

НУБІП України

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НУБІП України

01.01 – МР.2218 «С» 2022.09.11.031 ПЗ

НУБІП України

ВІСНИК БОГДАН СЕРГІЙОВИЧ

2022 р.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
Механіко-технологічний факультет

УДК 662.65

НУБІП України

ПОГОДЖЕНО
Декан механіко-технологічного факультету

ДОПУСКАЄТЬСЯ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач кафедри
тракторів, автомобілів та біоенергоресурсів
(назва кафедри)

НУБІП України

В. Братішко
(підпис)
“ ”
2022 р.

О. Калінін Є.І.
(підпис) (ПІБ)
“ ”
2022 р.

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

НУБІП України

на тему Дослідження параметрів роботи зернової сушарки з псевдозрідженим шаром

Спеціальність: 208 «Агроінженерія»

Освітня програма: «Агроінженерія»

Орієнтація освітньої програми: освітньо-професійна

НУБІП України

Гарант освітньої програми:

Доктор технічних наук, с.н.с.

(підпис)

В.В. Братішко

НУБІП України

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи:

Кандидат технічних наук, доцент
(науковий ступінь та вчене звання)

(підпис)

Н.М. Цивенкова
(ПІБ)

Виконав

(підпис)

Б.С. Вінник

(ПІБ студента)

НУБІП України

КИЇВ 2022

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Механіко – технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

НУБІП України
(науковий ступінь/вчене звання) (підпис) (ПШБ)
« _____ » _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

ДО ВИКОНАННЯ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ СТУДЕНТУ

НУБІП України
Віннику Богдану Серетійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)
Спеціальність 208 «Агроінженерія»
(код і назва)
Освітня програма «Агроінженерія»
(назва)

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна, або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи Дослідження параметрів роботи зернової сушарки з псевдозрідженням шаром
затверджена наказом ректора НУБіП України від «21» грудня 2021 р. № 2218 «С»

Термін подання завершеної роботи на кафедру _____

(рік, місяць, число)

Вихідні дані до магістерської кваліфікаційної роботи: технічне завдання, довідникові та паспортні дані обладнання, спеціальна література, характеристики зернової маси, іонуючі технологічні процеси сушіння, статистика проблем і недоліків, що виникають в процесі сушіння зернових конвекційним способом.

Перелік питань, що підлягають дослідженню: 1. Експериментальні залежності оцінки кількісних і якісних показників роботи експериментальної сушарки з псевдозрідженням зернового шару від основних факторів, що впливають на її робочі процеси; 2. методика визначення якості зрідження зернового матеріалу; 3. раціональні технологічні режими роботи експериментальної зерносушарки; 4. конструктивно-технологічна схема та методика розрахунку параметрів роботи експериментальної зерносушарки, що виключає перегрів та зберігає технологічні властивості зерна.

Перелік графічного матеріалу Електронна презентація на 10 слайдах

Дата видачі завдання «13» листопада 2021 р.

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи _____

(підпис)

Н.М.Цивенкова

(прізвище та ініціали)

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Б.С. Вінник

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ТА ОБЛАДНАННЯ СУШІННЯ ЗЕРНА В ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ	7
1.1. Огляд та систематизація конструкцій зерносушарок з псевдозрідженим шаром	7
1.2. Технологічні режими процесу сушіння та вимоги до конструкції сушарок	11
1.3. Вплив конструкції та параметрів газорозподільних пристроїв на характеристику псевдозрідження	14
1.4. Висновки по розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНОВИХ В ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ	19
2.1. Теоретичні засади математичного моделювання процесів в псевдозрідженому шарі	19
2.2. Моделювання зміни опору шару зерна при зміні режимів псевдозрідження	22
2.3. Визначення оптимальних параметрів газорозподільної решітки для сушарок з псевдозрідженим шаром	27
2.4. Висновки по розділу 2	33
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	35
3.1. Опис експериментальної установки	35
3.2. Методика проведення експерименту	41
3.3. Вплив конструктивно-технологічних параметрів експериментальної зерносушарки на якість зрідження зернового матеріалу	50
3.4. Висновки по розділу 3	56
ВИСНОВКИ	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	59
ДОДАТКИ	64

ВСТУП

НУБІП України

Сушіння зернових є важливим етапом технологічного процесу зберігання зерна. В сучасних умовах сільськогосподарського виробництва в Україні, при існуванні великого різномайття форм власності та виробництва, важливо підлаштувати технічне забезпечення процесу сушіння до різних потреб, різних потужностей, що формуються умовами виробництва.

В умовах глобальної енергетичної кризи важливим питанням також є скорочення втрат енергії, а сушіння супроводжується значними витратами енергоносіїв. Крім цього, скорочення втрат зернових в процесі сушіння та підвищення якості кінцевого продукту є також важливою задачею сушіння.

Втрати зерна та зниження його якості часто визначаються недосконалістю технічного забезпечення, застарілістю конструкцій сушарок, відсутністю оперативного контролю температур, нерівномірністю розподілу теплових полів тощо.

В попередні періоди при конструюванні сушарок акцент ставився на інтенсифікацію процесу, укрупнення сушарок, централізацію переробки та підготовки до зберігання зернових. Сьогодні ринок має підлаштуватись під споживачів, під їх потреби. Тому створення обладнання для сушіння, яке може використовуватись на підприємствах будь-якого масштабу та забезпечувати високу якість висушеного зерна при мінімальних енерговитратах, є важливою задачею сьогодення.

Незначні обсяги вирощуваного зерна, які виробляють невеличкі сільськогосподарські та фермерські господарства, формують задачу створення недорогого малогабаритного обладнання для сушіння, що не потребує висококваліфікованого персоналу, значних капітальних витрат і великих площ.

Таке обладнання може бути розміщене на відкритому повітрі, в невеликих будівлях та ангарах, на базі автомобільних прицепів. Мобільність сушарки є суттєвою перевагою, так і окремим видом підприємництва.

Потреба в компактних, доступних по ціні сушарках визначає актуальність обраної теми.

Мета магістерської роботи – встановити оптимальні параметри газорозподільного пристрою сушарки для забезпечення якісного сушіння зернових.

Методи досліджень. При виконанні магістерської роботи використовувались теоретико-аналітичні методи для аналізу варіантів розвитку досліджень та складання алгоритму експерименту; математичні – для моделювання процесу, створення його теоретичної моделі; лабораторно-

експериментальні для підтвердження теоретичних досліджень експериментальними даними; статистичні методи обробки результатів експерименту для їх узагальнення та кореляції з теоретичними результатами досліджень, підтвердження адекватності складеної моделі.

Об'єкт дослідження: технологічний процес псевдозрідження, сушіння зерна продовольчого та насіннєвого призначення у робочій камері малогабаритної сушарки.

Предметом дослідження є закономірності процесу сушіння зерна та їх залежність від конструктивних параметрів газорозподільного пристрою, режимів роботи експериментальної сушарки із псевдозрідженням зернового шару.

Завдання роботи:

1. Систематизувати наукові напрацювання на тему сушіння зерна в псевдозрідженому шарі;

2. Обґрунтувати напрямки удосконалення конструкції зерносушарок із псевдозрідженим шаром та підбору оптимальних технологічних режимів сушіння.

3. Скласти математичну модель, яка описує зв'язок між параметрами газорозподільного пристрою та індексом псевдозрідження.

4. Провести експериментальне дослідження згідно попередньо складеному плану експерименту.

5. Підтвердити адекватність математичної моделі, зробити висновки.

Методологічні, теоретичні та інформаційні засади дослідження:

загальна методика досліджень передбачає розробку теоретичних передумов, їхню експериментальну перевірку в лабораторних та виробничих умовах, економічну оцінку результатів досліджень.

Теоретичні дослідження виконувались з використанням основних положень, законів та методів класичної механіки, фізики, математики та статистики.

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних та польових умовах на основі загальноприйнятих методик та приватних методик, а також з

використанням теорії планування багатофакторного експерименту. Основні розрахунки та обробка результатів експериментів виконувались з використанням методів статистики на EOM.

Результати досліджень пройшли апробацію в умовах науково-практичних конференцій.

Ключові слова: зерно, зерносушарка, псевдозрідений шар, технологія сушіння.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ТА ОБЛАДНАННЯ
СУШІННЯ ЗЕРНА В ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ1.1. Огляд та систематизація конструкцій зерносушарок з
псевдозрідженим шаром

Значний внесок у вивчення процесів сушіння та формування сучасної теорії сушіння внесли в свій час такі видатні вчені, як Гітцбург О.С., Смольський Б.М., Філоненко Г.К., Аузелінс А., Баумгартнер Дж., Говард П. та інші. Крім теоретичних досліджень, значний вклад в технічне забезпечення процесів сушіння та розвитку конструкцій зерносушарок внесли інженери-практики, конструктори, що займались розробкою та удосконаленням конструктивної реалізації сушарок. Такими є роботи В.И. Жидко, М.А. Жукова, В.О. Резчикова і багатьох інших.

Вільно насипаний шар зерна має достатньо високу щільність і характеризується значною кількістю контактів між зернами. Під дією різних факторів контакти між зернами можуть бути послаблені або зруйновані, що, в свою чергу, призводить до зменшення аеродинамічного опору разом із термічним опором на межі розділу фаз. Це призводить до інтенсифікації теплообміну та вологообміну.

Фактори, що впливають на щільність шару, можуть бути механічними (вібрації, струшування, перемішування) та аеродинамічними. Змінюючи характеристики факторів, можна досягти збільшення порозності шару, руйнації його структури, розрихлення, псевдооживлення або зваженого стану.

Псевдозріджений шар характеризується формальною подібністю окермих властивостей до властивостей рідин. Якщо через шар зерна пропустити повітря

під певним напором та з певною швидкістю, то він розрихлюється, а потім починає ніби «кипіти», що відрізняє стан псевдозрідження (рис. 1.3).

Гідродинамічні властивості псевдозрідженого шару описуються залежностями між швидкістю повітря і опором шару зерна. Такі залежності мають назву кривих псевдозрідження. При цьому кількість зерна на решітці має лишатись незмінною.

Важливим технічним параметром, який визначає стале псевдозрідження, є критична швидкість повітря. При такій швидкості опір шару досягає максимального значення, в подальшому знижуючись через утворення стійких каналів витікання повітря. Розвиток таких каналів припиняє процес псевдозрідження. Це спостереження дозволяє стверджувати, що на початку псевдозрідження утворюється певна перехідна зона, характерними ознаками якої є неоднорідність шару і, відповідно, нерівномірність «кипіння».

У випадку, коли в сушарці відсутнє примусове перемішування щерна за допомогою механічних впливів, сушіння може бути реалізоване тільки при інтенсивному перемішуванні шару та кипінні, бо якість та інтенсивність сушіння визначається рівномірністю псевдозрідження. В такому режимі кожна зернина рівномірно охоплюється агентом сушіння, наприклад, повітрям. Інтенсивне перемішування сприяє контактуванню зернин з агентом сушіння, через що температура в шарі вирівнюється.

Псевдозріджений шар має певні властивості, які визначають його використання для сушіння насипних матеріалів. Наприклад, плинність, що дозволяє виконувати сушіння з односчним транспортуванням зерна вздовж технологічного обладнання, від місця завантаження до вивантаження. При цьому переміщення зерна буде відбуватись у будь-якому випадку, тобто якщо ніяк його не організувати, зерно все одно буде зміщуватись. Якщо це непотрібно, необхідно вжити конструктивних заходів для запобігання зміщенню зерна. З іншого боку, якщо організувати його переміщення в потрібному напрямку із передбачуваною швидкістю, це дозволить зекономити енергію на транспортування.

