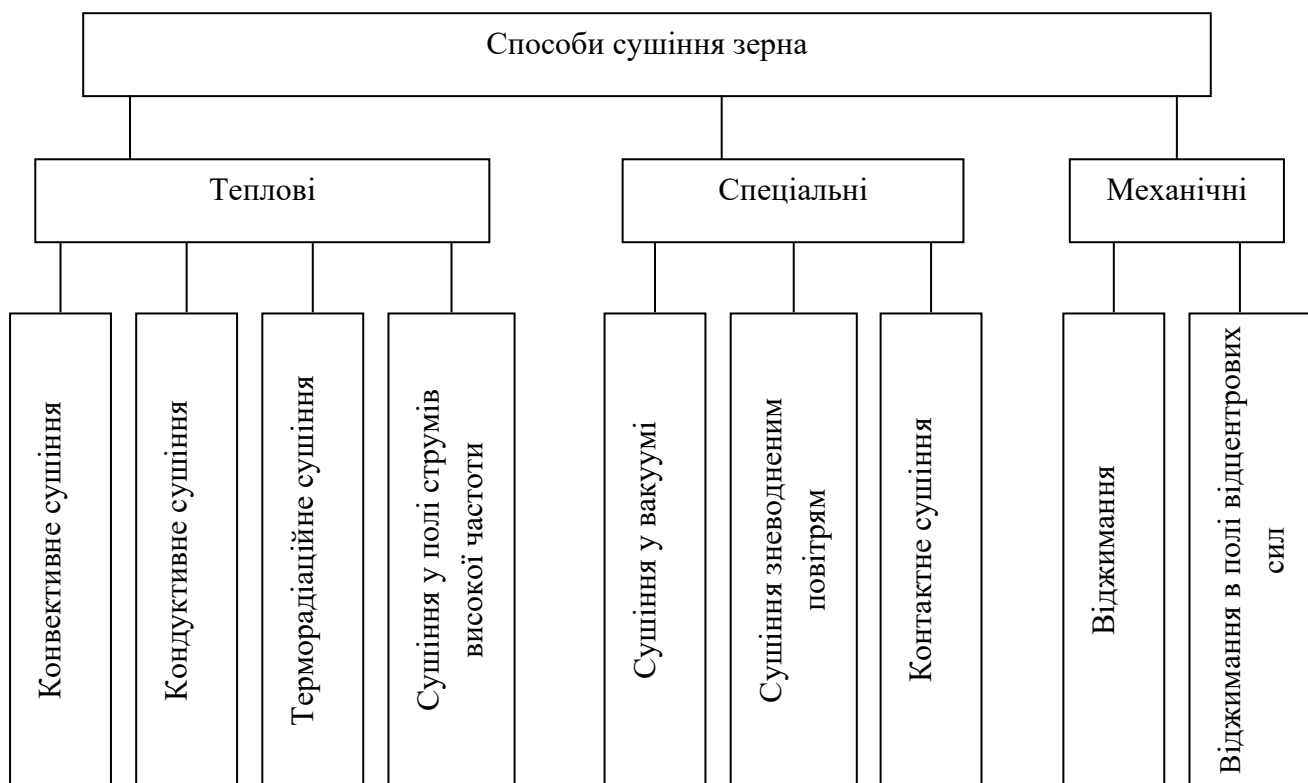


**Рис. 1.1 . Класифікація способів сушіння зерна**  
сушіння, а значить, інтенсивність процесу сушіння.

Як відмічають ряд авторів [14, 19, 29, 39 – 48] киплячий, зважений і падаючий шари зерна найраціональніше використовувати для попереднього підігрівання зерна перед його сушінням в щільному рухомому шарі.

Незалежно від технологічної схеми зберігання зерна його сушіння здійснюють у різних за станом рухомості шарах зерна: щільному нерухомому (фіксований шар), щільному малорухомому (гравітаційно рухомому або вільному шарі), киплячому шарі, зваженому (завислому) шарі та падаючому (сумісний рух зерна і середовища) [14, 19, 29, 39 – 48, 52].

Технологічний спосіб підведення агенту сушіння (охолодження) зерна застосовується в зерносушильних агрегатах всіх типів. Реалізується шляхом конвективного міжфазового тепловологообміну «газ–зерно».

На етапі сушіння від підігрітих газів передається теплота зерну, а при його охолодженні – від висушеного й нагрітого зерна теплота передається газам.

Остаточне охолодження й сушіння зерна. Процеси тепловологообміну в зерні носять інерційний характер. Тому при завершенні сушіння зерна в сушильних камерах сушарки процеси перерозподілу між шарами зернин теплоти і вологи ще деякий час продовжуються. Тому для приведення зерна в сталий стан зберігання без погіршення його якості застосовують остаточне охолодження зерна. Для більшості типів та конструкцій зерносушильних агрегатів в якості охолоджуючого агенту остаточного охолодження зерна застосовують повітря навколишнього середовища.

При остаточному охолодженні зерна, в результаті завершального перерозподілу вологи, відбувається додаткове його сушіння. Інтенсивність сушіння знаходиться в залежності від температурного перепаду між температурою зерна та охолоджуючим агентом. Слід відмітити, що при додатковому сушінні із зерна випаровується найбільш зв'язана волога. Маса випаровуємої вологи пов'язана зі станом перерозподілу вологи в зернині та температурою зерна, що направляється на охолодження.

#### **1.4 Режими сушіння зерна**

Під режимом сушіння зерна розуміють певну сукупність параметрів агента сушіння і зерна [14, 15, 29, 32-48]. За цим критерієм всі режими і методи сушіння можна умовно розділити на “швидкісні”, тобто реалізовані на сушінні підігрітого зерна сушильним агентом з підвищеною вологопоглинаючою здатністю, та “повільні” – тобто без підігрівання зерна.

Обидва способи знайшли практичне застосування та мають певні переваги і недоліки. Зважаючи на наявність переваг й недоліків прискореного

та уповільненого методів сушіння зерна доцільно їх поєднувати з метою використання переваг кожного. Одним із прикладів практичного застосування такого комбінованого методу є прискорене сушіння зерна в сушарках з додатковим підсушуванням та відлежуванням і охолодженням зерна в вентилюємих ємностях.

В зарубіжній практиці зберігання зерна уповільнений спосіб вентилювання зерна досить ефективно й широко розповсюджений не лише в випадках підлогового зберігання зерна, але й в складських ємностях силосного типу. Іноземні інвестори, при будівництві складських приміщень на території України останнім часом, обов'язково комплектують їх системами вентилювання. Зі збільшенням розмірів силосних ємностей, особливо швидкозбірних металевих від 3,5 до 25 тис.т, зростає складність із забезпеченням стабільних показників якості та однорідності зберігаємого в них зерна. Тому іноземні компанії – виробники силосів великої ємності, укомплектовують їх високопродуктивними системами вентилювання зерна [9,20, 21 – 38].

Удосконалення технології та режимів вентилювання, зміни співвідношення цін на енергоносії змушують переглянути відношення вітчизняних зернозаготівельних підприємств до вентилювання зерна як низьковитратного та ефективного технологічного засобу післязбиральної доробки та зберігання зерна. Використання сучасних матеріалів і конструкцій ємностей дозволяє підвищити рівень експлуатаційної надійності систем вентилювання зерна та уточнити режими вентилювання. Це разом із зростанням вартості енергоносіїв підвищує економічну обґрунтованість та практичну доцільність і перспективність цього технологічного способу сушіння.

Сушіння зерна зазвичай здійснюють в основному двома методами: сушінням до критичної вологості зерна 13...14 % в зерносушарках та двохетапного сушіння, за якого основну частину вологи висушують в сушарках, а остаточну – системами активного вентилювання повітрям довкілля

в бункерах, засіках, складах, буртах, силосах, де знімають незначну частину вологи 0,5...1,0 % і охолоджують зерно [6 – 15, 19, 40, 50 – 52]. Іноді повітря при активному вентиляванні підігрівають, для підвищення його здатності поглинати вологу [6 – 15, 39, 40, 53].

До основних параметрів, що визначають режим сушіння зерна, належать температура агента сушіння, початкова вологість та гранично припустима температура нагрівання зерна.

Перед сушильною камерою температура агента сушіння визначає інтенсивність процесу нагрівання зерна та вилучення з нього вологи. При зростанні температури агента пов'язано зі збільшенням кількості теплоти, що підводиться до зерна. В зв'язку з цим прагнуть до збільшення температури нагрівання зерна, проте максимальне її значення обмежене умовами зберігання якості зерна.

Початкова вологість зерна вагомо впливає на інтенсивність процесу його сушіння та визначає вибір гранично допустимих температур нагрівання зерна і максимальних температур агента сушіння. Для більшості культур зі підвищенням початкової вологості зерна характерним є зниження його термостійкості, а це обумовлює необхідність зниження температури агента сушіння та граничне зменшення припустимої температури нагрівання зерна.

Одним із головних та важливих параметрів режиму сушіння зерна є гранично припустима температура його нагрівання. При виборі режимів сушіння застосовуючи граничні значення, при яких не погіршуються показники якості зерна з одночасним забезпеченням максимальної інтенсивності процесу його сушіння.

Загальна характеристика режимів сушіння зерна. Процес теплового (швидкісного) сушіння складається із трьох основних етапів [16, 19, 21-35]:

- 1) випаровування вологи з поверхні зернини;
- 2) зовнішнє переміщення пари в навколишнє середовище;
- 3) внутрішнє переміщення вологи в зерні.

Для зменшення витрат енергоносіїв в деяких конструкціях зерносушарок

застосовується принцип повторного використання теплоти відпрацьованих газів. Більшість конструкцій сушарок є прямотечійні. Тобто процес сушіння здійснюється одноразово. Режим переміщення зерна в шахтах – неперервний, швидкість переміщення незначна.

Продуктивність сушарки пов'язана з вологістю, особливістю культури та призначенням зерна і задається в автоматичному режимі таким чином: за поточними показниками вологості зерна змінюються його витрати, тобто термін сушіння, що забезпечує задану вологість зерна на виході з сушарки.

Зерносушарки мають такі особливості:

- можливість роботи на різних видах теплоносіїв комплектацією відповідними теплоблоками;

- застосовуються нижчі температурні режими сушіння;

- використовуються корозійностійкі матеріали, що забезпечують можливість тривалої експлуатації сушарок на відкритих площадках;

- застосовуються високопродуктивні радіальні пилові вентилятори;

- в шахтних сушарках використовуються короби заданої форми, підвідні і відвідні канали особливої конструкції та розташування;

- в камерних – зерно повільно рухається між двома металевими ситовими поверхнями горизонтально розташованих барабанів шестигранної форми, відстань між якими частіше 305 мм, а довжина та кількість барабанів залежить від продуктивності сушарки, діаметр отворів ситової поверхні пов'язаний із зерновою культурою і частіше застосовують  $\varnothing \approx 1,54$  мм (по зерну ріпаку) живим січенням біля 36%;

- є можливість рециркуляції відпрацьованих газів,

- висока рівномірність сушіння та екологічна безпека експлуатації за рахунок рівномірного поділу зернового потоку на 10 струменів шириною близько 140 мм та виключення прямого контакту топкових газів з зерном;

- високий рівень вибухобезпеки та пожежної безпеки завдяки двом системам і пристрою швидкого розвантаження камери зерносушарки;

автоматизація сушарки, простота в обслуговуванні та наявність вимірювальних приладів поточних показників режимів процесу сушіння.