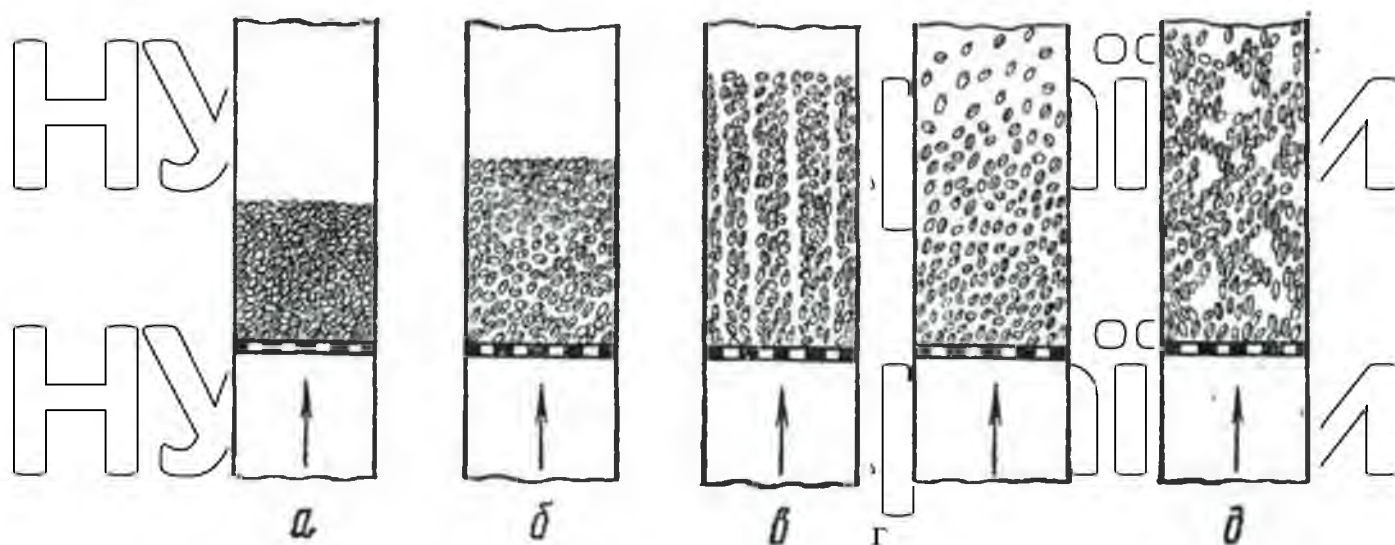


Рис. 1.1. Візуалізація структури шару зерна в залежності від етапу розвитку псевдозрідження

а – щільний шар; б – розрихлений шар; в – стан шару з ознаками псевдозрідження; г – перша стадія псевдозрідження; д – псевдозрідження в стадії вихрового кипіння.

За конструктивними відмінностями можна розділити сушарки з псевдозрідженим шаром наступним чином: однокамерні (рис.1.2., г), багатоканерні (рис. 1.2., ж); ступінчасто-протиточні (рис.1.2., а); багатоярусні (рис.1.2., і); обладнані пневможолобами (рис.1.2., з); з фонтануючим шаром (рис.1.2., е); із падаючим шаром (рис.1.2., б); з режимом пневмотранспортування (рис.1.2., в); з вібраерозрідженням (рис.1.2., д).

Аналізуючи існуючі конструкції сушарок із псевдозрідженим шаром, що реалізують конвективний принцип сушіння, можна зробити наступні висновки:

- сушіння в нерухомому шарі із тісним контактом між зернинами малопродуктивне, натомість перемішування матеріалу та збільшення площі контакту зернини із сушільним агентом дозволяє використовувати агент сушіння з більш високою початковою температурою;

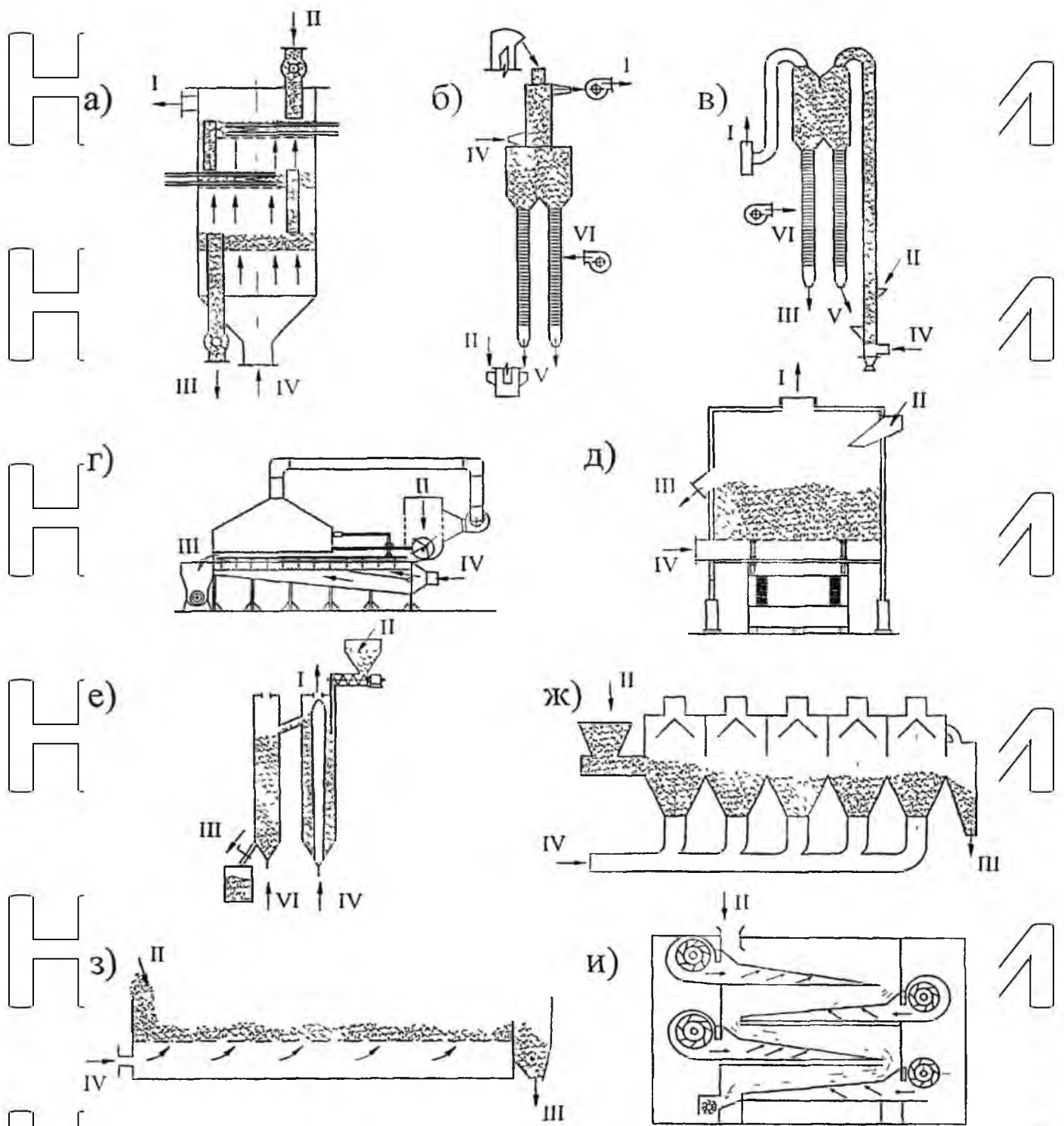


Рис. 1.2. Аналіз конструкцій сушарок із псевдозрідженими херноним шаром

I — відпрацьований агент сушіння; II — сире зерно; III — сухе зерно; IV

— агент сушіння; V — зерно, що рециркулює; VI — зовнішнє повітря

- коефіцієнти тепловіддачі від зерна до сушильного агенту приблизно однакові для різних видів сушіння, однак за рахунок перемішування покращується рівномірність розподілу тепла в агенті та збільшується площа активної поверхні, що підвищує швидкість теплопередачі;

- різниця тиску для сушильного агенту менша для конструкцій із псевдозрідженим шаром,

- псевдозрідження дає додаткові можливості очищення зерна від легких та дрібних домішок;

- плинність псевдозрідженого шару дозволяє сумішувати транспортування зерна із сушінням;

- відсутність пристроїв для механічного перемішування дозволяє отримати максимально просту конструкцію сушарки.

1.2. Технологічні режими процесу сушіння та вимоги до конструкції сушарок

Температура та відносна вологість зовнішнього повітря не мають прямого впливу на процес сушіння зерна в зерносушарці, але оскільки ці характеристики впливають на енергетичні витрати на підготовку сушильного агента, а також на охолодження зерна в зоні охолодження, ці параметри також мають значення. Чим нижча температура повітря на вході, тим більші втрати теплоти в навколишнє середовище.

Температура сушильного агента визначає інтенсивність нагрівання зерна, швидкість виділення вологи, інтенсивність теплообміну. З іншого боку, максимальне значення температури сушіння визначається вимогами до якості зерна, умовами його зберігання. Відносна вологість сушильного агента в сушках шахтного типу коливається незначно й становить $60\% \pm 2\%$. Така зміна вологості не впливає на процес сушіння і нею можна знехтувати.

Температура та вологість відпрацьованого сушильного агента є показниками динаміки процесу сушіння і важливими показниками його

закінчення. Наближення температури сушильного агента до температури зерна свідчить про підвищення використання теплоти, зниження вологості відпрацьованого агента – про закінчення процесу сушіння.

Початкова вологість зерна не впливає на процес сушіння, тільки на його тривалість. Але й визначає вибір температурних режимів сушіння для забезпечення якості кінцевого продукту. Вологість зерна на виході задається умовами зберігання та переробки.

Чим вища температура зерна на вході в сушарку, тим менші енерговитрати, тим менше часу витрачається на його попередній нагрів. Відповідно, витрати енергії на весь процес сушіння знижуються. Процес сушіння відбувається при більших значеннях середньої температури циклу, що підвищує коефіцієнт дифузії вологи в зерні і збільшення середньої швидкості сушіння.

Визначальним параметром (режимом) сушіння є максимальна температура нагріву зернин, яка визначається якістю кінцевого продукту. Використання найбільших допустимих значень забезпечує максимальну інтенсивність та найбільшу швидкість сушіння. Однак при цьому надважливим є чіткий контроль за температурою, бо при максимальних її значеннях можливе локальне або загальне перевищення в межах вимірювальної похибки, яке позначиться критично на якості підсушеного зерна.

При сушіння зерна в шарі інтенсивність сушіння тим більша, чим менший шар h , яким насипано зерно на робочих поверхнях сушарки.

Однак мінімальний шар зерна обмежений умовами переміщення зернових потоків в зерносушарках шахтного типу і має складати не менше 200 мм.

В залежності від вибору технологічного обладнання, має значення час витримки зерна в підігрітому стані. Цей режимний параметр впливає на вибір максимальної температури підігріву робочого матеріалу (зерна). Температуру слід вибирати в залежності від виду зернових, з урахуванням їх складу та змін на рівні біохімічного складу, що визначаються ступінню денатурації білка. Вимоги до температурних режимів більш строгі для насінневого матеріалу. Наприклад, з підвищенням температури зерна на 10°C , за умови постійної

вологості, швидкість денатурації збільшується в 3-4 рази, з підвищенням вологості при постійній температурі також підвищується, причому підвищення вологості на 2...3% підвищує швидкість денатурації так само, як і підвищення температури на 10°C.

Оскільки денатурація сильно впливає на якість кінцевого продукту, контроль за цими процесами є надзвичайно важливим через точне регулювання температури та швидкості сушіння.

Граничну температуру встановлюють в залежності від призначення зерна, з підвищенням вологості зерна і часу витримування в нагрітому стані допустима температура має бути знижена. Оскільки ця тема добре розкрита в джерелах [], а дана робота присвячена конструктивній реалізації процесу сушіння, будемо вважати режими сушіння встановленими заздалегідь і такими, що задаються при початку сушіння.

Крім перерахованого, надзвичайно важлива максимальна температура сушильного агента. Максимальна температура нагрівання зерна пов'язана з його вологістю, тому зависока температура сушильного агента може створити ефект парення або загартування зернини. Парення спостерігається частіше у випадку, коли дуже вологе зерно з низькою початковою температурою охоплюється сушильним агентом високої температури. Тоді на поверхні зернини конденсується швидко випарувана волога, сприяючи додатковому нагріванню зерна. Через це зерно ще більше зволожується і нагрівається. Також парення може відбутись при високій вологості сушильного агента.

В сушарках шахтного типу для боротьби із паренням використовують змінну товщину шару: зверху найменшу із високою швидкістю сушильного агента. Товщина зерна порядку 100 мм виключає парення, про що свідчить практичний досвід сушіння.

Загартування зерна характеризується втратою здатності верхнього шару зернини пропускати внутрішню вологу назовні. Це спостерігається при сушінні свіжозбираного зерна. Загартування пов'язане із різким висушуванням оболочки.

Для запобігання загартування рекомендовано використовувати агент сушіння з нижчою температурою.