За рекламними проспектами, технічною документацією та виробничими дослідженнями слід відмітити конструктивні особливості та гнучкі функціональні схеми сушарок прогресивних конструкцій іноземних компаній-виробників, а також порівняно нижчі температурні режими сушіння і використання корозійностійких матеріалів для виготовлення елементів сушарки, використання високопродуктивних радіальних пилових вентиляторів, застосування заданої форми газорозподільних коробів та підвідних і відвідних каналів, застосування часткової ре циркуляції відпрацьованих газів, забезпечення високої рівномірності сушіння та екологічної безпеки експлуатації, високий рівень вибухобезпеки та пожежної безпеки, автоматизація сушарок, простота в обслуговуванні та наявність вимірювальних пристроїв поточних показників теплових параметрів процесу. Проте при переведенні цих сушарок на режими сушіння, що відповідають вітчизняним Правилам і Інструкції сушіння [60, 27], інтенсивність масообміну зростає проте одночасно із цим збільшується вміст зернової домішки, за рахунок травмування периферійних шарів зернини, а також зростають питомі витрати теплоти на сушіння зерна.

### **Висновки до розділу 1**

На підставі аналізу літературних та патентних джерел, наведених в першому розділі, можна зробити такі висновки.

1. Для приведення зерна в стійкий стан зберігання необхідно зменшити його життєву активність та вилучити життєвоактивні домішки. Із існуючих способів приведення зерна в стійкий стан найбільш економічно виправданим є технологія післязбиральної підробки зерна із зменшенням вмісту життєвоактивних домішок та вологості зерна.

2. Вологість суттєво погіршує сипкість зерна і його домішок, подовжує процес фракціонування. Достатньо зменшити вологість периферійних шарів

зернин зерноsumіші щоб покращити її сипкість.

3. Із зміненням вологості зернової суміші фізичні властивості її компонентів змінюються не в однаковій мірі, що можна використовувати для підвищення подільності суміші.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

#### 2.1. Програма досліджень експериментальних

На підставі аналізу теоретичних аспектів тепловологообмінних процесів капілярно-шпаруватих тіл та питань уточнення математичного описання закономірностей фракціонування компонентів зерноsumіші різного вологовмісту та конвективного масообміну з особливостями прикладного характеру сепараторів та зерносушильних агрегатів, сформульовано гіпотезу щодо теплоаеродинамічного фактору впливу на внутрішню дифузію фізично зв'язаної води в капілярах капілярно-шпаруватих тіл та розроблено програму виконання досліджень (рис.3.1) в якій взаємопов'язано теоретичні та практичні дослідження, характеристика об'єктів та методи досліджень кожного із етапів роботи.

Для виконання одинадцяти груп досліджень згідно Програми, викладеної на рис.2.1, були обґрунтовані параметри та схеми експериментальних установок для дослідження об'єктів наближено до виробничих умов (рис.2.2, 2.3, 2.4, 2.5) та дослідної установки шахтної прямооточийної зерносушарки ДСП-32ОТ:

№ 2 – встановлення впливу вологовмісту поверхневих шарів зерна та сміттєвих домішок на їх сипкість (дерев'яна дошка із регульованим кутом нахилу);

Стендова установка була зібрана в дослідній лабораторії на кафедрі харчових технологій Уманського НУС.

|                                                                                                            |                                                                                                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Сучасний стан після збиральної підробки зерна                                                              | Актуальність та проблемні питання                                                                                               |
| Теоретичні основи фракціонування та тепломасообміну                                                        | Гіпотеза, мета та завдання досліджень                                                                                           |
| Експериментальні та аналітичні дослідження:                                                                |                                                                                                                                 |
| механізму фракціонування та внутрішньої і зовнішньої дифузії води                                          | встановлення впливу вологості на подільність зерноsumіші та наявності аеродинамічного опору внутрішньої капілярної дифузії води |
| залежності сипкоості домішок від їх вологості                                                              | встановлення впливу вологості на коефіцієнти зовнішнього тертя                                                                  |
| продуктивності та ефективності процесу фракціонування від вологості поверхневих шарів частинок зерноsumіші | залежність продуктивності та ефективності сепарування від вологості поверхневих шарів частинок зерноsumіші                      |

**Рис.2.1 Програмно-цільова схема досліджень**

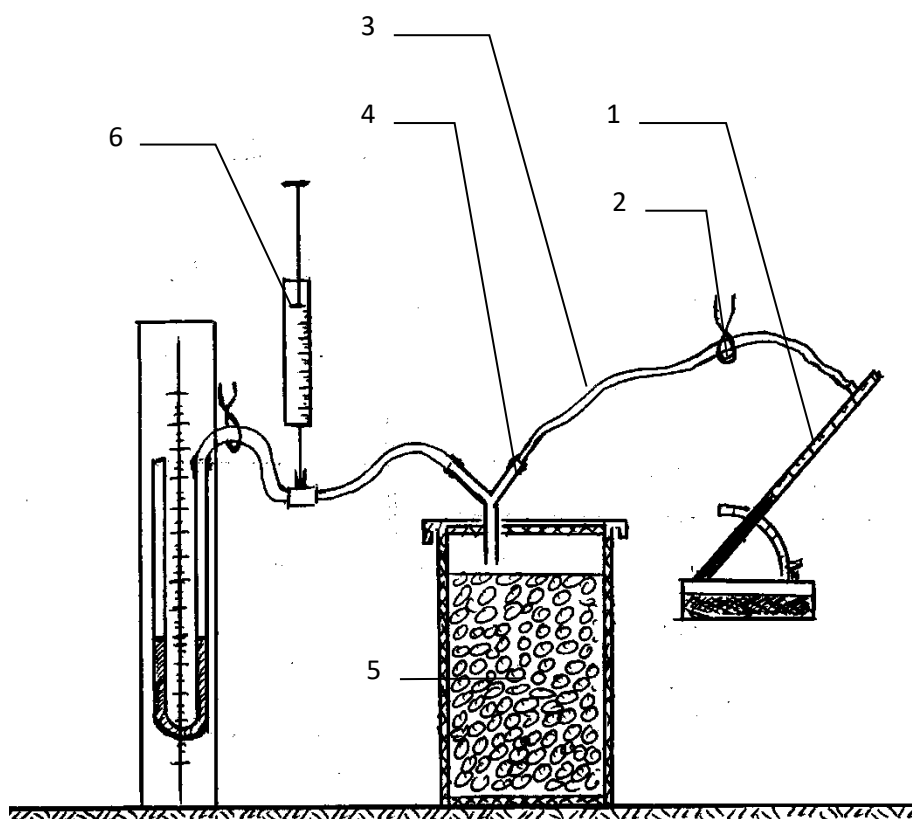


**Рис. 2.3. Стендова установка з дослідження сорбції зерном газів.**

**Лабораторна установка із дослідження механізму дифузії води** представлена на рис.2.3 і складається із таких елементів: стану розрідження в камері; 1–мікроманометр ММН-200; 2– зажими; 3 – гумові U-подібний рівень сполучні газопроводи ( $\varnothing=5\text{мм}$ ); 4 – герметично обладнаний перехідник ( $\varnothing=5\text{мм}$ ); 5 – теплоізольована герметична капсула для зразка зерна масою до 2 кг, діаметром  $\varnothing=90\text{мм}$ ; 6 – мірний шприц.

## **2.2 Методи розрахунку структурно-механічних параметрів зерносуші**

Розміри зерна встановлювали штангельциркулем бо набором сит, відповідним дослідному зразку. Так для зразка пшениці – три яруси сит із розміром отворів верхнього 2,7х20 мм, середнього – 2,2х20 мм та нижнього – 1,7х20 мм.

Об'єм зернини та насінини визначали зануренням наважки зерна вмірну колбу з рідиною, що не викликає розбухання зерна (керосин).

До щуплого зерна відносили сильно недорозвинене зерно, щупле, вдавнене по боках, зморшкувате, згострою спинкою та зморшкувате на вигляд із цілою оболонкою. Спірні зернини визначали за методом Ульріха, по співвідношенню периметру поперечної перетину до периметри кола однакових площ. Для щуплого це співвідношення становить 1,2 – 1,96, для нормального – 1,11.

Вологість зерна встановлювали експрес-аналізаторами, стандартним та зразковим методами. Стандартний метод зводиться до висушування наважок розмеленого зерна в сушильній шафі СЕШ-1 при температурі 130 °С протягом 40 хв. з подальшим охолодженням. Зразковий – за ГОСТ 17197-71 «Методи визначення вологості» висушуванням трьох видів бюксів два рази: впродовж 60 хв. в сушильній шафі при температурі 105 °С під розрідженням.

Вологість зразків зерна із

вологістю понад 18% встановлювали з попереднім висушуванням впродовж 30 хв. в

сушильній шафі при температурі 105 °С та основним висушуванням.

Сипкість зерна характеризується коефіцієнтом внутрішнього і зовнішнього тертя, які визначають шляхом виміру кутів тертя і природного нахилу. Кут тертя визначали заміром найменшого кута нахилу дошки із зразком зерна, при якому зерно починає ковзати по поверхні дошки.

Кут природного нахилу або кут скачування встановлювали заміром кута між діаметром основи та утвореного конусу при вільному падінні зерна на горизонтальну поверхню.

За результатами досліджень заносили показники кутів тертя і природного нахилу для різного вологовмісту компонентів зерна в таблиці та встановлювали залежність сипкості сміттєвих домішок і зерна від їх вологості.

Е ф е к т и в н і с т ь п р о ц е с у с е п а р у в а н н я характеризується мірою виділення визначеного компоненту суміші в найбільш однорідному вигляді.

Основним показником ефективності процесу сепарування є ступінь виділення заданого компоненту суміші. Чисельно ступінь ефективності сепарування виражають відношенням кількості виділеного компоненту, в процесі сепарування, до загальної кількості цього ж компоненту, що міститься у вихідній зерноsumіші до її сепарування [27 – 35]:

$$\eta = \frac{P_x}{P_0} \quad (2.1)$$

де  $P_x$  – кількість виділеного компоненту, % ;  $P_0$  – загальна кількість виділеного компоненту у вихідній зерноsumіші, %.

Відносну вологість повітря  $\phi$  встановлювали за поточними показниками портативного вимірювача вологи та температури «ИВТМ-7 К» і звіряли з розрахунковими даними за співвідношенням  $p_{\text{п}}/ p_{\text{н}}$ , або встановлювали по психометричній таблиці за показниками  $t_c$  і  $t_m$ ;

За експериментальними даними будували три графічні залежності:

– зміни вологовмісту зерна в часі від величини градієнту температури для різних значень вологовмісту зерна за умов незмінності температури зерна

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \text{const}, \text{ (крива сушіння при сталих значеннях температури зерна та різних за}$$

вологовмістом наважок зерна) %;

– динаміку швидкості сушіння зерна від величини градієнтів

$$\text{вологовмісту та температури за умов незмінності температури зерна } \frac{d\theta}{d\tau} = \text{const},$$

$$\frac{d\omega}{d\tau}, \text{ \% / хв.};$$

– динаміку сушіння зерна від температури зерна за різних градієнтів

$$\text{вологовмісту за умов незмінності температури зерна } \frac{d\theta}{d\tau} = \text{const}, \quad \frac{d\omega}{d\tau}, \text{ \% / хв.};$$

## 2.3 Методика проведення досліджень

**2.3.1 Впливу вологості аеродинамічно-легких домішок зерна на їх сипкість.** Дослідження виконували із домішками меншої натурної маси (ДМН) від зерна ярої пшениці урожаю 2021 р.

Для встановлення залежності сипкості компонентів зерноsumіші від їх вологовмісту дослідження виконували із кожним компонентом окремо таким чином. Із зерноsumіші виділяли фракції зерна основної культури, ДМН та інші домішки. Зважаючи на недостатню кількість виділених із зернової суміші ДМН для виконання досліджень, на лабораторному подрібнювачі готували необхідну кількість ДМН із суміші стебел, колосків, листочків та інших домішок, що отримували із зернозбиральної техніки в полі при виконанні збиральних робіт.

Зразки ДМН та зерна основної культури висушували в сушильній шафі до вологості 13 % та встановлювали їх початкові показники якості. Потім поступово збільшували вологість дослідних зразків на кожні 5 % за загальноприйнятою методикою. Вологість дослідних партій встановлювали 13; 18; 23; 28; 33 та 38 %.

Маса дослідних зразків зерна становила  $M=1,0\ldots1,4$  кг, аеродинамічно-легких – 0,1 – 0,4 кг.

Дослідні зразки зерна:

– зразок № 1: пшениця 5 кл, урожай 2021 р, об'ємна вага 751 г/л, вміст смітної домішки в очищеному зразку – 1,54 %, вміст сирової клейковини – 17,2 %, якість клейковини по ІДК 95 група якості – 11. Пошкодження клопом-черепашкою в межах 1,0 %;

– зразок № 2: ДМН об'ємною вагою 108 г/л;

– зразок № 3: ДМН об'ємною вагою 114 г/л.

Сипкість зерна встановлювали за коефіцієнтами внутрішнього і зовнішнього тертя. Коефіцієнт внутрішнього тертя визначали виміром найменшого кута тертя по похилій дерев'яній та металевій площині, при якому зразок (ДМН та зерна) починає ковзати по поверхні дошки. А коефіцієнт зовнішнього тертя – за кутом природного нахилу насипу. Тобто заміром кута між діаметром основи та утвореного конусу при вільному падінні зерна на горизонтальну поверхню.

Зазначені заміри повторювали 5 – 6 разів до відтворення значень з похибкою до 5 % від середньозваженого значення для всіх зразків ДМН і зерна в діапазоні вологості від 13 до 33 %.

За результатами досліджень заносили показники кутів тертя і природного нахилу для різного вологовмісту компонентів зерна в таблиці та встановлювали залежність сипкості ДМН і зерна від їх вологості.

## Висновки по розділу 2

1. Розроблена програма досліджень дозволяє виконати комплексно наукову роботу для досягнення поставленої мети для умов, наближених до виробничих.

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для підтвердження сформульованої в попередньому розділі гіпотези, встановлення чисельної характеристики перебігу процесів фракціонування та тепломасообміну у відповідності із Програмою експериментальних досліджень (рис.3.1) та встановлення особливостей перебігу процесів у виробничих умовах на найпоширенішій конструкції зерносушарки ДСП-320Т, рециркуляційних агрегатах ДСП-50 та сушильних агрегатах провідних іноземних компаній, а також для перевірки отриманих результатів досліджень були виконані експериментальні дослідження вдекілька етапів (рис.3.1).

Для досліджень було вибрано зерно найпоширеніших культур із найбільшими відмінностями – зерно кукурудзи та насіння ріпаку.

На вибір цих культур вплинуло не лише особливість фізико-хімічного складу, а також і відмінність параметрів довкілля пов'язана із періодом дозрівання найбільш спекотливий для насіння ріпаку та найбільш холодний – для зерна кукурудзи.

Вибір для дослідження вказаних культур із найбільшими відмінностями дозволяє найбільш повноописати перебіг тепломасообмінних процесів, уточнити їх механізм та розробити рекомендації з удосконалення технології сушіння зерна із застосуванням енергозощадних комбінованих методів та режимів сушіння.

#### **3.1. Дослідження впливу вологовмісту компонентів зерноsumіші на їх сипкість**

Дослідження проводили із найважче відокремлюваними та поширеними біологічними сміттєвими домішками зерна зернових культур – домішками зернової суміші (ЗС) із значно меншою натурною масою (ДМН). Сипкість ДМН та зерна оцінювали по коефіцієнтам внутрішнього та зовнішнього тертя.

В табл.3.1 і табл. 3.2 та на рис. 3.1 наведено результати досліджень впливу вологості *ДМН* на кут зовнішнього та внутрішнього тертя по наведеній в розд.2.5.1 методиці виконання досліджень.

Наведені результати досліджень (табл.3.1 та рис.3.1) підтверджують наші припущення щодо неоднакової динаміки змін сипкості різних компонентів зернової суміші та порівняно більшу залежність коефіцієнтів зовнішнього тертя *ДМН* порівняно із рештою компонентів зернової суміші.

Таблиця 3.1

### Вплив вологості *ДМН* на їх сипкість

| Вологість<br>ДМН, % | Кути тертя,       |                                 |                       |                       |                       |                                                     |
|---------------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------|
|                     | внутріш-<br>нього | зовнішнього (металева поверхня) |                       |                       |                       | дерев'яна<br>поверхня<br>(товщина<br>шару 10<br>мм) |
|                     |                   | товщина<br>шару 5 мм            | товщина<br>шару 10 мм | товщина<br>шару 20 мм | товщина<br>шару 30 мм |                                                     |
| 6                   | 75                | 41                              | 40                    | 35                    | 33                    | 40                                                  |
| 11                  | --"---            | 41                              | 40                    | 35                    | 32                    | 40                                                  |
| 16                  | --"---            | 42                              | 40                    | 35                    | 33                    | 40                                                  |
| 26                  | --"---            | 43                              | 41                    | 37                    | 33                    | 41                                                  |
| 36                  | --"---            | 44                              | 42                    | 38                    | 37                    | 43                                                  |
| 46                  | --"---            | 48                              | 45                    | 42                    | 40                    | 47                                                  |
| 56                  | --"---            | 50                              | 47                    | 43                    | 42                    | 50                                                  |
| 66                  | --"---            | 52                              | 49                    | 45                    | 43                    | 53                                                  |
| 76                  | --"---            | 53                              | 50                    | 45                    | 43                    | 54                                                  |
| 86                  | --"---            | 53                              | 50                    | 45                    | 43                    | 55                                                  |

Примітки: натура *ДМН* при вологості 6% становить 114 г/л.

Таблиця 3.2

### Вплив вологості зерна пшениці на її сипкість

| Показники               | Значення |    |    |    |    |    |
|-------------------------|----------|----|----|----|----|----|
| вологість, %            | 13       | 18 | 23 | 28 | 32 | 37 |
| температура, °С         | 15       | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| зовнішнього (по дереву) | 28       | 28 | 28 | 29 | 29 | 31 |
| зовнішнього (по металу) | 28       | 28 | 28 | 29 | 29 | 30 |

Примітки: для зерна пшениці 5кл., натура при вологості 13 % становить 752 г/л,

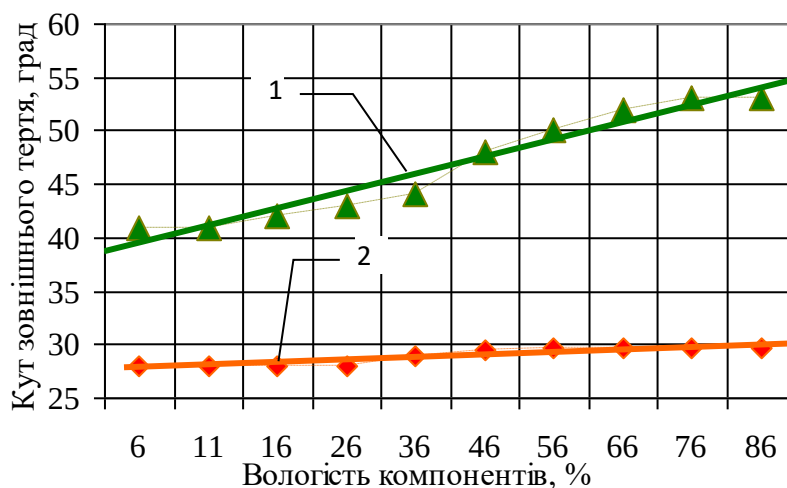


Рис.3.1. Залежність кута зовнішнього тертя компонентів зернової суміші від їх вологовмісту: 1 – ДМН; 2 – зерна пшениці

На підставі отриманих експериментальних даних отримано напівемпіричні рівняння залежності кута зовнішнього тертя ( $\Psi$ ) ДМН (3.1) і зерна пшениці (3.2) від їх вологості ( $W$ ):

$$\Psi_{\text{ДМН}} = 38,38 + 0,198 W_{\text{ДМН}}, \quad (3.1)$$

$$\Psi_z = 27,5 + 0,039 W_z, \quad (3.2)$$

Як видно із цих залежностей, сипкість ДМН в значно більшій мірі залежить від вологості цих частинок порівняно із зерном.

### 3.2. Дослідження впливу вологовмісту компонентів зернової суміші на продуктивність та ефективність сепарування.

Результати впливу вологості поверхневих шарів компонентів зернової суміші на її подільність та продуктивність викладено на рис. 3.2 та табл.3.3.

Для встановлення впливу тривалості сепарування на ефективність поділу зернової суміші, нами були виконані дослідження ситовому лабораторному сепараторі. Тривалість сепарування змінювали продуктивністю сепаратора. В табл. 3.4 та на рис. 3.3 і 3.4 представлено результати цих досліджень із поділом зернової суміші зерна пшениці та ДМН різної вологості.