1.3 Вплив конструкції та параметрів газорозподільних пристроїв на характеристику псевдозрідження

У роботах [2, 16, 22, 24, 27, 31] досліджувалося як саме введення сушильного агента в киплячий шар може впливати на псевдозрідження. В роботі [37] представлена візуалізація кількісного досліду, який демонструє як форма отвору для введення сушильного агента в шар зерна впливає на характеристику псевдозрідження. Було використано кварцевий пісок для імітації псевдозрідження. Для охоплення різних форм, ємності, в яких проводились досліди, мали циліндричну та конічну форми.

В якості газорозподільного пристрою було використано плити з отворами різного діаметру та розташування. Для конічної ємності додатково досліджувалось підведення сушильного агента до різних зон ємності (рис. 1.6).

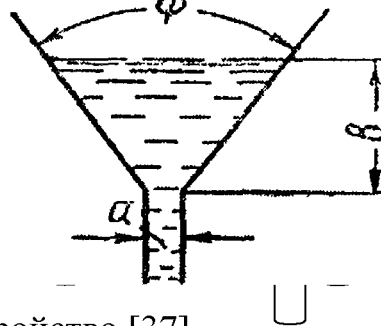


Рис. 1.6. Коническое устройство [37]

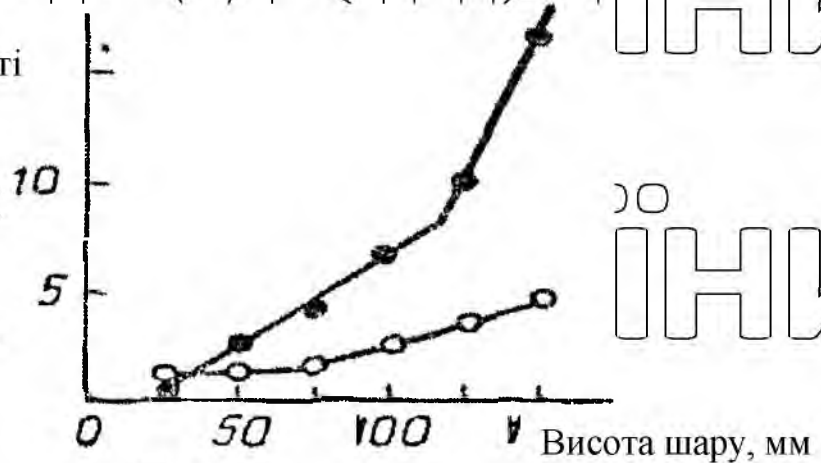
a – вхідний канал для підведення повітря; b – товщина шару матеріалу

Оскільки матеріалом досліду є пісок з середнім розміром зернини $D_p = 0,043$ мм, з урахуванням усіх вихідних даних, представлено порівняння циліндричної та конічної ємності подано на рис. 1.7.

Вплив газорозподільного пристрою вивчався також згідно [28]. Метод дослідження полягав у поглинанні рентгенівських променів. Цей метод більш точний, ніж метод коливання тиску. Результати цього методу заслуговують на

увагу, так як поглинання X-променів безпосередньо дозволяє визначати щільності, що в кінцевому рахунку і потрібно.

Індекс однорідності



• – циліндрична ємність, $D = 50$ мм; ○ – конічна ємність, $D = 50$ мм

Рис. 1.7. Оцінка впливу форми ємності на однорідність псевдозрідження

[37].

В експерименті задіяні три форми перфорації газорозподільних пластин, представлені на рис. 1.8. Криві індекса псевдозрідження наведені на рис. 1.9.

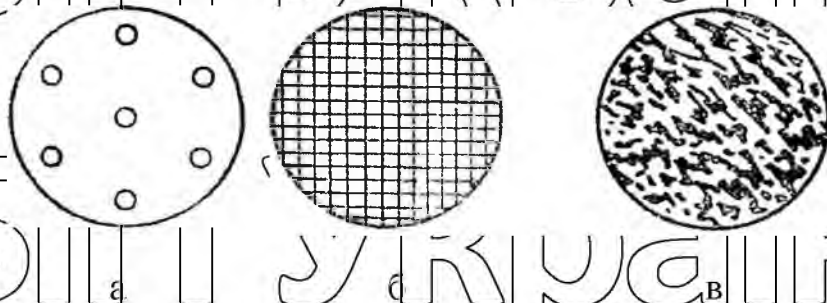


Рис. 1.8. Типи газорозподільних пластин: а – пластина сталева товщиною

1,6 мм з поодинокими отворами діаметром 1,32 мм на кожні 6,45 см² площі; б – сітка з клітинками 0,046 мм на плиті товщиною 0,43 мм; в – плита з пористого композитного матеріалу товщиною 3,2 мм і усередненими розмірами пор 0,02 мм.

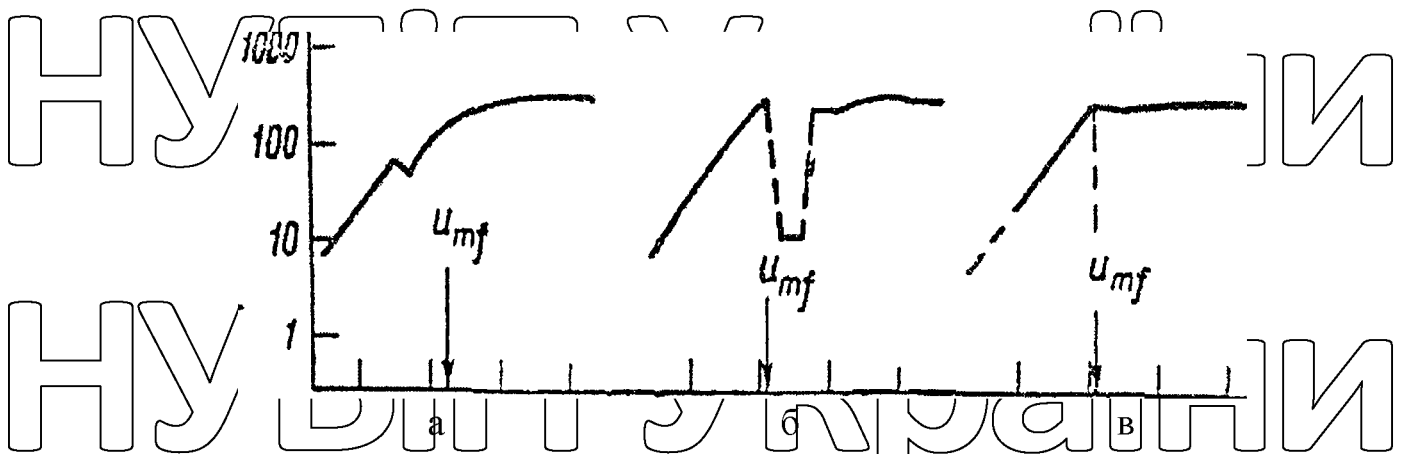


Рис. 1.9. Вплив характеру отворів решітки газорозподільного пристрою на швидкість псевдозрідження: а – пластина сталева товщиною 1,6 мм з поодинокими отворами діаметром 1,32 мм на кожні 6,45 см² площі; б – сітка з клітинками 0,046 мм на плиті товщиною 0,43 мм; в – плита з пористої композитного матеріалу товщиною 3,2 мм і усередненими розмірами пор 0,02 мм. [28]

Для перфорованої плити точка початку зрідження нечіткі. Поступове зростання перепаду тиску до теоретично необхідної величини говорить про те, що нижні частини шару не зріджені так, як верхні. При застосуванні сітки відбувається значне каналотворення. При застосуванні пористої плити точка початку псевдозрідження виражена яскраво, і тенденції до каналотворення не спостерігається. Зважаючи на таку велику роль газорозподільника слід очікувати його вплив і на розширення шару.

При інших газорозподільних пристроях щільність нерівномірна по шару.

Для перфорованої плити при низьких швидкостях газу шари, що знаходяться біля дна, не розширені, а значить і не зріджені.

Розподільний пристрій у вигляді сітки за своєю дією нагадує перфоровану плиту. У цьому випадку відбувається значне каналотворення у нижній частині шару.

1.4. Висновки по розділу 1

При заданому типі сушіння найбільший вплив на якість сушіння здійснює однорідність зрідження зерна. Момент, коли зерновий шар переходить у псевдозріджений стан, залежить від геометричних розмірів решітки, на якій відбувається псевдозрідження. Зазвичай повітря підводиться до шару зерна через отвори з малим діаметром, при чому кількість таких отворів порівняно невелика. Тому швидкість повітря біля країв отвору відносно велика, а потім вона спадає із віддаленням від отвору. В цьому випадку зрідження відбудеться в обмеженому просторі, що буде мати форму перевернутого зрізаного конуса. Частина зерна буде переміщуватись у верхній шар, при цьому псевдоканальці між зернинами будуть об'єднуватись допоки не утворять більші каналці. Тоді тиск різко впаде, а повітря почне рухатись по каналу, що утворився.

Тут слід зазначити, що такі канали не утворюються у високих шарах. У цьому випадку верхня частина шару зерна буде зрідка задовільно, а нижня також буде прорізана каналами, що призведе до нерівномірного і більш інтенсивного нагрівання зерна біля газорозподільника.

При цьому необхідно врахувати, що внаслідок інтенсивного теплообміну зерно нагрівається до гранично допустимої температури 55...60°С вже за 50 – 200 сек, залежно від температури агента сушіння.

Зерновий шар має значення відношення густини матеріалу ρ_m до густини середовища більше одиниці. Такі матеріали особливо схильні до каналутворення. Тому вибір типу газорозподільного пристрою та обґрунтування його параметрів має суттєве практичне значення.

Поки що немає кореляції для розрахунку неоднорідності. Ще немає можливості кількісно врахувати всі впливи, що відзначалися вище. Завдання тим більше складне, тому що важливо знати прорив повітря на різних рівнях шару, розмір бульбашок, мати відомості про зміну в них повітря, знати інтенсивність переміщення матеріалу в шарі та подібні до них деталі.

Тому необхідне проведення докладних досліджень неоднорідності псевдозрідження.

В результаті проведеного аналізу конструкції сушарок конвективної дії з псевдозрідженим зерновим шаром, а також теоретичних досліджень у цій галузі були виявлені недоліки псевдозрідженого шару:

1. Нерівномірність часу перебування в псевдозрідженому шарі частинок твердої фази та порцій зріджувального агента.

2. Значний гідравлічний опір високих псевдозріджених шарів та газорозподільних ґрат, що призводить до погіршення міжфазного контакту при інтенсивному барботажі великих бульбашок та каналоутворенні.

3. Незадовільні параметри газорозподільних решіток, що призводить до неоднорідності псевдозрідженого шару та утруднення з псевдозрідженням при малих швидкостях фільтрації, близьких до межі стійкості;

4. Стирання корпусу апарату та зернового матеріалу.

Це все робить удосконалення конструкції газорозподільного апарату сушарки із псевдозрідженим шаром дуже актуальним.

РОЗДІЛ 2

НАУБІП УКРАЇНИ

АНАЛІЗ ТА МОДЕЛЮВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ОБЛАДНАННЯ І ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ СУШННЯ ЗЕРНОВИХ В ПСЕВДОЗРІДЖЕНОМУ ШАРІ

2.1. Теоретичні засади математичного моделювання процесів в псевдозрідженому шарі

Візуальні спостереження та кількісні вимірювання локальних параметрів показують, що псевдозріджений шар зважених зерен безперервно пульсує; він неоднорідний у просторі та нестационарний у часі. Можна виділити кілька типів цієї неоднорідності. Локальна порізність не залишається постійною через безперервний рух частинок, що входять і виходять за межі представницького обсягу і змінюють взаємну конфігурацію. Також можливі і великомасштабні коливання шару в цілому, що визначаються розмірами та геометрією всього апарату. Безперервні випадкові зовнішні обурення від газових струменів, що вриваються через газорозподільну решітку, впливають на резонансні частоти коливань всього шару.

Дані експериментальних спостережень та теоретичні праці різних авторів, що описують рух частинок твердої фази, що визначає структуру псевдозрідженого шару, дозволяють виділити основні параметри: частоту коливань ω і амплітуду коливань шару A .