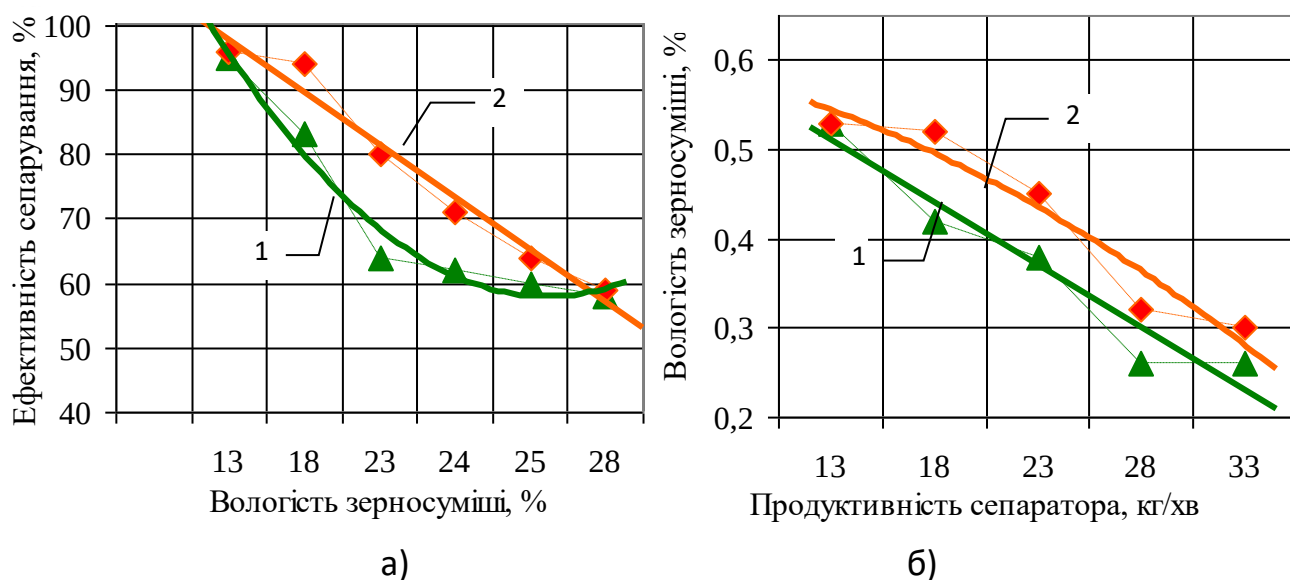


Рис. 3.2. Вплив вологості поверхневих шарів компонентів зернової суміші на а) ефективність подільності та б) продуктивність сепарування: 1 – контрольного та 2 – дослідного зразків суміші зерна і ДМН.

Таблиця 3.3

### Вплив продуктивності сепарування на ефективність подільності зернової суміші

| Параметри зерна |      | Параметри ДМН  |                | Продуктивність сепаратора, кг/хв | Ефективність очищення по вмісту, % |                  |              |
|-----------------|------|----------------|----------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------|--------------|
| зразок          | W, % | W $\delta$ , % | $\delta_o$ , % |                                  | домішок в зерні                    | зерна в домішках | узагальнений |
| 1               | 28,8 | 29             | 6,0            | 0,58                             | 89                                 | 84               | 75           |
| 2               |      |                |                | 0,71                             | 87                                 | 74               | 64           |
| 3               |      |                |                | 0,80                             | 85                                 | 72               | 61           |
| 4               |      |                |                | 0,87                             | 84                                 | 65               | 55           |
| 1               | 24,2 | 24             | 5,0            | 0,64                             | 89                                 | 95               | 85           |
| 2               |      |                |                | 0,68                             | 88                                 | 93               | 82           |
| 3               |      |                |                | 0,71                             | 87                                 | 89               | 77           |
| 4               |      |                |                | 0,75                             | 86                                 | 84               | 72           |
| 5               |      |                |                | 0,79                             | 85                                 | 81               | 69           |

Примітки: відносна вологість повітря в приміщенні, 57%

Таблиця 3.4

**Вплив вологості поверхневих шарів компонентів зернової суміші на її подільність та продуктивність**

| Зерно пшениці |       |       | Параметри газів |                   |                                    | Параметри ДМН |       |               |       | Продуктивність, кг/хв | Ефективність очищення по вмісту, % |        |              |
|---------------|-------|-------|-----------------|-------------------|------------------------------------|---------------|-------|---------------|-------|-----------------------|------------------------------------|--------|--------------|
| зразок        | Wo, % | W1, % | швидкість, м/с  | температура, t °С | тривалість міжфазової взаємодії, с | W1, %         | δo, % | вміст домішок |       |                       | ДМН                                | зернин | узагальнений |
|               |       |       |                 |                   |                                    |               |       | δз,%          | δ1, % |                       |                                    |        |              |
| контрольний   | 12,8  | 12,8  | 0,0             |                   |                                    | 13,0          | 6,5   | 0,0           | 6,1   | 0,53                  | 94,9                               | 100,0  | 95           |
|               | 17,8  | 17,8  |                 |                   |                                    | 18,0          | 6,5   | 1,6           | 6,0   | 0,42                  | 92,3                               | 98,2   | 91           |
|               | 22,8  | 22,8  |                 |                   |                                    | 23,0          | 6,5   | 19,2          | 4,9   | 0,38                  | 81,0                               | 79,5   | 64           |
|               | 27,8  | 27,8  |                 |                   |                                    | 28,0          | 6,5   | 27,5          | 4,8   | 0,26                  | 82,1                               | 70,8   | 58           |
|               | 32,8  | 32,8  |                 |                   |                                    | 33,0          | 5,2   | 34,8          | 4,6   | 0,26                  | 88,7                               | 63,3   | 56           |
| дослідний     | 12,8  | 12,7  | 0,1             | 75                | 60                                 | 12,8          | 6,5   | 0,0           | 6,2   | 0,54                  | 96,2                               | 100,0  | 96           |
|               | 17,8  | 17,4  |                 |                   |                                    | 17,4          | 6,5   | 1,0           | 6,0   | 0,52                  | 92,6                               | 98,9   | 92           |
|               | 22,8  | 22,4  |                 |                   |                                    | 22,6          | 6,5   | 4,0           | 5,1   | 0,51                  | 83,2                               | 95,7   | 80           |
|               | 27,8  | 27,5  |                 |                   |                                    | 27,7          | 6,5   | 26,1          | 4,8   | 0,32                  | 82,1                               | 72,3   | 59           |
|               | 32,8  | 32,4  |                 |                   |                                    | 33,0          | 5,3   | 31,5          | 4,6   | 0,30                  | 86,6                               | 66,7   | 58           |

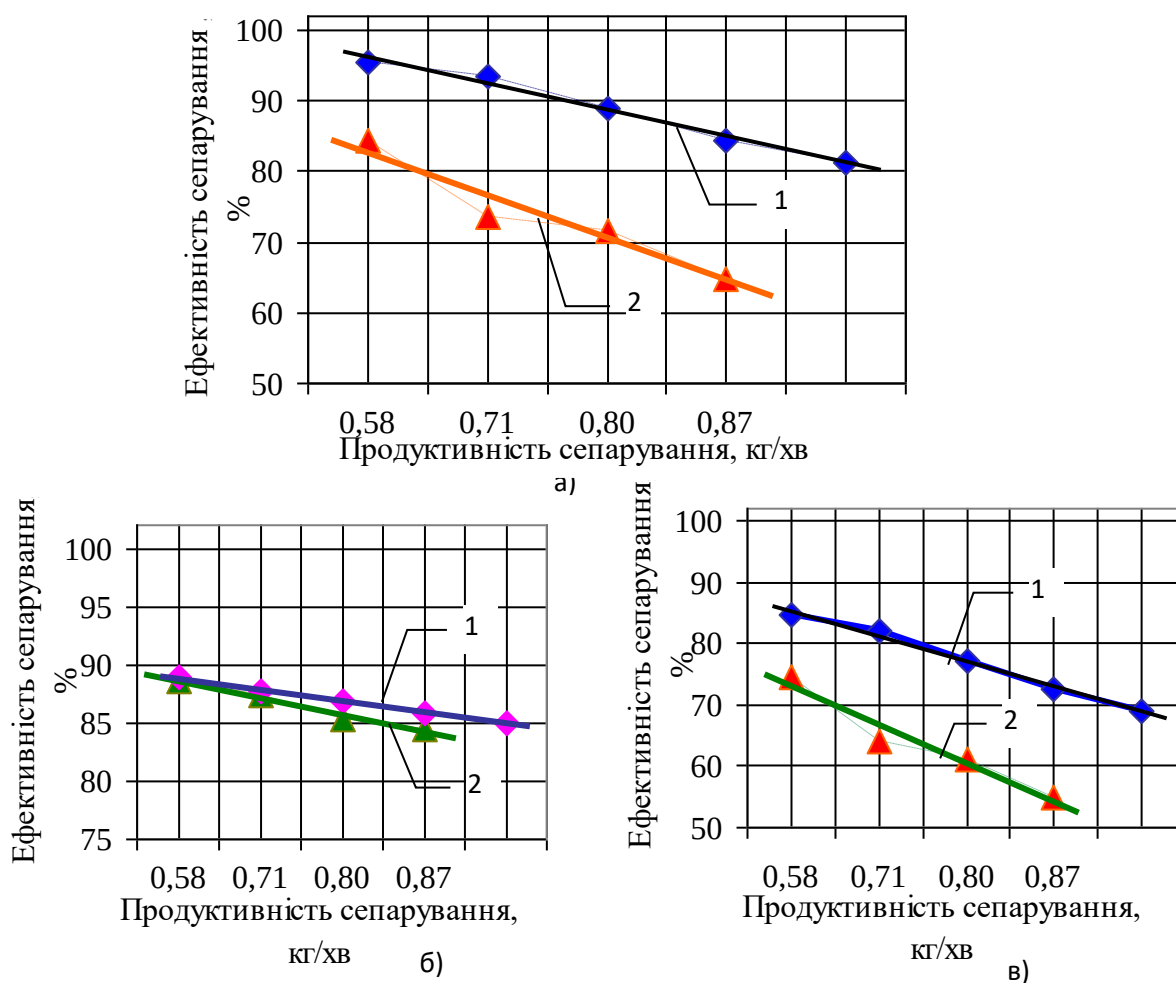


Рис. 3.3. Вплив продуктивності сепарування ЗС вологістю 28% на ефективність її подільності по а) вмісту ДМН в ЗС, б) вмісту зерна в домішках та в) узагальнений:  
1) – до оброблення ЗС; 2) – оброблення поверхні пластин ЗС

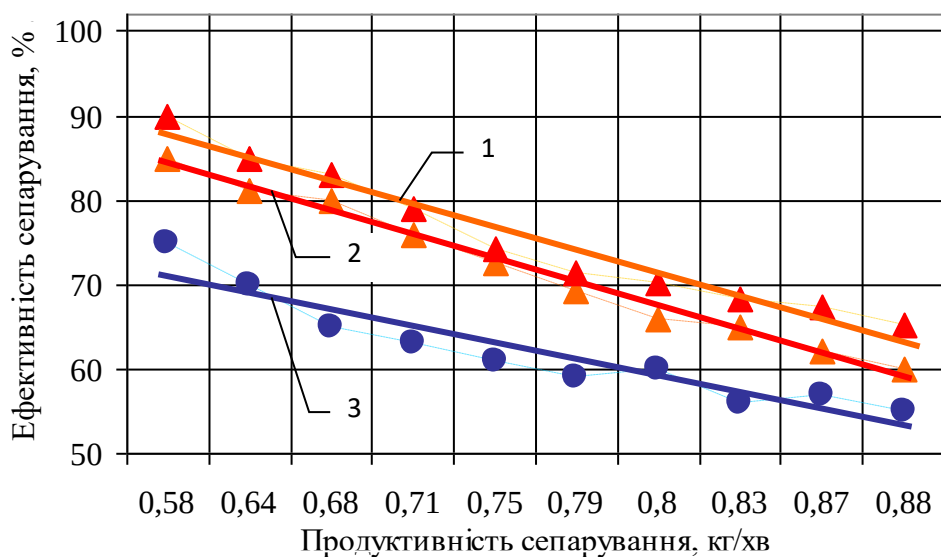


Рис. 3.4. Вплив продуктивності сепарування зерноsumіші різної вологості на його ефективність: 1) – вологість суміші  $W_0^1 = 14$  %; 2) –  $W_0^2 = 24$  %; 3) –  $W_0^3 = 28$  %.

Приймаючи до уваги значний вплив вологості зернової суміші на продуктивність та ефективність сепарування, були виконані експериментальні дослідження із підтвердження теоретичних положень щодо впливу лише поверхневих шарів частинок компонентів зернової суміші на її подільність (рис.3.4).

Подальшою групою досліджень було підтверджено теоретичні положення щодо несуттєвого впливу вологості більш віддалених від поверхневих шарів частинок зернової суміші. Оскільки продуктивність, як показник, що характеризує тривалість процесу сепарування, знаходиться в зворотній залежності від ефективності сепарування, тому, на нашу думку, доцільно застосовувати комплексний показник ефективності сепаратора, як добуток його фактичної продуктивності на фактичну узагальнену ефективність процесу сепарування. Цей показник, є індивідуальним для кожної конструкції сепаратора, є відносним показником, що характеризує ефективність процесу сепарування, та застосовується для порівняння із паспортними параметрами процесу сепарування. Результати досліджень з впливу тривалості конвективного тепло-масообміну представлено на рис. 3.5 та в табл. 3.5.

Досліди виконували у відповідності з нашими припущеннями щодо неоднакового змінення вологовмісту поверхневих шарів різних за структурно-механічними та хімічними властивостями компонентів зернової суміші при короткотривалій міжфазовій їх взаємодії з підігрітими робочими газами в рухомому шарі. Вологість біологічних домішок зернової суміші із найменшою об'ємною вагою змінюється швидше від інших.

Для рухомого шару зерна при короткотривалій міжфазовій взаємодії вологість поверхневих шарів різних компонентів, залежно від вологовмісту та параметрів тепловологообміну, може відрізнятися на 5 – 10 %. Крім змінення сипкості компонентів зернової суміші, із зміненням їх вологовмісту може змінюватися їх фізичні властивості, що впливають на ділимість суміші. Для забезпечення умов відмінності вологовмісту поверхневих шарів компонентів

зернової суміші було застосовано спосіб короткотривалого міжфазового

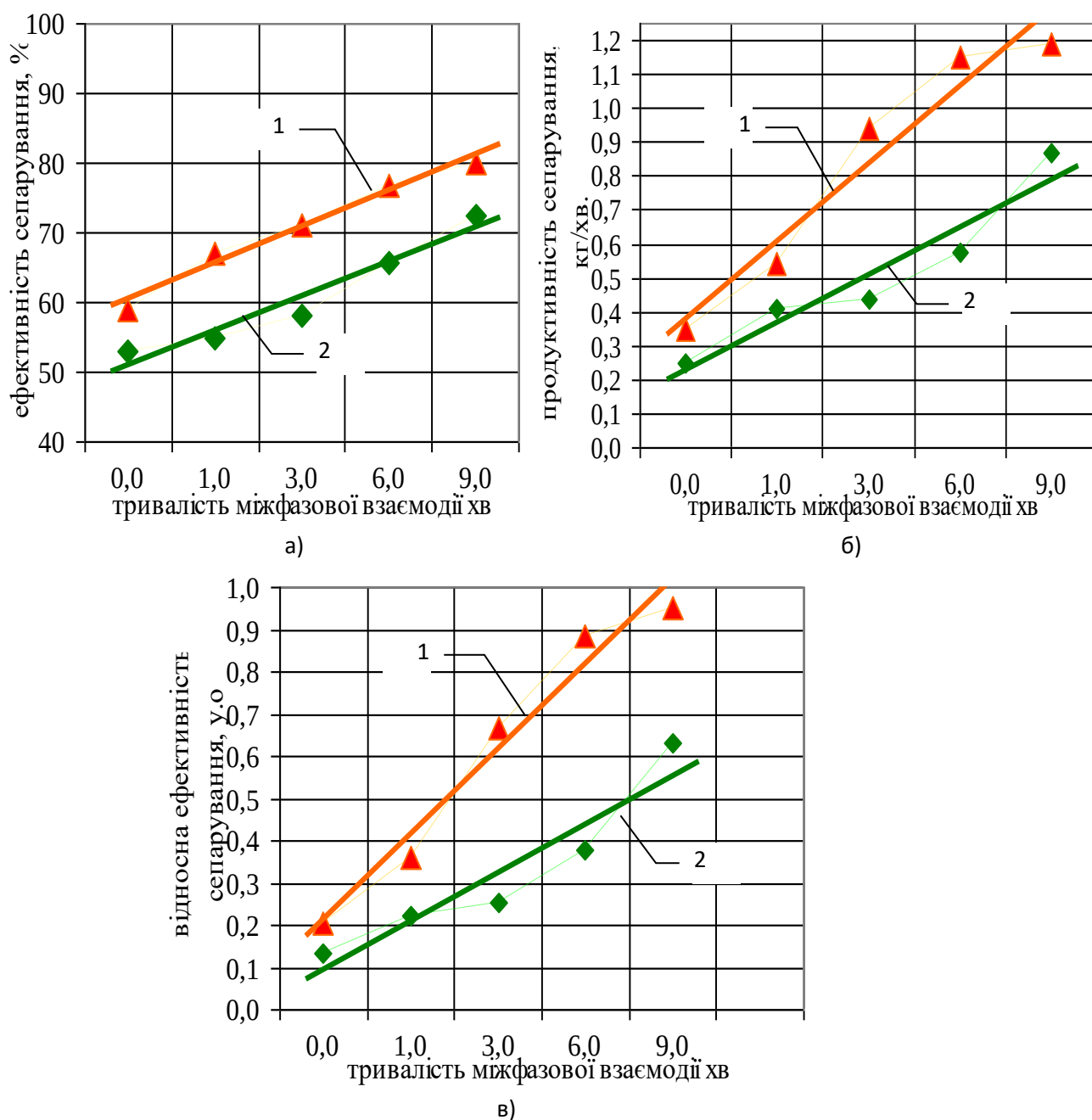


Рис. 3.5. Вплив тривалості міжфазової взаємодії на а) – ефективність сепарування, б) – продуктивність сепарування та в) – відносну ефективність сепарування: 1 – дослідний зразок ЗС; 2 – контрольний зразок ЗС.

Виходячи з вище викладеного, в дослідях залежності продуктивності ситового сепаратора від вологовмісту периферійних шарів частинок компонентів зернової суміші прийнято різну їх вологість. При підготовці зерноsumіші для її фракціонування на ситовому сепараторі, вологість ДМН

( $W_{\text{ДМН}}$ ) було прийнято рівній вологості зерна основної культури ( $W_{\text{ДМН}}^0 \approx W_{\text{зерна}}^0$ ). Зважаючи на більшу інтенсивність конвективного вологообміну ДМН (швидкість зневоднення ДМН  $\frac{\partial W_{\text{ДМН}}}{\partial \tau} = (1,4-1,6) \cdot \frac{\partial W_{\text{зерн}}}{\partial \tau}$ ), їх вологість по завершенню конвективного тепловологообміну ДМН до 2 – 3 % відрізнялася від вологості зерна:

$$(W_{\text{ДМН}}^1 \approx W_{\text{зерна}}^1 + (1-3)\%).$$

Для оцінки економічної доцільності застосування технологічного способу змінення сипкості ДМН змінням вологовмісту поверхневих шарів частинок цих компонентів приведено порівняльні розрахунки витрат енергії в фізичних та вартісних одиницях виміру, з одного боку, та прибутку зернозаготівельного підприємства від зростання ефективності очищення, збільшення продуктивності сепарування та зменшення вологовмісту ЗС – з іншого боку. Данні експериментальних та аналітичних досліджень викладено на рис.3.6. і в табл. .3.5.

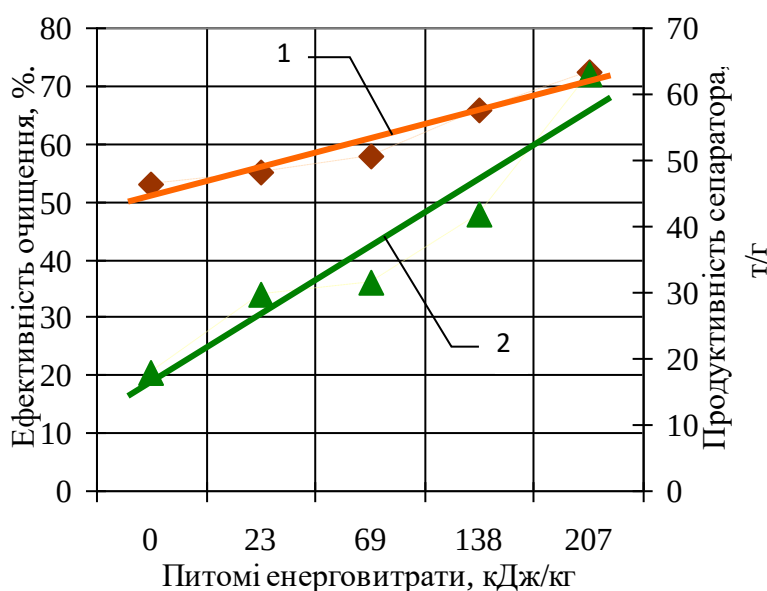


Рис. 3.6. Залежність параметрів роботи ситового сепаратора від енергії зневоднення газами поверхневих шарів частинок зерноsumіші: 1 – ефективність сепарування, %;

Таблиця 3.5.

## Вплив тривалості міжфазової взаємодії зернової суміші на показники процесу сепарування зернової суміші

| Зерно пшениці |                       |                       |                        |                        | Гази              |                      |                                          | ДМН                   |                    | Продуктивність<br>сепарування,<br>кг/хв | Ефективність<br>очищення,<br>узагальнений<br>, % | Комбіновани<br>й показник<br>еф-ті<br>сепарування,<br>у.о |
|---------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------|----------------------|------------------------------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Зразок        | W <sub>0</sub> ,<br>% | W <sub>1</sub> ,<br>% | θ <sub>0</sub> ,<br>°C | θ <sub>1</sub> ,<br>°C | швидкість,<br>м/с | температура,<br>t °C | тривалість<br>міжфазової<br>взаємодії, с | W <sub>1</sub> ,<br>% | δ <sub>0</sub> , % |                                         |                                                  |                                                           |
| 1             | 23                    | 22,4                  | 9                      | 26                     | 0,09              | 78                   | 3                                        | 22,4                  | 4,2                | 0,94                                    | 71                                               | 0,67                                                      |
| 2             | 23                    | 21,1                  | 14                     | 33                     |                   |                      | 6                                        | 21,1                  | 4,2                | 1,15                                    | 77                                               | 0,88                                                      |
| 3             | 23                    | 20,8                  | 14                     | 37                     |                   |                      | 9                                        | 20,8                  | 4,2                | 1,19                                    | 86                                               | 1,02                                                      |
| 4             | 23                    | 21,8                  | 14                     | 18                     |                   | 22                   | 9                                        | 21,8                  | 4,2                | 1,06                                    | 81                                               | 0,86                                                      |
| 1             | 32                    | 31,4                  | 7                      | 25                     | 0,09              | 75                   | 3                                        | 33                    | 5,4                | 0,43                                    | 58                                               | 0,25                                                      |
| 2             | 32                    | 29,2                  | 8                      | 33                     |                   |                      | 6                                        | 33                    | 5,4                | 0,58                                    | 66                                               | 0,38                                                      |
| 3             | 32                    | 28,1                  | 9                      | 37                     |                   |                      | 9                                        | 33                    | 5,4                | 0,87                                    | 72                                               | 0,63                                                      |

Примітки: засувка аспіраційна сепаратора – повністю відкрита, положення засувки живильного механізму – незмінне (на поділці № 10), відносна вологість повітря в приміщенні  $\varphi = 46\%$ , температура повітря  $t_0 = 18$  °С, температура зерна  $\theta_0 = 13$  °С.