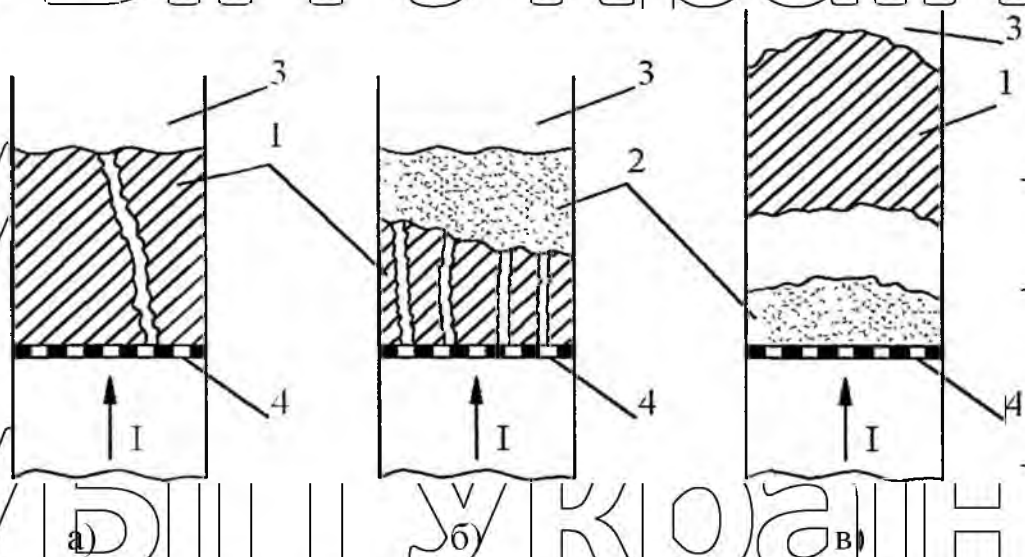
У цій роботі розглядається модель структури киплячого шару, що дозволяє пояснити природу виникнення коливань шару та визначити вплив геометричних параметрів газорозподільного пристрою та апарату в цілому на ω та A , а також на якість зрідження зернового матеріалу.

Загальноприйнятої моделі структури киплячого шару нині немає. Пропоновані різні моделі зазвичай виходять з тієї чи іншої особливості киплячого шару, найбільш істотною для даного явища, що досліджується.

Розглянемо модель з погляду впливу якості зрідження зернового матеріалу та його теплообмін із зріджуючим агентом, тобто якість сушіння.

Для інтенсифікації сушіння за рахунок створення максимально можливої нестационарності процесу руху частинок твердої фази необхідно визначити вплив параметрів шару та апарату на ступінь однорідності зрідження матеріалу, отже, тим одноріднішим буде киплячий шар, без каналотворення та поршневого режиму (рис. 2.1), тим якісніший та економічніший процес сушіння.

Найбільш специфічна риса киплячого шару – наявність внутрішніх пульсацій із періодом $T = 1/\nu$, с. Величина T визначає як циркуляційні потоки зерна, коливання решти характеристик киплячого шару – локальної пористості і тиску, загальної втрати напору, висоти шару, коефіцієнтів теплообміну тощо. Необхідно відзначити, що оскільки в процесі коливання змінюється і внутрішня структура, і загальна висота шару, то частота не може бути суворо фіксованою і йдеться про деякий інтервал ν , що відповідає максимуму спектральної щільності коливань, що відбуваються.



а – наскрізне утворення каналців; б – внутрішнє утворення каналців в нижньому шарі зерна; в – розшарування повітряним поршнем; 1 – щільний шар; 2 – киплячий шар; 3 – стінки робочого простору; 4 – газорозподільна решітка; I – напрямок руху теплоносія (сушильного агента)

Рис. 2.1. Нестадійні псевдозріджені шари

Розглянемо схематизовану одновимірну задачу (рис. 2.2), коли всі величини залежать тільки від вертикальної координати h та часу t . У стані рівноваги видаткова швидкість повітря \dot{y} і об'ємна концентрація зерна $\sigma = Y - m$ постійні по всій висоті зваженого шару $0 < h < H_0$, а сам шар зерна в середньому нерухомий. При цьому об'ємна сила, що зважує, з боку потоку $\Delta P/l$ дорівнює вазі зерна в одиниці об'єму $(\rho_m - \rho)g$. Відхилення об'ємної густини шару від положення рівноваги позначимо через y . Відхилення вниз вважатимемо позитивним, нагору негативним. У положенні рівноваги шар врівноважується силою зважуючої повітряного потоку ΔP .

Припустимо, що сила, яка прагне відновити шар зерна в положення рівноваги пропорційна відхилення, тобто дорівнює $(-Ky)$, де K - константа, яку назовемо пружністю псевдозрідженого шару.

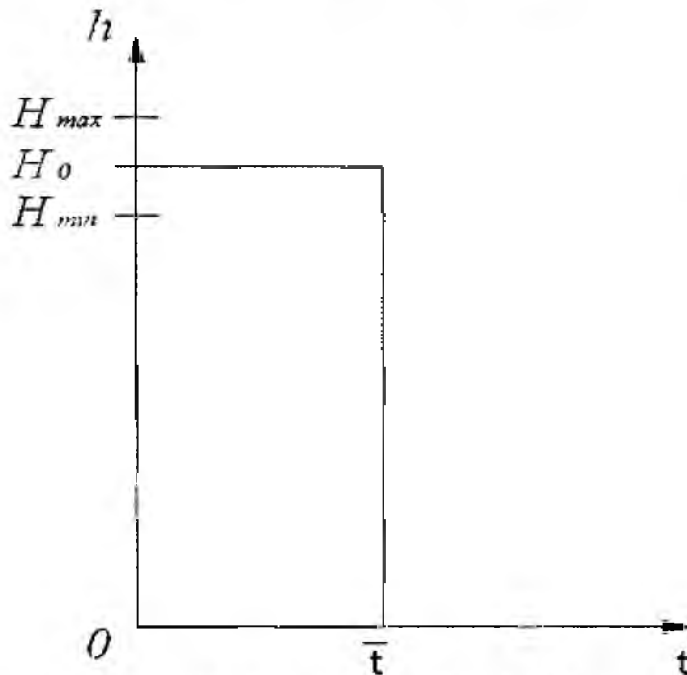


Рис. 2.2) Характер залежності зміни щільності по висоті шару псевдозрідженого зерна

При моделюванні будемо спиратись на те, що сила, що зріджує шар і спрямована всередину шару, пропорційна відхиленню.

2.2. Моделювання зміни опору шару зерна при зміні режимів псевдозрідження

Розширення шару перешкоджає сила опору, спрямована в бік, протилежну напрямку розширення, і пропорційна швидкості руху верхнього рівня шару щодо газорозподільного решета, тобто:

$$-D = -\lambda \frac{dy}{dt} \quad (2.1)$$

Такою силою є об'ємна вага шару і його опір повітряному потоку.

Напишемо диференціальне рівняння руху поверхні шару. На основі закону Ньютона маємо:

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = -ky - \lambda \frac{dy}{dt} \quad (2.2)$$

де k і λ – позитивні константи.

Таким чином, ми отримаємо лінійне однорідне диференційне рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами.

Нижня точка шару в свою чергу здійснює вертикальний рух від випадкових зовнішніх обурень газових струменів, що вливаються через газорозподільні грати:

$$m \frac{d^2y}{dt^2} = -k \frac{dy}{dz} - \lambda \frac{dy}{dt} \quad (2.3)$$

звідки:

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + k \frac{dy}{dz} + \lambda \frac{dy}{dt} = 0 \quad (2.4)$$

Таким чином, отримаємо рівняння зміни об'ємної густини η :

$$\frac{d^2\eta}{dt^2} + \frac{k}{m} \frac{d\eta}{dz} + \frac{\lambda}{m} \frac{d\eta}{dt} = 0 \quad (2.5)$$

При виникненні на рівні решітки періодичних коливань густини з круговою частотою ω та амплітудою A_0 :

$$\eta(0, t) = A_0 \exp(i\omega t) \quad (2.6)$$

Весь шар в цілому прийде в коливальний рух з тією ж частотою:

$$\eta(z, t) = A(z) \exp(i\omega t) \quad (2.7)$$

Підставляючи 2.7 в 2.5, отримуємо диференціальне рівняння для зміни амплітуди коливань щільності по висоті шару:

$$-\omega^2 A + i\omega \frac{k}{m} \cdot A + \frac{\lambda}{m} \cdot \frac{dA}{dz} = 0, \quad (2.8)$$

рішення якого має вигляд:

$$A(z) = A_0 \exp\left(\frac{\omega^2 z m}{\lambda}\right) \exp\left(-\frac{i\omega k z}{\lambda}\right). \quad (2.9)$$

Таким чином, амплітуда виниклих коливань щільності експоненційно зростає з висотою. За законами, аналогічними 2.9, але з відповідними

зрушеннями по фазі, змінюються з висотою швидкості окремих зерен $v(z,t)$ і пульсації локальних перепадів тиску $\Delta p/l$.

Механічна система матиме певну частоту власних коливань ω з наявності двох властивостей: пружності, що прагне повертати систему в певне положення рівноваги та інерції, щоб, дійшовши до рівноважного становища та набуваючи певної швидкості, вона не зупинялася, а проходила це положення.

Псевдозріджений шар має обидві ці властивості.

При певному режимі дуття з витратною швидкістю u зерна розходяться один від одного і об'ємна щільність зернистої фази набуває такого середнього

значення σ , що сили тертя потоку врівноважують вагу зерна. Якщо при цьому

від зовнішнього впливу шар випадково стиснеться і σ стане більше σ , то швидкість потоку в проміжках між зернами зростає, сили тертя потоку стануть більше ваги шару і він почне розширюватися. Коли при розширенні шару σ стане

менше σ , то швидкість потоку в збільшених проміжках між зернами впаде, сили

тертя стануть меншими за масу і шар почне стискатися. Таким чином, різниця

між зваженої зерна силою тертя і вагою шару є квазіпружкою силою, що прагне в обох випадках повернути шар у вихідний рівноважний стан із середньою щільністю σ , що залежить від витратної швидкості u .

Повертаючись у положення рівноваги, зерна розганяються, набувають

кінетичну енергію і шар проскакує це положення рівноваги, як при коливаннях маятника на полі земного тяжіння.

Продовжуючи цю аналогію, слід зазначити, що амплітуда коливань точок маятника зростає з віддаленням їхню відмінність від точки підвісу. Подібна властивість псевдозрідженого шару підтверджується співвідношенням 2.9. З нього випливає, що амплітуда коливань щільності шару зростає догори по мірі віддалення від газорозподільних ґрат, де ці коливання виникають при хаотичному русі струмків повітря, що входять у шар, і залежить від амплітуди цих збурень A_0 .

З 2.9 випливає, що коливання загального рівня шару H відбуватимуться з тією самою частотою ω . Для рівноважного стану шару з висотою H_0 виконується

співвідношення:

$$\int_0^{H_0} \sigma dz = \int_0^{H_0} \sigma dz = \sigma H_0. \quad (2.10)$$

При виникненні пульсацій висота шару $H = H_0 + \Delta H$ буде змінюватися, але загальна маса зерна у кожний момент часу залишається незмінною, тобто:

$$\sigma H_0 = \int_0^H \sigma dz = \int_0^H \sigma dz + \int_0^{H_0} \eta dz + \int_0^H \eta dz. \quad (2.11)$$

Перехід нерухомого шару зерна в псевдозріджений стан ускладнений неправильними параметрами газорозподільної сітки. Зазвичай повітряний потік підводиться до шару зерна через невелику кількість решітки отворів з малим живим перерізом. Тому поблизу отворів швидкість окремих струмків повітря не встигає вирівнятися по всьому перерізу решітки і швидкість над отвором більше середньої. Виходячи з цього, щоб досягти задовільного псевдозрідження, необхідний перепад тиску в нижній частині шару більший, ніж у верхній. В іншому випадку псевдозрідження відбудеться лише у вузькому конусі. В іншому випадку псевдозрідження відбудеться лише у вузькому конусі. Відразу ж після цього, зерна з центральної зони конуса будуть викинуті вгору на поверхню шару, утворюючи там бугор, і тоді тиск різко впаде, так як повітря вільно проходитиме по каналу, що утворився. Таким чином, станеться викид деякої частини зерна та утворення каналу, а не псевдозрідження всього шару. Тут слід зазначити, що такі канали не утворюються у високих шарах. В цьому випадку верхня частина шару зерна буде зрідка задовільно, а нижня – буде прорізана каналами, що призведе

до нерівномірного і більш інтенсивного нагрівання зерна біля газорозподільної решітки. При цьому необхідно врахувати, що внаслідок інтенсивного теплообміну зерно нагрівається до гранично допустимої температури 55...60° С вже за 50 – 200 с, залежно від температури агента сушіння [15]. У нашому випадку, при підсушуванні зернового вороху та зниженні вологості зерна на 3-4% цього часу буде достатньо.

Деякими дослідженнями встановлено, що для отримання задовільної рівномірності розподілу повітряного потоку розмір зерен матеріалу, що вживається для виготовлення газорозподільного вхідного пристрої, повинен становити близько 1/10 діаметра "киплячих" частинок [44]. Ми вважаємо, що в нашому випадку при зрідженні зернового матеріалу ця умова є надмірним, оскільки зерно надходить відразу після комбайнної прибирання, мати високу вологість та засміченість. Ми дійшли висновку, що правильний підхід до конструювання решіток для сушіння зерна (пшениця, жито, овес, ячмінь) полягає в тому, щоб не було випадкових проривів струйок повітря у випадково оголеному зверху місці решітки та глухих зон у випадково загородженому місці решітки в місцях розташування дефектів шару домішки, злиплі грудки зерна, сторонні предмети).

Ступінь зважування шару визначається значенням [13]

$$R = \frac{\Delta P}{(\rho_M - \rho_C)(1-m)} = 0,85 \dots 1,0, \quad (2.12)$$

де ΔP - гідравлічний опір псевдозрідженого шару, Па.

Умовою задовільного зрідження по всій поверхні решітки буде є:

$$P_{0, \text{реш.}} \leq P_{з, \text{реш.}} = P_{\text{реш.}} + P_{\text{шару}}, \quad (2.13)$$

де $P_{0, \text{реш.}}$ - гідравлічний опір решітки в оголеному місці, Па;

$P_{з, \text{реш.}}$ - гідравлічний опір решітки у загородженому місці, Па;

$P_{\text{реш.}}$ - гідравлічний опір решітки у закритому матеріалом місці, Па;

$P_{\text{шару}}$ - гідравлічний опір шару зерна над закритим матеріалом на місці, Па.

Швидкість витікання повітря з вільного (оголеного) отвору [27]:

$$u'_B = \phi_1 \sqrt{\frac{2gP_{0, \text{реш.}}}{\rho \xi l}}, \quad (2.14)$$

де φ_1 – коефіцієнт закінчення;

ξ^2 – коефіцієнт опору.

Аналогічно для закінчення через закритий шаром отвір [27]:

$$v_B'' = \varphi_2 \sqrt{\frac{2gP_{\text{реш}}}{\rho\xi''}}. \quad (2.15)$$

Співвідношення швидкостей фільтрації повітря через закрити та оголену частини решітки.

$$\frac{v_{\Phi}''}{v_{\Phi}'} = \frac{v_B''}{v_B'} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \sqrt{\frac{\xi'}{\xi''} \left(\frac{P_{\text{реш}} - P_{\text{шар}}}{P_{\text{о.реш}}} \right)}, \quad (2.16)$$

або

$$\frac{v_{\Phi}''}{v_{\Phi}'} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \sqrt{\frac{\xi'}{\xi''} \left(1 - \frac{P_{\text{шар}}}{P_{\text{о.реш}}} \right)}. \quad (2.17)$$

Швидкість фільтрації зростає при оголенні решітки в n раз, тобто.

$$v_{\Phi}' = n v_{\Phi}'', \quad (2.18)$$

де $n > 1$ (при звичайному для установок з псевдозрідженим шаром відцентровому типі повітрорудних машин).

Звідси, вважаючи опір ґрат квадратичним, визначимо:

$$P_{\text{о.реш.}} = n^2 P_{\text{реш.}}, \quad (2.19)$$

де $P_{\text{реш.}}$ – опір решітки за нормальної робочої швидкості фільтрації.

Позначимо ще через $P_{\text{реш.}}/P_{\text{шар}} = x$ відношення опору решітки при робочій швидкості фільтрації до опору власне псевдозрідженого шару і розглянемо

граничний випадок існування псевдозрідження, тобто умови, коли $v_{\Phi}'' = v_{\text{м.с.}}$, де

$v_{\text{м.с.}}$ – швидкість фільтрації при граничній стійкості.

Таким чином, у нашому випадку:

$$\frac{v_{\text{пу}}}{n v_{\Phi}} = \frac{\varphi_2}{\varphi_1} \sqrt{\left(1 - \frac{1}{n^2 x} \right) \frac{\xi'}{\xi''}}. \quad (2.20)$$

Звідси маємо:

$$x = \frac{1}{n^2 \left(\frac{v_{\text{пу}} \varphi_1}{v_{\Phi} \varphi_2} \right)^2 \frac{\xi'}{\xi''}}. \quad (2.21)$$

У разі тонкого псевдозрідженого шару, коли його опір становить лише невелику частку загального опору системи,

$$u_{\phi} \approx u'_{\phi}, \text{ тобто } \eta \approx 1.$$

При роботі зі швидкостями фільтрації V_{ϕ} більше граничних значень задля досягнення зрідження над отворами, закритими шаром матеріалу, знадобиться $\chi \approx 1$, тобто гідравлічний опір решітки має бути не меншим, ніж опір самого псевдозрідженого шару.

2.3. Визначення оптимальних параметрів газорозподільної решітки для сушарок з псевдозрідженим шаром

При $R=1$ опір решітки $\Delta P_{\text{реш}}$, кг/м^2 , можна розрахувати за такою формулою:

$$\Delta P_{\text{реш}} \geq (\rho_M - \rho_C)(1 - m)H, \quad (2.22)$$

Теоретично було запропоновано чотири умови, які необхідно виконати під час конструювання газорозподільних решіток.

Перша умова – форма та розмір отворів перфорованих регіток має бути таким, щоб середнє за величиною зерно певної культури перекривало не тільки отвір, а й частину глукої поверхні решітки, щоб випадково оголене місце не виявилось у сприятливих умовах для утворення каналу.

Друга умова - крок отворів або густина розташування має бути такий, щоб сила сумарного тиску всіх струмків повітря виявилася достатньою для розширення зазору у випадково загородженому місці решітки.

Третя умова, що впливає з двох попередніх – опір решітки має бути настільки великим, щоб оголені чи загороджені частини її не могли різко зменшити або збільшити швидкість фільтрації по всій площі газорозподільних грат.

Для зерна пшениці з розмірами: товщина $a = 1,5 \dots 3,8$ мм, ширина $b = 1,6 \dots 4$ мм, довжина $l = 4,2 \dots 8,6$ мм, можна прийняти діаметр для круглого отвори $d = 2 \dots 2,5$ мм з кроком, що не перевищує середньої довжини зерна.

Таким чином, з урахуванням (2.22), на зміну порізності киплячого шару основний вплив мають параметри газорозподільного пристрою, тобто його гідравлічний опір

$$m = 1 - \frac{\Delta P_{\text{РЕШ}}}{(\rho_M - \rho)H} \quad (2.23)$$

З урахуванням 2.23 отримаємо частоту власних коливань псевдозрідженого шару:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{H} \left(\frac{2}{m} - 1 \right)} = \sqrt{\frac{g}{H} \left(2 \left(1 - \frac{\Delta P_{\text{РЕШ}}}{(\rho_M - \rho)H} \right)^{-1} - 1 \right)} \quad (2.24)$$

Повітряний потік, підходячи до газорозподільних решіток, підтискається в її отворах і з підвищеною швидкістю окремими струмками виходить з ґрати в зерновий шар. Таким чином, виникають втрати, пов'язані як із входом в отвори, так і з раптовим розширенням на виході з отвору решітки (рис. 2.3)

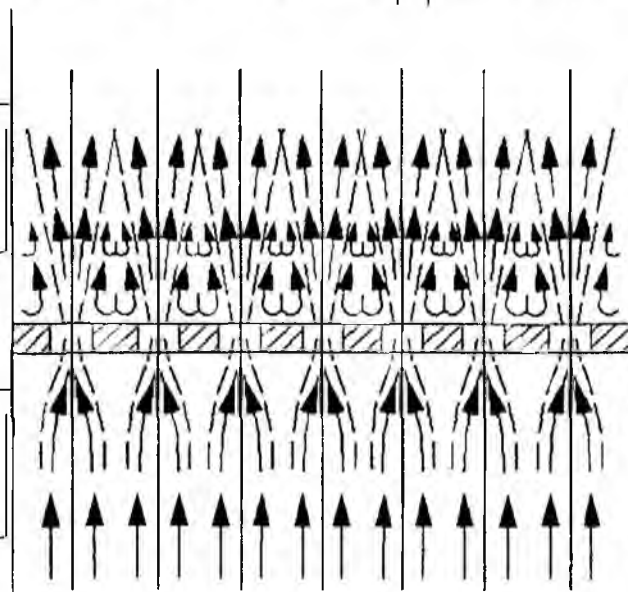


Рис. 2.3 - Схема перетікання потоку через решітку

Коефіцієнт опору решітки залежить від коефіцієнта живого перерізу:

$$f = \frac{\Sigma f_{\text{отв.}}}{f_{\text{РЕШ}}} \quad (2.25)$$

формі країв отворів, а також від числа Рейнольдса:

$$Re = v_{\text{отв.}} d_{\text{отв.}} / \nu \quad (2.26)$$

Обчислюється він за формулою [24]:

$$\xi = \frac{4P}{\rho v_1^2/2} \quad (2.27)$$

звідки:

$$\Delta P = \frac{\xi \rho v_1^2}{2}, \quad (2.28)$$

Підставляючи (2.28)-(2.24), отримаємо:

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{H} \left(2 \left(1 - \frac{\xi \rho v_1^2/2}{\rho M - \rho} \right) - 1 \right)} \quad (2.29)$$

Коефіцієнт опору перетіканню потоку через отвори решітки з будь-якою товщиною країв обчислюється за формулою:

$$\xi = \xi' \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{3/4} + \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right)^2 + \tau \sqrt{\left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{3/4} \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right)} + \xi_{\text{ПР}} = \xi' \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{0,75} + \tau \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{0,375} \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right) + \left(1 - \frac{F_0}{F_2} \right)^2 + \xi_{\text{ПР}} \quad (2.30)$$

При $F_1 = F_2$ (Рис. 2.4) 2.30 має вигляд (якщо ξ приведений до швидкості v_1 перед отвором):

$$\xi = \left[\xi' \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{3/4} + \tau \sqrt{\left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{3/4} \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right) + \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^2} + \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^2 \right] =$$

$$= \left[\xi' \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{0,75} + \tau \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^{1,375} + \left(1 - \frac{F_0}{F_1} \right)^2 + \xi_{\text{ПР}} \right] \left(\frac{F_1}{F_0} \right)^2 \quad (2.31)$$

де площа отворів F_0 визначається з урахуванням їхнього кроку при шаховому (ромбоподібному) розташуванні під кутом θ (рис. 2.5):

$$S_1 = 0,63 d_{\text{отв}} \sqrt{tg \theta / f}, \quad (2.32)$$

$$S_2 = 1,25 d_{\text{отв}} \sqrt{f tg \theta} \quad (2.33)$$

В окремому випадку при однаковій відстані між отворами як у поперечному напрямку, так і в діагональному ($S_2 = S_2'$, $\theta = 60^\circ$):

$$S_1 = 0,82 d_{\text{отв}} / \sqrt{f}, \quad (2.34)$$

$$S_2 = 0,95 d_{\text{отв}} / \sqrt{f}. \quad (2.35)$$

При $S_1 = S_2$ отримаємо:

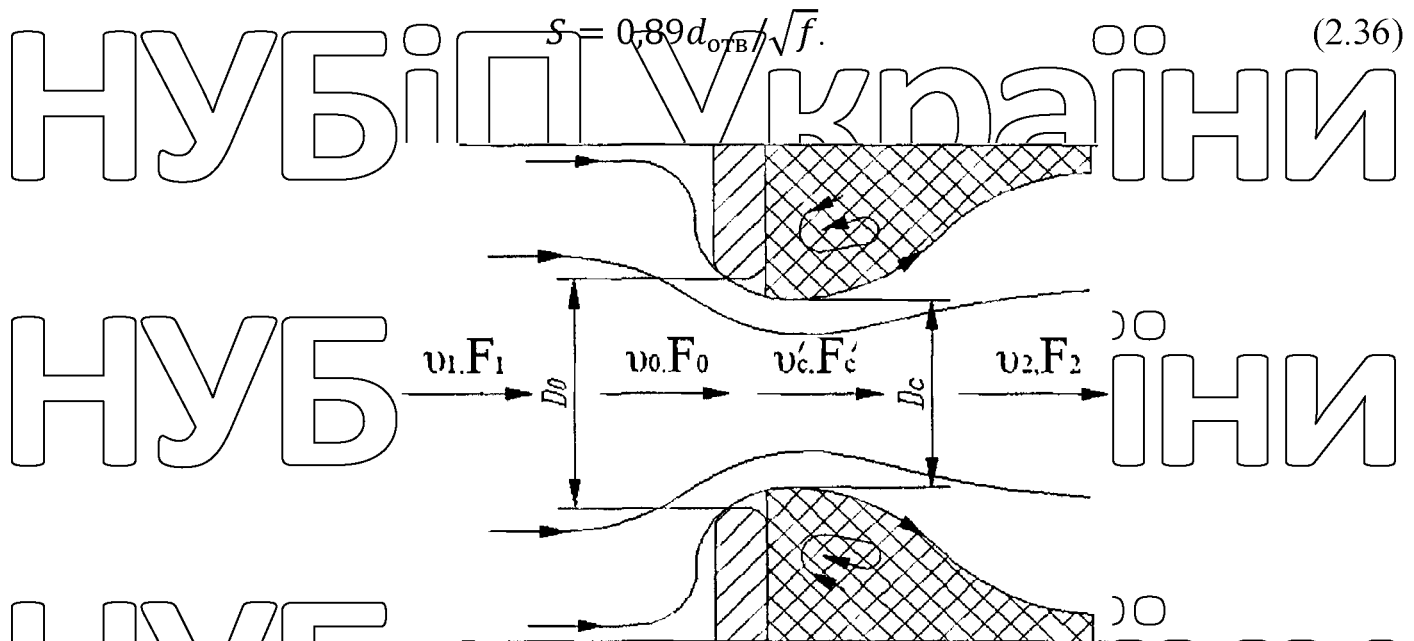


Рис. 2.4. Схема перетікання потоку скрізь отвір решітки

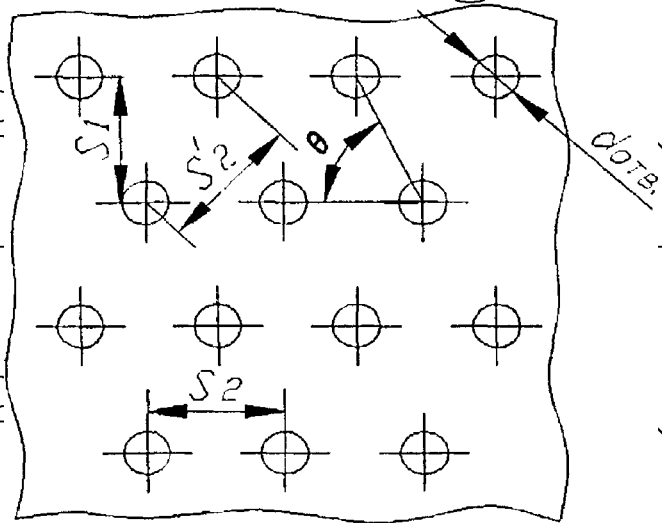


Рис. 2.5. Решітка перфорована з розташуванням отворів в шахватному

порядку

Для того, щоб обчислити частоти автоколивань псевдозрідженого шару, що виникають, прийемо, що на верхньому рівні шару визначена нами вище амплітуда коливань $\sigma_{\Delta(H)} = \sigma A_0 \exp(\omega^2 \cdot H / g)$ повинна бути обмеженою та не може перевищити половини середнього значення об'ємної щільності, тобто $0,5\sigma$.

Звідси:

$$H = H_0 \sqrt{\frac{g \cdot \sigma}{n(1-\sigma)} \cdot \ln \frac{0,5}{A_0}} \quad (2.37)$$

У роботах [64, 65] наведено рівняння, що встановлює зв'язок між порізністю шару m і фізичними параметрами твердого середовища та псевдозріджувального потоку:

$$m = Ak^{-n} (18Re = 0,36Re^2)^n \quad (2.38)$$

При ламінарному режимі, нехтуючи у рівнянні 2.38 другим членом дужках у порівнянні з першим, при $n = 0,21$ отримаємо:

$$\frac{m}{m_0} = \left(\frac{Re}{Re_0}\right)^{0,21} = \left(\frac{v}{v_0}\right)^{0,21} \quad (2.39)$$

При турбулентному режимі, навпаки, можна знехтувати першим членом у дужках, тоді отримаємо:

$$\frac{m}{m_0} = \left(\frac{Re}{Re_0}\right)^{0,42} = \left(\frac{v}{v_0}\right)^{0,42} \quad (2.40)$$

У формулах 2.39 та 2.40 та $i_0 = k$ - число псевдозрідження.

При визначенні об'єму шару використовуємо такі співвідношення:

- для нерухомого шару

$$H_0 F = \frac{G}{(1-m_0)\rho} \quad (2.41)$$

- для псевдозрідженого шару

$$HF = \frac{G}{(1-m)\rho} \quad (2.42)$$

Відношення H/H_0 дорівнюватиме:

$$H/H_0 = \frac{1-m_0}{1-m} \quad (2.43)$$

Приймаючи $m_0 = 0,4$ та використовуючи рівняння (2.37), отримаємо на підставі формули (2.43) вираз для розширення псевдозрідженого шару при ламінарному режимі:

$$H = H_0 \frac{0,6}{1-0,4\left(\frac{v}{v_0}\right)^{0,21}} \quad (2.44)$$

При турбулентному режимі:

$$H = H_0 \frac{0,6}{1-0,4\left(\frac{v}{v_0}\right)^{0,42}} \quad (2.45)$$

Підставляючи залежність висоти киплячого шару від початкової висоти нерухомого шару та числа псевдозрідження в рівняння (2.37) та (2.24), отримаємо:

$$\omega = \sqrt{g \frac{1-0,4k^n}{0,6H_0} \frac{\sigma}{n(1-\sigma)} \ln \frac{0,5}{A_0}} \quad (2.46)$$

$$\omega = \sqrt{g \frac{1-0,4k^n}{0,6H_0} \left(2 \left(1 - \frac{\Delta P_{\text{РЕШ}}}{(\rho_M - \rho)H_0}\right)^{-1} - 1\right)} \quad (2.47)$$

Таким чином, задаючись різними параметрами газорозподільного решета: діаметром отворів d_{0TB} , кроком отворів S , ставленням висоти шару до діаметра решета (діаметр сушильної камери) і розв'язуємо систему рівнянь:

$$\omega = \sqrt{g \frac{1-0,4k''}{0,6H_0} \frac{\sigma}{n(1-\sigma)} \ln \frac{0,5}{A_0}}$$

$$\omega = \sqrt{g \frac{1-0,4k''}{0,6H_0} \left(2 \left(1 - \frac{\xi \rho v_1^2 / 2}{(\rho_M - \rho)H_C}\right)^{-1} - 1\right)} \quad (2.48)$$

Розв'язуючи (2.48), знаходимо відповідні значення частоти ω і амплітуди A коливань псевдозрідженого шару зерна.

Очевидно, що якість (однорідність) псевдозрідження шару буде покращуватися зі збільшенням частоти ω і зниженням амплітуди A коливань.

Далі вводимо безрозмірну величину I - індекс однорідності:

$$I = \frac{\Psi}{v_c}, \quad (2.49)$$

де Ψ - відхилення об'ємної густини від положення рівноваги, мм;

v_c - Частота коливань, сек⁻¹, Гц.

Враховуючи, що $\Psi = A/2$, а $v_c = \omega/2\pi$, отримаємо:

$$I = \frac{A\pi}{\omega}. \quad (2.50)$$

За результатами розрахунків будемо графік залежності індексу однорідності I від кроку h та діаметра d отворів газорозподільних траг (рис. 2.6).

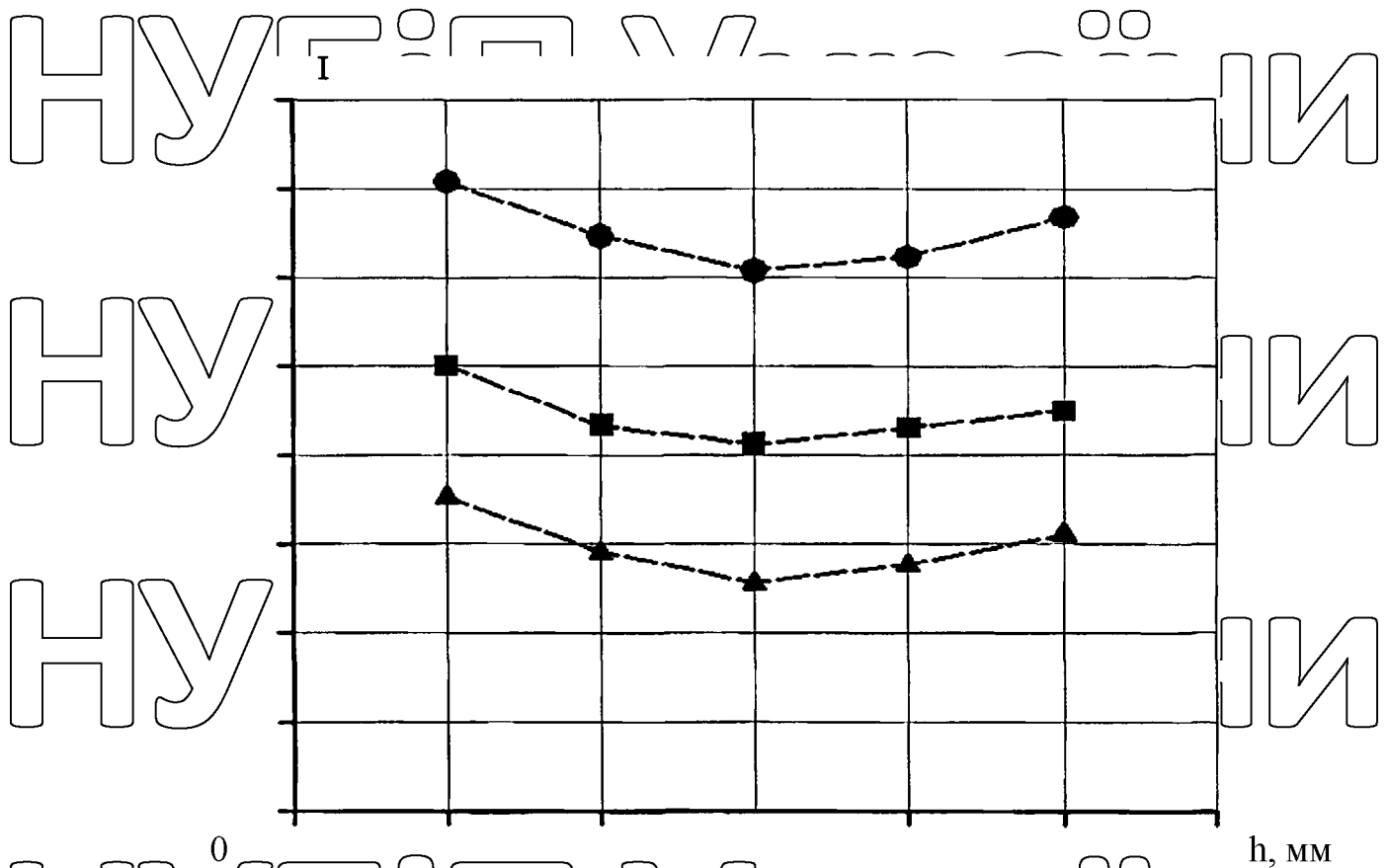


Рис. 2.6. Залежність індексу однорідності I від кроку отворів h газорозподільних ґрат при різних значеннях діаметра отворів d

Аналіз отриманих даних та графічних залежностей індексу однорідності від кроку отворів решета показує, що зі збільшенням кроку отворів решета індекс однорідності знижується та досягає найменшого значення при кроці отворів рівним 1,5 мм. Подальше збільшення кроку отворів призводить до поступового збільшення індексу однорідності за будь-яких заданих значеннях діаметра отворів решета.