### Висновки по розділу 3

1. Сипкість домішок ЗС меншої натурної маси (ДМН) більшою мірою та зерна меншою прямо пов'язана з їх вологістю. На коефіцієнт зовнішнього тертя значною мірою впливає вологість лише периферійних шарів частинок компонентів зернової суміші.
6. Для характеристики показника ефективності процесу сепарування обґрунтовано застосування комплексного коефіцієнта ефективності сепарування, як добутку поточних значень ефективності сепарування на його продуктивність
7. За результатами досліджень впливу градієнту температури на дифузію вологи з зерна було встановлено, що найбільш значущими факторами впливу на інтенсивність конвективного вологообміну зерна кукурудзи є температура та вологовміст зерна.

## РОЗДІЛ 4

### ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

#### 4.1 Критерій ефективності використання робочих газів.

На підставі виконаних експериментальних досліджень, представлених в попередньому розділі, підтверджено наявність впливу тепло-вакуумного фактору впливу на процеси внутрішньокапілярної дифузії вологи та уточнено фактори впливу. Експериментально доведено вплив защемлених газів на внутрішньокапілярну дифузію вологи при сушінні зерна. На підставі дослідних даних, отриманих на експериментальних установках та у виробничих умовах, підтверджено теоретично обґрунтовану гіпотезу дифузії вологи капілярно-шпаруватих тіл, кінетики дифузії вологи за умов між фазового тепловологообміну, причин зростання опору внутрішньої дифузії вологи та механізмів впливу.

Одночасно з цим доведено відсутність впливу градієнту температури на градієнт вологовмісту за умов конвективного та кондуктивного тепловологообміну, а також не виявлено наявності явища термодифузії в діапазоні різниць вологовмісту і температур наближених до виробничих, тобто переміщення вологи в сторону меншої температури, на чому наполягають і про що стверджують науковці до цього часу.

З огляду на вище викладене, разом з іншими експериментально встановленими залежностями тепловологообміну в умовах міжфазової взаємодії виконаних згідно програми досліджень (рис.3.1), необхідно переглянути механізм внутрішньо-капілярної дифузії вологи капілярно-шпаруватих тіл та факторів впливу на предмет практичного впровадження комбінованих енергозощаджувальних методів та режимів сушіння зерна і управління процесом сушіння.

Для уточнення швидкості течії робочих газів в кожному елементі зерносушильного агрегату і шару зерна та розрахунків втрат енергії (втрати енергії течії робочих газів) було виконано розрахунки параметрів течії газів для шахтної зерносушарки типу ДСП-32. Ці розрахунки відповідають з деяким наближенням параметрам течії газів рециркуляційної зерносушарки типу ДСП-50.

За результатами досліджень тепло-вакуумного балансу шахтної зерносушарки встановлено «вузькі» місця та розроблено напрямки модернізації технологічних та конструктивних параметрів за енергоємнісними та екологічними показниками роботи. Виявлено недостатність енергії течії робочих газів більшості із обстежених шахтних прямотечієвих зерносушарок типу ДСП і встановлено причини, зокрема в розрахунках втрат енергії течії робочих газів при пронизуванні шару зерна та особливостях принципу використання енергії течії робочих газів, що зводиться до використання енергії течії газів на подолання аеродинамічного опору шару зерна за залишковим принципом і є недостатньою для сушіння більшості зернових культур заданою ефективною швидкістю пронизування шару зерна ( $v_{\phi} = 0,42 \text{ м/с}$ ).

В залежності від сезонного коливання температури зерна  $\Theta_0$  та параметрів повітря довкілля  $t_0$  і  $d_0$  (літо, осінь, зима), загальні витрати теплоти на сушіння зерна та витрати з відпрацьованими газами можуть змінюватися в широкому діапазоні — від 90 (влітку) до 140 % (взимку) порівняно з паспортними параметрами роботи сушарки. Крім цього генераторні параметри технології сушіння додатково спричиняють втрати до 30...50 %. По сезонні витрати теплоти на випаровування 1 кг вологи із зерна пшениці в шахтних зерносушарках коливаються в середньому від 5,1 до 6,5 МДж/кг<sub>вологи</sub>, а окремих культур (кукурудза) ці затрати теплоти можуть становити 10 і більше МДж/кг<sub>вологи</sub>.

Втрати теплоти з відпрацьованими газами складають від 2,2 до 3,4 МДж/кг<sub>вологи</sub> (кукурудзи до 5 МДж/кг<sub>вологи</sub>). Крім цього, втрати з відпрацьованими газами при охолодженні зерна складають 0,4...0,7 МДж/кг<sub>вологи</sub>. Сумарно ці втрати з відпрацьованими газами перевищують затрати на сушіння зерна.

#### **4.2 Графоаналітичний метод розрахунків параметрів відпрацьованих робочих газів зерносушильного агрегату**

Для спрощеного розрахунку можливості повторного використання теплоти відпрацьованих газів, було розроблено графоаналітичний метод сутність якого зводиться до встановлення параметрів відпрацьованих газів, аналіз їх вологопоглинаючої спроможності та вибору раціонального рішення їх подальшого застосування: а) вологопоглинаюча спроможність газів менша 50% максимально можливої ( $\varepsilon_{\phi} \leq 0,5 \cdot \varepsilon_{\max s}$ ) – для подальшого повернення в топку або підмішування робочими газами; б)  $\varepsilon_{\phi} \geq 50\%$  – часткового використання по варіанту а) та частково для попереднього підігрівання зерна; в)  $\varepsilon_{\phi} \geq 95\%$  та перевищенні температури відпрацьованих газів  $(t_2 - t_0) > 10 \dots 15$  °С – змінити відповідні параметри робочих газів  $t_1$  і  $v_1$ .

Із проведених нами досліджень функціонування шахтних зерносушарок ДСП-32 восінній та зимовий період встановлено, що зі зниженням температури докілья втрати теплоти з відпрацьованими газами зростають і можуть більш ніж вдвічі перевищувати ціпоказники в теплу пору року. Вцей же період більша частка втрат теплоти через поверхню теплообмінних камер сушарки та енерговитрати на охолодження зерна.

Виробничі дослідження впливу температури та швидкості пронизування робочого агента зернового шару за показниками швидкості нагрівання й сушіння зерна, температурий вологовмісту відпрацьованих газів дозволили уточнити теплокінетичні показники швидкості і енергоємності сушіння в шахтних зерносушарках.

Таким чином, зі зменшенням швидкості робочого агента крізь шар зерна гази встигають поглинути більше вологи з поверхні зерна і втрати теплоти зменшуються. Це пояснюється двома причинами – тим, що швидкість випаровування вологи з поверхні зернини значно перевищує швидкість підведення вологи із внутрішніх шарів зернини до його поверхні.

Найменший вологовміст відпрацьованих газів встановлено після тепловологообміну в зоні охолодження, куди зерно потрапляє з найменшим

вологомістом  $u$  та із частково пересушеними периферійними шарами зерна, що обумовлює зменшення коефіцієнту дифузії вологи  $\alpha_m$ .

Для зменшення втрат енергії існують різні способи та методи. Найменш затратним є організаційні, потім технологічні, та порівняно найбільш затратними є техніко-технологічні.

### Висновки по розділу 4

1. Зі зменшення розмірів газовідвідних отворів швидкість відпрацьованого агенту сушіння зменшуються викиди у довкілля легких домішок зерна.

2. Зменшити рівень забруднення довкілля легкими домішками зерна при конвективному способі сушіння можна за рахунок зменшення вмісту цих домішок у вологому зерні, послаблення процесів відділення оболонок зернини за рахунок зменшення сил тертя їх поверхонь та підвищення енергії зв'язку оболонок з зерниною, зменшення швидкості виведення відпрацьованих газів з тепломасообмінних камер, повторним використанням відпрацьованих газів, застосування гасників швидкості потоку газів, підвищення вологопоглинаючої здатності газів (нагріванням та розрідженням), застосування комбінованих методів та режимів сушіння.

3. Для зерна крупнодисперсних культур на етапі поглиблення зони сушіння у внутрішні шари зернини слід послабити вологоємнісність шарову напруженість тіла зернини. Для цього необхідно застосувати спадні режими сушіння.

4. Прискорити міжфазовий вологообмін можна підвищенням швидкості течії робочих газів.

5. Зменшити втрати енергії та швидкості течії робочих газів у вихідному перетині зерносушильного агрегату можна збільшенням живого перетину газовідвідних каналів. Одночасно із зменшенням швидкості робочих газів зменшується частка викидів у довкілля  $ДМН$  зернової суміші.

## РОЗДІЛ 5

### ОХОРОНА ПРАЦІ

Забруднення довкілля відбувається домішками меншої натурної маси від зерна основної культури (ДМН) та продуктами спалювання енергоносіїв, а забруднення зерна – продуктами спалювання теплого та домішками. В першому випадку складність розв’язання проблеми полягає в значній складності фракціонування після збиральної зернової суміші та великих обсягах відпрацьованих робочих газів, що викидаються до довкілля після конвективного теплообміну із зерном, в другому – із способом отримання робочих газів для конвективного сушіння зерна.

#### **Аналіз умов праці на робочому місці.**

Конструктивні параметри повинні забезпечувати неперервність (задану продуктивність) процесів сушіння зерна різних культур та вологості і виключати можливість непередбачених втрат агенту сушіння. З огляду на останнє забезпечують таку товщину шару зерна з найбільшою шпаруватістю, втрати енергії течії робочих газів (ВЕТРГ) для якого перевищують опір шару зерна в сушильній камері для заданої паспортом зерносушильного агрегату швидкості течії робочих газів. Для параметрів конвективного теплообміну шахтних сушарок вітчизняних конструкцій цей шар становить близько 0,5 м. Тобто мінімально граничний рівень зерна при роботі сушарки не повинен опускатися нижче цієї межі. У шахтних зерносушарках вітчизняного виробництва висота над сушильним бункером становить 2,5 м, що спричиняє більшу матеріалоємність додаткові експлуатаційні затрати і складнощі із обслуговування.