2.4. Висновки по розділу 2

Проведені теоретичні дослідження експериментальної зерносушарки дозволяють зробити такі висновки:

1. Розроблено теоретичну модель структури киплячого шару.

2. Теоретичними дослідженнями визначено три умови, які необхідно виконати при конструюванні газорозподільних ґрат для задовільного зрідження по всьому перерізу зернового шару.

3. Виведена система рівнянь, що дозволяє, задаючись різними параметрами газорозподільного решета, знайти відповідні значення частоти ω і амплітуди A коливань псевдозрідженого шару зерна;

4. На основі отриманої математичної моделі структури киплячого шару визначено залежність однорідності псевдозрідження від частоти та амплітуди коливань шару зерна.

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

НУБІП України

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Опис експериментальної установки

В процесі експериментальних досліджень сушіння зерна в псевдозрідженому стані було встановлено, що внаслідок інтенсивного теплообміну зерно нагрівається до гранично допустимої температури за 50...200 секунд, залежно від температури агента сушіння. Зниження вологості зерна на 3...4 % викликає підвищенням температури до 55...60°C. Подальше сушіння призводить до перегріву зерна [7].

Даний недолік пропонується усунути за рахунок нової конструкції рециркуляційної зерносушарки псевдозрідженого шару (рис.3.1), яка містить охолоджувальну камеру 5 з перфорованим дном 7, бічна частина якого виконана у вигляді конуса з кутом нахилу α до центральної частини решітчастого дна 7, зерна. Сушильна камера 6 закріплена співвісно всередині охолоджувальної камери 5 із зазором 10 в нижній частині. У центральній частині решітчастого дна 7 по діаметру сушильної камери 6 закріплена насадка 8, що резнирюється донизу, призначена для збільшення швидкості повітряного потоку в сушильній камері 6. Усередині насадки 8 розташовані нагрівальні елементи 12. Повітря подається в робочі камери 9 на клапан 9. зерно надходить у сушарку через завантажувальний патрубок 14 при відкритій заслінці 2, просушене зерно вивантажується через пневмотрубу при відкритій заслінці 15. Відпрацьований агент сушіння виводиться з сушильної камери 6 через патрубок 4 при відкритій заслінці через циклон 1.

Технологічний процес сушіння зернового шару в зерносушарці заснований на псевдозрідженні та здійснюється наступним чином.

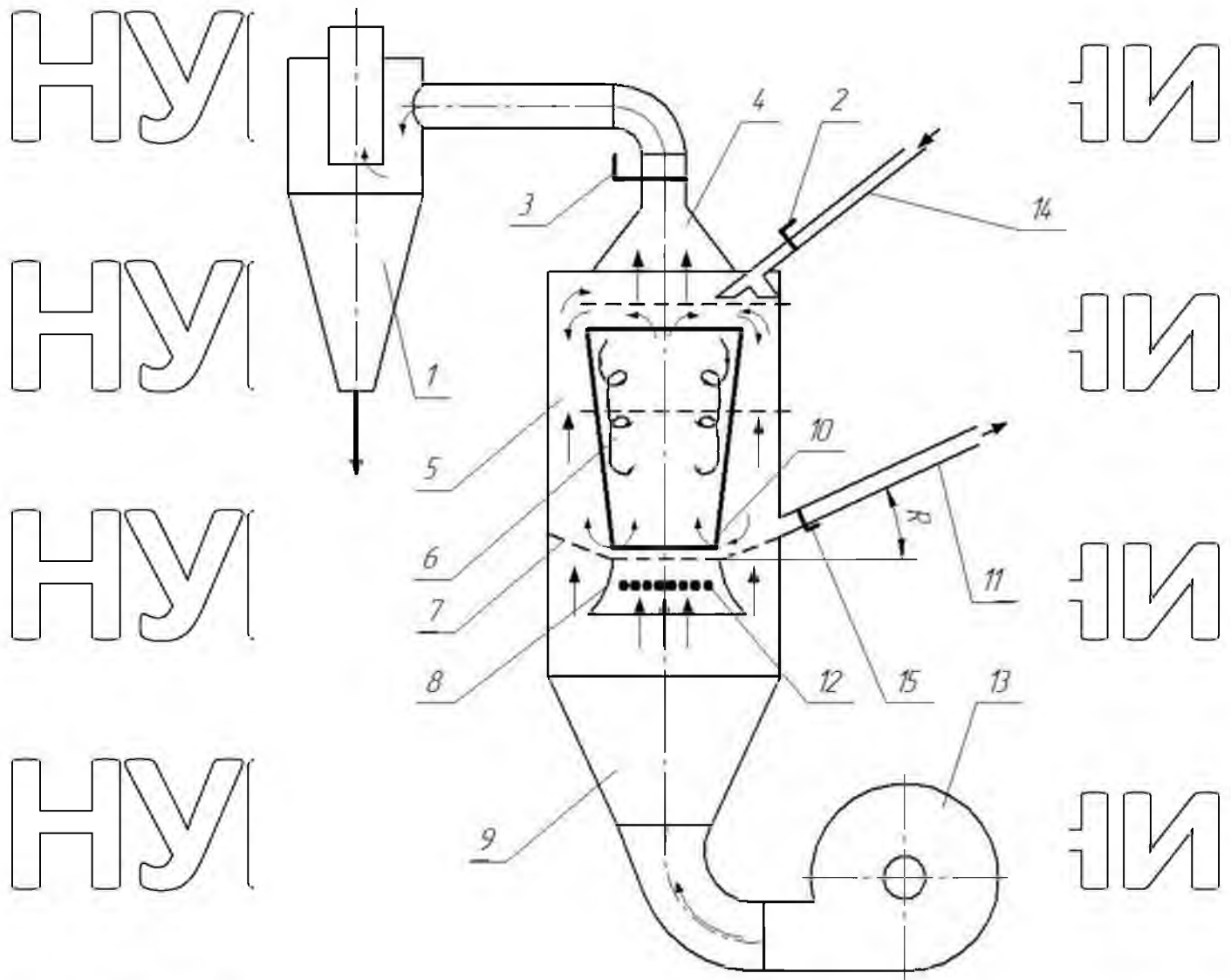


Рис. 3.1. Зерносушарка псевдозрідженого шару

1- циклон; 2, 3, 15 - заслінки; 4 - патрубок; 5 - зона охолодження; 6 - зона сушіння; 7 - решітка газорозподільного пристрою; 8 - насадка; 9 - нагнітальний патрубок; 10 - кільцевий зазор; 11 - трубопровод; 12 - теплообмінник-підігрівач; 13 - вентилятор; 14 - завантажувальний трубопровод.

Вологе зерно засипається по патрубку 14 сушильну камеру 6 і охолоджувальну камеру 5. Повітряний потік, що створюється вентилятором 13 після виходу з патрубку 9 розділяється на дві частини. Більша частина повітряного потоку потрапляє в насадку 8, проходить через нагрівальні елементи 12, нагрівається до необхідної температури і, пронизуючи центральну частину

сітки 7, потрапляє в сушильну камеру 6. Решта повітряного потоку, проходячи через бічну конусну частину решітчастого дна 7, охолоджувальну камеру 5. Насадка 8, що розширюється донизу, збільшує швидкість повітряного потоку до критичної, при якій щільний шар зерна в сушильній камері 6 переходить у розпушений, псевдозріджений стан і досягає висоти H , більшої, ніж висота сушильної камери 6.

Частина підсушеного зерна, нагрітого до граничної температури, потрапляє в зони охолодження 5 де відбувається його охолодження за рахунок продування холодним повітрям і контактного теплообміну з охолодженим зерном. Одночасно з цим приблизно така сама кількість охолодженого зерна потрапляє через кільцевий зазор 10 в сушильну камеру 6 і змішується з циркулюючими потоками нагрітого зерна.

Відпрацьований агент сушіння, легкі домішки та повітря з зони охолодження надходять через патрубок 4 циклон 1, де відбувається відділення повітря від домішок. Після циклона повітря вивільняється в атмосферу. Продування холодним повітрям охолоджувальної камери 5 збільшує порізність шару над решітчастим дном 7 і виключає утворення застійних зон в кільцевому зазорі 10. Для досягнення зерном кондиційної вологості зерно має багаторазово пройти цей процес. Після закінчення сушіння закриваються заслінки 2 і 3, відкривається заслінка 15, відключаються нагрівальні елементи 12, зерно охолоджується і транспортується повітряним потоком пневмотруби в сховище.

Удосконалена зерносушарка дозволяє здійснити рециркуляцію зерна всередині сушарки з чергуванням циклів нагрівання-охолодження та дає можливість подавати в сушильну камеру агент сушіння з підвищеною температурою без ризику перегріву та погіршення якості зерна, що збільшить швидкість сушіння; одночасно очищати зернову купу від легких домішок; розділити холодний повітряний потік від нагрітого і досягти критичної швидкості останнього, при якій щільний шар зерна в сушильній камері перетворюється на псевдозріджений і досягає висоти більшої, ніж висота сушильної камери.

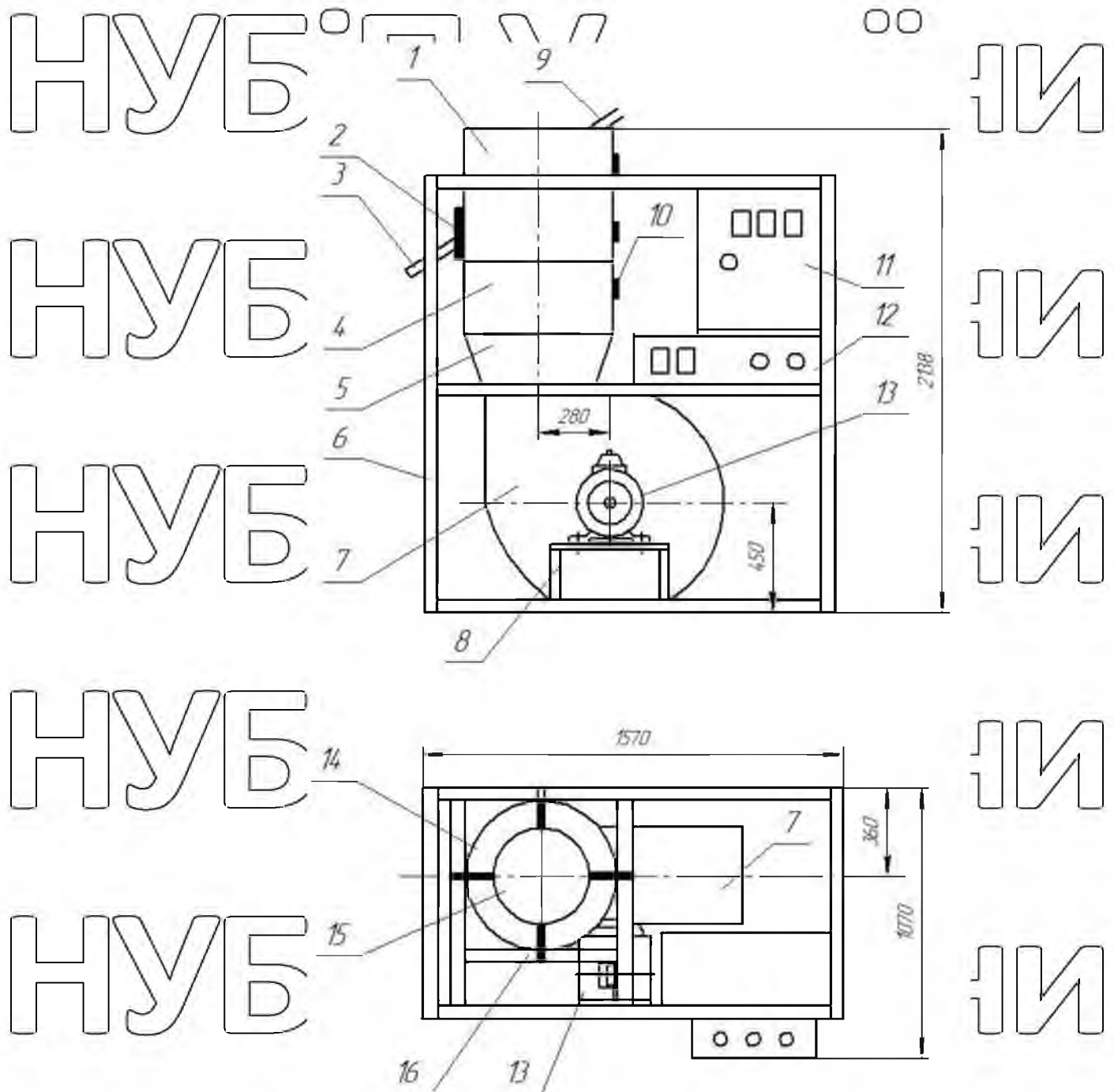


Рис. 3.2. Конструктивні вузли сушильної установки: 1 – робоча камера; 2 – заслінка; 3 – вивантажувальний патрубок; 4 – електрокалорифер; 5 – дифузор; 6 – рама; 7 – вентилятор; 8 – рама електродвигуна; 9 – завантажувальний патрубок; 10 – заглушка технологічного отвору для проведення вимірювань; 11 – пульт управління; 12 – вимірювальні прилади; 13 – електродвигун; 14 – охолоджувальна камера; 15 – сушильна камера; 16 – кріплення.