Для запобігання можливості переповнення над сушильним бункером та просипів з нього, в верхній його частині встановлюють переливні вікна – для відведення надлишків зерна. Для ефективнішого використання теплоти згоряння, повітря із довкілля перед подачею його в змішувальну камеру слід попередньо підігрівати. Для цього використовувати теплоту відпрацьованих газів після охолоджуючих камер. Необхідно дотримувати енергетичний баланс топки.

При поверненні відпрацьованого агенту сушіння в топкове відділення необхідно слідкувати за дотриманням як заданого теплового так і вологоємнісного балансу сушильних зон, а також запобігати можливості струменю поверненого агенту сушіння перешкоджати сумішоприготуванню в камері змішування, тобто збивати напрямом факелу.

У випадках переведення охолоджувальних зон шахтних зерносушарок на сушильні, слід підвищувати потужність пальників, а місця розташування додаткових колекторів розміщати в камері змішування якомога вище із дотриманням енергетичного балансу течії робочих газів (тобто змішувати до менш потужного колектора другої зерносушильної зони).

**Організація робочого місця.** Проведено апробацію енергоощадних технологічних рішень на 5 зернозаготівельних підприємствах та модернізації зерносушильних агрегатів ДСП-32 та ДСП-50 на таких підприємствах ТОВ Байс Агро, Агрофірма Джулинка, ТОВ Агро Арам, Наша ряба (Миронівка), ФГ Україна Торговий дім Прорексім (Каховка).

Перші з трьох відмічених організаційних напрямків вдосконалення роботи зерносушарки носять дисциплінарний характер. Тобто своєчасне виконання запобіжних заходів з забезпечення паспортних параметрів роботи сушарки. Для їх реалізації необхідно своєчасно виконувати передбачені Інструкцією роботи та вживати інші заходи, що передбачені нормативною документацією та інструкціями з експлуатації й обслуговування допоміжних комплексів. Здійснення безперервного режиму роботи сушарки пов'язано з практичною складністю сформування достатніх об'ємів відносно однорідної партії зерна для безперервного завантаження прямої зерносушарки протягом тривалого часу роботи (однорідність зерна за станом вологості є обмежуючим фактором для параметрів роботи прямої сушарки, рециркуляційним – менш впливовий). Ці складнощі пов'язані з надходженням партій зерна різних культур та стану вологості, які не можна об'єднувати і спрямовувати на сушіння.

Приміщення виробничої лабораторії, де виконувались наукові дослідження, має площу 20,3 м<sup>2</sup> з висотою стелі 2,5 м. Лабораторія має сім робочих місць для проведення аналізу зразків. Аналіз умов праці показує, що на лаборанта можуть впливати такі чинники:

- температура та запиленість повітря робочої зони;
- підвищений шум під час роботи;
- фізичне перевантаження.

**Мікроклімат приміщення лабораторії.** В приміщенні лабораторії температура становить 20–22 °С, повітря відносна вологість – 65–70 %, швидкість руху повітря – не більше 0,1 м/с. На робочих місцях – освітленість 440 лк світлом люмінесцентних ламп, або розсіяним денним світлом, які відповідають вимогам нормативної документації. Обладнана лабораторія витяжною шафою, так як проводяться аналізи визначення зольності зерна та борошна. Для зберігання і підготовки зразків для аналізу виділена спеціальна кладова.

**Освітлення робочого місця.** Лабораторія забезпечена суміщеним освітленням залежно від відповідності вимог ДБН В. 2. 5-28-2006 «Природне і штучне освітлення». Місцевого освітлення світильників за своїм улаштуванням відповідають категорії та групі речовин вибухонебезпечних і влаштоване так, що працівник за бажанням може змінити напрям світлового потоку.

**Шум та вібрація.** В лабораторії рівень шуму в нормі, встановленої «Державними санітарними нормами виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку» (ДСН 3.3.6. 037-99) ГОСТ 12.1.003-83 «ССБТ. Шум. Общие требования безопасности». Безпеку вібраційну слід забезпечувати при дотриманні норм, встановлених «Державними санітарними нормами виробничої загальної та локальної вібрації» (ДСН 3. 3. 6. 039-99) та ДСТУ ГОС 12. 1. 012: 2008 «ССБТ. Вибрационная опасность. Общие требования».

### **Моделювання небезпечних ситуацій**

Небезпечні умови, це умови, при яких існує загроза дії на організм людини безпеки у виробництві. Виробничі небезпечні умови можуть виникати коли незадовільно вирішені питання безпеки праці, через недосконалий рівень організації праці, відсутності чіткої системи контролю за станом охорони праці, низьку надійність машини а їх окремих частин або робочих органів.

Ситуація небезпечна – наслідок недбалої дії працівників в небезпечних умовах. Небезпечну ситуацію можуть формувати умови небезпечні і небезпечні обставини [16].

До фізичних небезпечних виробничих факторів належать:

- рухомі механізми та машини;
- пристрої підйомно-транспортні при переміщуванні вантажів;
- елементи виробничого устаткування незахищені та рухливі (привідні та передавальні механізми тощо);
- стаціонарних драбин і площадок несправність ;
- частинки оброблюваного матеріалу та інструменту, які легко відділяються;
- струм електричний;
- температура підвищена на поверхні устаткування й оброблюваних матеріалів.

**Висновки:** Основними функціями охорони праці, є здійснення охорони здоров'я працюючих, ліквідація професійних захворювань виробничого травматизму та забезпечення умов гідних праці,.

Одним з найважливіших завдань охорони праці є забезпечення найбільш придатних умов праці, захист робітників від дії, що запобігає марним витратам їх сил, небезпечних і шкідливих виробничих факторів, сприяє покращенню продуктивності праці.

## РОЗДІЛ 6

### РОЗРАХУНОК ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Необхідні для розрахунків параметри зведемо в таблицю 6.1

Таблиця 6.1

#### Технічні характеристики сушильної камери

| Найменування параметру                                                           | кількість     | Одиниця виміру |
|----------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|
| Теплове навантаження на 1 м <sup>3</sup> зерна при нагріванні привиході на режим | 1,0 - 4,0 0,9 | кВт            |
| Електричне навантаження споживана потужність встановлена потужність              | 36 36         | кВт            |
| Швидкість сушіння від вологості 50% і більше для твердих порід (усереднена)      | 1 - 2         | мм/сут         |
| Діапазон робочих температур                                                      | 35 - 70       | оС             |
| Електроживлення обладнання сушильної камери                                      | 380/50        | В/Гц           |
| Габаритні розміри сушильної камери (внутрішні) довжина ширина висота             | 8,2 13,8/5    | м              |
| Разове завантаження зерна                                                        | 100           | м <sup>3</sup> |
| Вартість сушильної камери з вентиляторами з автоматикою                          | 1 585 000     | грн.           |

#### 6. 1 Визначення капітальних вкладень

Капітальні витрати в систему електропостачання включають такі складові елементи:

$$K = K_{\text{бор}} + K_{\text{дост}} + K_{\text{буч}} + K_{\text{сбор}} \quad (6.1)$$

$$K = 1585000 + 317000 + 31700 + 396250 = 2329950 \text{ грн.}$$

де  $K_{\text{бор}}$  - капіталовкладення на придбання обладнання;  $K_{\text{дост}}$  - капіталовкладення на доставку 20% від вартості обладнання,  $K_{\text{буч}}$  -

капіталовкладення на навчання персоналу 2% від вартості обладнання, Ксбор - капіталовкладення на складання устаткування 25% від вартості обладнання.

Результати розрахунку капітальних вкладень приведені в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2

### Результати розрахунку капіталовкладень

| Найменування параметру                      | Грн.    |
|---------------------------------------------|---------|
| Капіталовкладення на покупку устаткування   | 1585000 |
| Капіталовкладення на доставку               | 317000  |
| Капіталовкладення на навчання персоналу     | 31700   |
| Капіталовкладення на складання устаткування | 396250  |
| РАЗОМ                                       | 2329950 |

## 6. 2 Експлуатаційні витрати на сушку з урахуванням автоматизації

Додаткові капіталовкладення на автоматизацію сушильної камери складуть:  
 $\Delta K = 137000$  грн.

За формулою (5.2) визначаємо експлуатаційні витрати з урахуванням автоматизації.

Після проведення автоматизації витрати на амортизацію з формулою (5.3) складуть: 310835 грн.

Витрати на ремонт за формулою (2.4) після проведення автоматизації складуть: 125814 грн. Витрати на електроенергію зменшаться на 15% і складуть 689 602 грн.

Отже, річні експлуатаційні витрати сушки деревини після проведення автоматизації сушильної камери складуть:

$$32 = 16695000 + 310835 + 125814 + 689602 + 1164876 + 38441 + 64068 = 19050195 \text{ грн.}$$

Таблиця 6.3

**Техніко-економічні показники проекту**

| Найменування показників                                   | позначення | базовий варіант | проектний варіант | Зміни (+, -) |
|-----------------------------------------------------------|------------|-----------------|-------------------|--------------|
| 1 Капітальні вкладення, грн.                              | К          | 2329950         | 2466950           | + 137000     |
| 2 Обсяг продукції, що випускається за рік після сушки, м3 | О          | 4320            | 4770              | + 450        |
| 3 Експлуатаційні витрати, всього, грн. в тому числі:      | З          | 17641081        | 19050195          | + 1409114    |
| 3.1 амортизаційні відрахування.                           | А          | 293573          | 310835            | + 17262      |
| 3.2 заробітна плата.                                      | Ззп        | 1164876         | 1164876           | -            |
| 3.3 відрахування.                                         | Фотч       | 241836          | 241836            | -            |
| 3.4 витрати на матеріал.                                  | Зд         | 15150000        | 16695000          | + 1545000    |
| 3.5 витрати на ремонт і тех. обслуговування.              | Р          | 118827          | 125814            | + 6987       |
| 3.6 витрати на охорону праці.                             | Зот        | 38441           | 38441             | -            |
| 3.7 витрати на електроенергію                             | Зэл        | 811296          | 689602            | - 121964     |
| 3.8 інші витрати.                                         | Зпроч      | 64068           | 64068             | -            |
| 4 Собівартість 1 м3 після сушки, грн.                     | С          | 4083            | 3994              | - 89         |
| 5 Ціна 1 м3 реалізованого піломатеріалу, грн.             | Цо         | 5104            | 5104              | -            |
| 6 Балансовий прибуток, грн.                               | Пб         | 4410720         | 5294700           | + 883980     |
| 7 Рентабельність, %                                       | Рр         | 25              | 27,8              | + 2,8        |
| 8 Термін окупності, рік.                                  | То         | -               | 2,8               | -            |
| 9 Економічна ефективність                                 | Еф         | -               | 0,36              | -            |
| 10 Порівняльний економічний ефект, грн.                   | ЭТ         | -               | 2808459           | -            |
| 11 Середньорічний економічний ефект, грн.                 | ЭСР        | -               | 401208            | -            |

**6. 4 Висновки**

Підвищення автоматизації виробничих процесів по сушці зерна, дозволяє підвищити якість відпускається висушеного зерна, підвищити рентабельність виробництва на 2,8% і збільшити обсяг продукції.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Сипкість домішок ЗС меншої натурної маси (ДМН) більшою мірою та зерна меншою прямо пов'язана з їх вологістю. На коефіцієнт зовнішнього тертя значною мірою впливає вологість лише периферійних шарів частинок компонентів зернової суміші.
2. Для характеристики показника ефективності процесу сепарування обґрунтовано застосування комплексного коефіцієнта ефективності сепарування, як добутку поточних значень ефективності сепарування на його продуктивність
3. За результатами досліджень впливу градієнту температури на дифузію вологи з зерна було встановлено, що найбільш значущими факторами впливу на інтенсивність конвективного вологообміну зерна кукурудзи є температура та вологовміст зерна.
4. Теоретично обґрунтовано та описано технологічний спосіб покращення сипкості вологої зернової суміші, її фракціонування за аеродинамічною ознакою та екологічних показників технології післязбиральної підробки цієї суміші заданим зміненням вологовмісту периферійних шарів її компонентів короткостроковим міжфазовим тепловологообміном робочими газами рухомого шару зерна.
5. Обґрунтовано та наведено класифікацію смітних домішок зернової суміші за критерієм їх життєвої активності, що впливає на якісні показники тривалого зберігання зерна.

## РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИРОБНИЦТВУ

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Пунков С.П., Стародубцева О.І. - Зберігання зерна, елеваторно-складське господарство із зерносушіння - Агропромиздат, 1990. - 331 с. ;
2. Хобін В.А, Бабіков А.Ю. Дослідження систем гарантує управління екстремальними нестационарними об'єктами з обмеженнями / Зб. наук. пр. Кіровоград. держ. техн. універ. - Кіровоград, 2002. - Вип. 11. - С. 54-57;
3. Гержов А.П., Самочетов В.Ф. Зерносушіння і зерносушарки Навчальний посібник. - вид. 4 дораб. і доп. - М.: Колос, 1967. - 255 с.
4. Манасян, С.К. Моделювання і інтенсифікація процесу сушіння зерна // Механізація збирання, післязбиральної обробки і зберігання зерна: мат-ли 2-й Міжнар. наук.-практ. конференції «Хліборобська механіка в рослинництві» (м. Москва, ГНУ ВІМ, 17-18. 12. 2003р.) / Наук. тр. ВІМ. - Т.148. - М., 2003. - С.216-225.
5. Манасян, С.К. Синтез сушильної камери шахтної зерносушарки як об'єкта управління // Укр. КрасГАУ. - 2004. - № 4. - С. 151-156.
6. Цугленок, Н.В. Функціональне опису процесу сушіння зерна / Н.В. Цугленок, С.К. Манасян, Н.Н. Конусів // Укр. КрасГАУ. - 2005. - № 8. - С. 217-221.
7. Цугленок, Н.В. Імітаційна модель функціонування сушильних установок / Н.В. Цугленок, С.К. Манасян, Н.В. Демський та ін. // Вестн. КрасГАУ. - 2007. - № 3. - С. 196-200.
8. Манасян, С.К. Принципи конвективного сушіння зерна / С.К. Манасян // Укр. КрасГАУ. - 2008. - № 6. - С. 145-150.
9. Манасян, С.К. Камера зерносушарка / С.К. Манасян // Укр. КрасГАУ. - 2009. - № 2. - С. 162-166.
10. А.с. 1483218 СРСР, МКІЗ F 26 В 25/22. Спосіб сушіння зерна та пристрій для його здійснення / Н.М. Андріанов, Л.В. Колесов, С.К. Манасян, В.В. Іванов, С.Г. Гусєв, Ю.І. Заборо, Е.Ф. Гришин. - Опубл. 30.05.1989, Бюл. № 20. в інших виданнях
11. Ликов А.В. Теорія сушки М.: Енергія, 1968. - 472 с.
12. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.І. Сушіння зерна. К.: Либідь,

1997. -352с.

13. Єфремов Г.І. Узагальнені залежності для першого і другого періодів сушіння матеріалів в тонкому шарі. Тепломасобмін. МІФ-2000, Мінськ, 2000., - Т. 9, - С. 129 - 135

14. Рудобашта С.П., Кузьміна Н.В. Малигін Е.Н. Математичне моделювання та оптимізація конвективного сушіння // Теор. Основи хім. технології. 1989. -Т. 23. № 3.-С.325-330.

15. Собінов О.Г. Автоматизація управління Баштовий сушарки ТОВ "Астра" // Конструювання, виробництва та експлуатація сільськогосподарських машин. - 2011. Т.41. Частина 2.- С.237-245.

16. <http://astrawood.net/zernosushilki/>

17. [http://k-Variant.com.ua/statja\\_susch.html](http://k-Variant.com.ua/statja_susch.html)

18. [http://server.computerland.kiev.ua/thin\\_client/hp\\_neoware\\_050\\_ram\\_512mb\\_rom\\_6gb.html](http://server.computerland.kiev.ua/thin_client/hp_neoware_050_ram_512mb_rom_6gb.html)

19. <http://www.owen.ru/>

20. Малин Н.І. Енергосберегаюча сушка зерна! Малин Н.І. - М. Колос, 2004. - 238 с.

21. Андріанов Н.М. Дослідження шахтної зерносушільної і автоматичної системи управління температурой теплоносії # Автоматизація процесів післязбиральної обробки зерна: Зб. науч. тр. ЛСХІ. Л., 1985. - С. 2142.

22. Андріанов Н.М. Дослідження шахтної зерносушарки як об'єкта управління. Успіхи сучасного природознавства. 2004. № 9.-С.86-91.1. Атаназевич, В.І. Сушка зерна/В.І. Атаназевич. - Агропромиздат, 1989. - 240 с.

23. Аніскін В.А. Підвищення якості насіння способами післязбиральної і передпосівної обробки / В.І. Аніскін: Сб. науч. тр. // ВІМ.-1 987. - Т.112.- С. 3 - 20.

24. Vykov, Y.V. Combined microwaves /Y.V. Vykov, K.I. Rybakov, E. Semenov // J. Pys D: Appl. Phys. 2001.- V34.- P. 55.

25. Буянов В.А. Застосування НВЧ енергії для сушіння зерна / Буянов В.А. // Мех. і електро. с. -х. - 1982. - № 1. - С. 55-56.

26. Васильєв О.М. Використання теорії подібності для опису СВЧ сушки зерна

/ Васильєв О.М., Будніков Д.А., Смирнов Б.Г. // Електротехнології та електрообладнання всільськогосподарському виробництві: зб.науч. тр. / АЧГАА. - зерноград, 2007. - С.72-77.

27. Рідко В.І. Зерносушіння із зерносушарки / Рідко В.І., Різьбярів В.А., Уколов В.С. - М.: Колос, 1982. - 239 с.

28. Пат. 4746968 США, МПК A23L 3/54. Combined microwave and thermal drying apparatus [Text] / Wear F., Heil G., Howard F. - № 07/031354; заяв. 30.03.1987; опубл. 24.05.1988.

29. Grothaus, H.-P. Einsatz thermischer Verfahren zur Abtötung von *Phoma betae* in Zuckerrubensaatzgut unter besonderer Berücksichtigung von Mikrowellenenergie: Diss. Gottingen, 1997. - 139 p.

30. Ленкова Т. М. Ефективність СВЧ-обробки зерна / Ленкова Т., Паньков П. // Комбікорми.-2000.-№ 4. - С. 31-32.

31. Пат. 4430806 США, МПК A24B 1/00. Microwave agricultural drying and curing apparatus [Text] / Hopkins H. ; - 06/319900; заяв. 10.11.1981; опубл. 14.02.1984.

32. Nelson S.O. Determination of moisture content and bulk density of corn /

33. A.W. Kraszewski, S.O. Nelson // Transactions of the ASAE. - 1994. - Vol.58. - P. 37-44.

34. Nelson S.O. Effects of natural and added water on prediction of Moisture content and density of corn from microwave dielectric properties / S. Trabelsi, S. O. Nelson // Transactions of the «Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy». - 2010. - Vol.44. - No.2. - P. 72-80.

35. Nelson S.O. RF and microwave dielectric properties of shelled, yellow-dent field corn / S.O. Nelson // Transactions of the ASAE.-1979. - Vol.22. - No.6. - P.1451-1457.

36. Беляєв О.О. Дослідження розподілу НВЧ поля в просторі робочої камери / А.А. Беляєв, А.Л. Андержанов, С.А. Андрєєв, А. І. Соколов

37. // Електропривод та електротехнології на об'єктах АПК: зб. науч. тр. / МІСП імені В.П. Горячкіна.- М., 1989.- С. 12-20.

38. Патент України на корисності модель № 65630 Бюл. №23, 2011 р

39. Shivare U.S. Drying characteristics of corn in a microwave field with a surface - wave applicator: a thesis of doctor of philosophy U.S. Shivare. - Quebec, 1991. - 182 p.
40. Уразов М.Ю. Расчет кинетики сушки зерна кукурудзы//Хлебопродукты. – 1998. - №9. – С 14-15.
41. Уразов М.Ю. Повышение эффективности конвективной сушки зерна кукурудзы в плотном слое. Автореф. диссерт. канд. техн. наук. – М.: ВНИИЗ, 1998. – 22 с.
42. Утилизация теплов сушильных установках/Гайда С., Зыков А.В., Айда Амор//ОДУХТ: Наук. праці. Вип. 21. – Одеса. 2001. – С. 52-55.
43. Федоткин И.М. Интенсификация технологических процессов. – Киев: Вища школа, 1979. – 344 с.
44. Фейденгольц В.В., Маевская С.Л. Лабораторное оборудование для контроля качества зерна и продуктов его переработки/Редактор Б.И. Гражданкин. - М.: ЗооМедВет, 2001. - 240 с.
45. Чурсинов Ю.А. Анализ технологических решений и оборудования посушке зерновых продуктов//Хранение и перераб. зерна.-2000. №11.–С27-30.
46. Чурсинов Ю.А., Рыбчинский Р.С. Анализ работы каскадных шахтных сушилок//Хранение и перераб. зерна.-2001. №2.–С37-40.
47. Чурсинов Ю.А. Модернизация сушилки А1-ДСП-50//Хранен. и перераб. зерна. – 2001. - № 12. – С. 24-25.
48. Шашкин А.Б. Повышение эффективности использования зерносушилок. Автореф. диссерт. канд. техн. наук. Одесса, ОТИПП, 1986. – 24 с.
49. Шевцов А.А. Развитие научных основ энергосбережения в процессах сушки пищевого растительного сырья. Автореф. д-ра техн. наук. – Воронеж, ВГТА, 1999. – 40 с.
50. Станкевич Г. Багатоконтурне сушіння збіжжя в рециркуляційному режимі//Зерно і хліб. 2002, № 1. – С. 21.
51. Станкевич Г.М., Овсянникова Л.К. Розробка енергоощадної технології сушіння зерна в зерносушарках малої продуктивності//ОДАХТ: Наук. праці. Вип. 21. – Одеса, 2000. – С. 24-26.

52. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.І. Сушіння зерна: Підручник. –К.:Либідь, 1997. – 352 с.

## ДОДАТКИ