Одночасно можна виключити утворення застійних зон у кільцевому зазорі; скоротити габарити, металомісткість конструкції, а також енергоємність за рахунок скорочення завантажувально-вивантажувальних операцій, кількості норій, вентиляторів та електродвигунів порівняно з існуючими сушильними агрегатами такого типу.

Запропонована зерносушарка не вимагає підбору партій зерна за вологістю та засміченістю. Завдяки контактному вологообміну в охолоджувальній камері та багаторазовій, швидкісній циркуляції зерна відбувається вирівнювання його вологості та часткове очищення.

Конструкція лабораторної установки та її структурний склад представлений на рис. 3.2.



Рис. 3.3 Загальний вигляд експериментальної установки

Дослідження процесу сушіння зерна насінневого та продовольчого призначення проводилися на експериментальній сушарці, конструкція якої дозволяє проводити налаштування машини в широкому діапазоні. Залежно від застосовуваної культури, цілей сушіння можливі такі регулювання:

- Зміна температури агента сушіння до 100°C ;

- Зміна початкової товщини шару зерна, що висушується;

- Подачу зерна в сушильну камеру;

- Зміна параметрів псевдозрідженого шару шляхом зміни витрати повітря напірного вентилятора.

Пульт управління сушильною установкою дозволяє включати і вимикати електроживлення, що підводиться, запобігати підключенню електроживлення до калорифера без підключення напірного вентилятора, регулювати температуру агента сушіння за допомогою підключення або відключення частини нагрівальних елементів калорифера.

Вимірювання температури навколишнього повітря проводилося ртутним рідинним скляним термометром ГОСТ 2873. Діапазон вимірюваних температур $-30^{\circ}\text{C} \dots +50^{\circ}\text{C}$ з похибкою вимірювання $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Вимірювання температури зерна, що висушується, проводилося приладом ДЦ-01М в комплекті з термозондом вимірюючи температуру агента сушіння на виході з шару, враховуючи, що вона приблизно дорівнює температурі зерна [46]. Діапазон вимірюваних температур $-40^{\circ}\text{C} \dots +250^{\circ}\text{C}$ з похибкою вимірювання $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Схема розташування термозондів представлена на рис. 3.4.

Атмосферний тиск вимірювався мембранним метеорологічним барометром-анероїдом БАУМ-1. Діапазон вимірюваного тиску $80000 \text{ Па} \dots 106000 \text{ Па}$ з ціною розподілу шкали тиску 100 Па . Похибка вимірювань з урахуванням температурної та додаткової поправок не перевищує: основна $\pm 0,2594$, додаткова $\pm 0,620/0,5$.

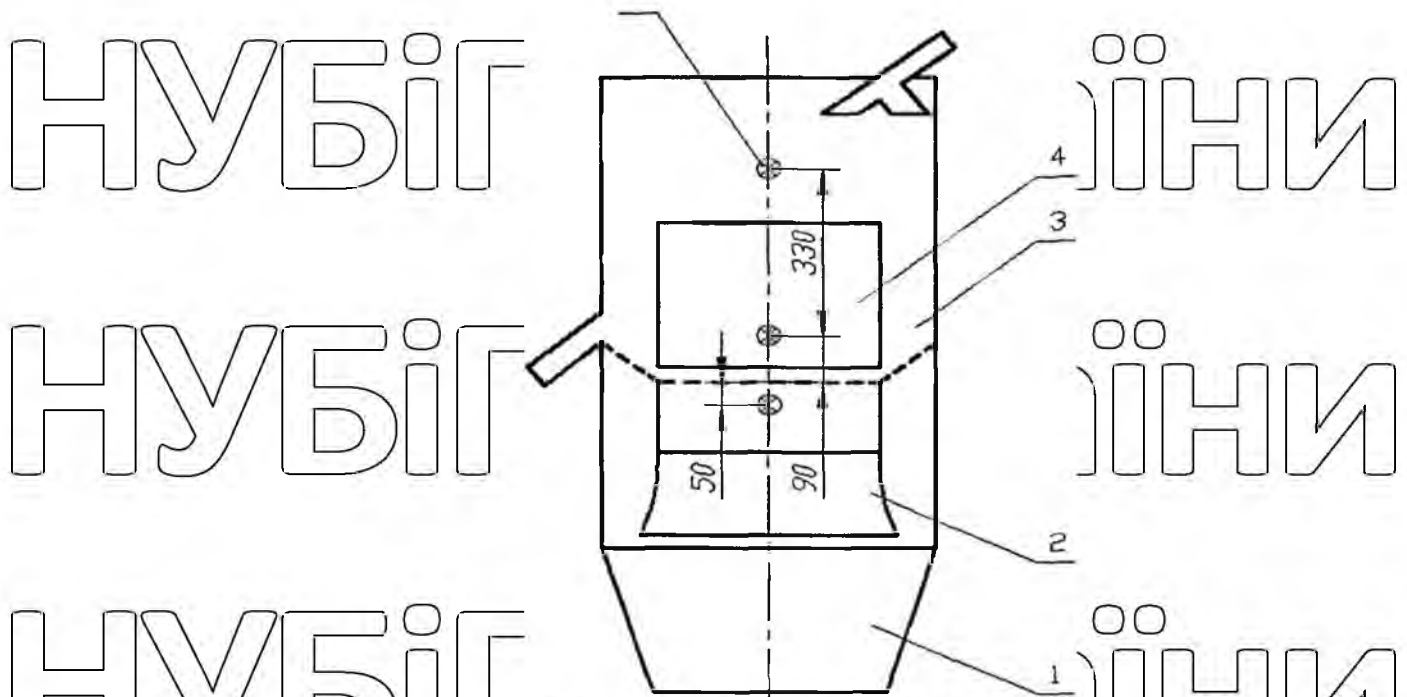


Рис. 3.4. Схема місць проведення вимірів: 1 – дифузор; 2 – конфузор; 3 – охолоджувальна камера; 4 – сушильна камера; 5 – місце виміру параметрів повітряного потоку

Тиск та швидкість повітряного потоку в робочій камері сушарки вимірювалося динамічним манометром у комплекті з напірною пневмометричною трубкою (рис. 3.5, 3.6).

Вимірювання відносної вологості проводилося аспіраційним гігрометром.

3.2. Методика проведення експерименту

Дослідження проводились у науково-навчальній лабораторії кафедри. Дослідження проводилися з метою визначення раціональних режимів сушіння зерна насінневого призначення, яке закладається на зберігання.

Визначення вихідного стану зернової маси

У зерна, призначеного для досліджень, визначалися вихідні якісні базові показники – засміченість зерна. Визначалося з використанням електричних лабораторних ваг;

– вихідна вологість зерна. Визначалася вологоміром Фауна-М у автоматичному режимі;
 – маса зерна. Визначалася з використанням лабораторних ваг мод. ВТЦ-10;

Параметри навколишнього повітря

– температура та відносна вологість навколишнього повітря мірялася психрометром аспіраційним МВ-4М, відповідно до технічного опису до приладу; атмосферний тиск вимірювався мембранним метеорологічним барометром-анероїдом мод. БАЛЛ-1.

Параметри сушильної установки

– тиск повітряного потоку на вході та виході із зернового шару. Регулювання забезпечувалося шляхом зміни прохідного перерізу напірного вентилятора ВЦ 14-46-2,5-01 А та вимірювалося цифровим диференціальним манометром ДПД-О 1 М;

– швидкість потоку повітря в сушильній камері. Вимірювалася цифровим диференціальним манометром. При цьому швидкість потоку агента сушіння вимірювалася в 9 точках: 6 точок уздовж стінок сушильної камери і точки 3 уздовж осі симетрії робочої зони, що проходить від завантажувального вікна до

вихідних жалюзі);

– температура агента сушіння в нижньому поворотному коліні 1 в сушильній камері контролювалася за показаннями цифрового диференціального манометра ІЦЦ-01М. Необхідна, згідно з завданням експерименту, температура агента сушіння забезпечувалася шляхом періодичного відключення однієї або декількох секцій електрокалорифера;

– час виходу установки на робочий режим експерименту та тривалість роботи за періодами фіксувалося двострілковим секундоміром.

Порядок проведення експерименту

За 72 години до експерименту зерно зволожувалося до необхідної вологості. При цьому вологість зерна контролювалася вологоміром в автоматичному режимі.

Установка розігривається до температури агента сушіння 60°C . Відкривається заслінка приймального бункера, забезпечуючи вихід зерна 50 кг/год . У сушильну камеру засипається підготовлене для сушіння зерно товщиною 5 см . Відбір проб зерна здійснюється через відкриту заслінку вивантажувального патрубку установки. У відібраній пробі вимірюється температура рідинним спиртовим скляним термометром ТУ 25-1102.043-83 ТС-4М та вологість вологоміром Фауна-М. Наступні відбори проб зерна проводилися через кожні 30 секунд роботи установки. При вологості після одного циклу сушіння понад $13,594$ зерно охолоджувалося на повітрі до температури, що не перевищує температуру повітря приміщення на $6...80^{\circ}\text{C}$ потім знову піддавалося сушінню за цими ж режимами.

У повністю висушеної партії зерна відбиралася проба зерна масою 200 г чотирьох повторності щодо повного аналізу.

Схожість насіння дослідних та контрольних проб визначалася після зберігання їх при температурі $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ протягом 30 діб , що виключало вплив післязбирального дозрівання на результати досліджень. За результатами вимірювань та аналізів проб визначався характер зміни параметрів зерна насінневого та продовольчого призначення у процесі його зберігання та переробки.

Техніко-експлуатаційні показники розробленої сушильної установки визначалися в лабораторних та виробничих умовах за спеціально розробленою програмою.

Вимірювання періодів часу роботи установки проводилося двострілковим секундоміром дії „С-П-16” з годинниковим механізмом з вільним анкерним спуском. Період коливання балансу $-0,2 \text{ секунди}$. Розмір поділу секундомірної шкали - секунди. Ціна поділу шкали хвилинного лічильника $-0,5 \text{ секунди}$.

Секундні стрілки роблять повний оборот за 30 секунд . Стрілка хвилинного лічильника робить один повний оберт за 30 хвилин .



Рис. 3.5. Цифровий диференціальний манометр ET-921



Рис. 3.6. Напорна прометрична трубка

Вимірювання вологості зерна проводиться за допомогою вологоміра зерна "Фауна-М", що має діапазон вимірювання вологості для зернових культур 4,5...35,0%. Прилад має автоматичну термокомпенсацію в інтервалі робочих температур від 5 до 40°C.

Методика оптимізації конструктивно-технологічних параметрів експериментальної зерносушарки псевдозрідженого шару в залежності від індексу однорідності

Виявлено, що на якість роботи експериментальної зерносушарки, що реалізує цей спосіб на практиці, основний вплив мають такі фактори:

- діаметр отворів газорозподільних ґрат;
- крок отворів газорозподільних ґрат;
- Відношення висоти до діаметру зернового шару в сушильній камері циліндричної форми.

Так як механізм аналізованого явища невідомий і не піддається описано повною мірою аналітичними методами, то для побудови математичної моделі технологічного процесу псевдообжюкнення, оцінки ступеня впливу окремих факторів та їх взаємодій на якість роботи зерносушарки, а також пошуку області

раціональних значень основних її параметрів знадобилося проведення багатofакторного експерименту. В його основу покладено відомі зі шператури методичні розробки та рекомендації щодо планування експерименту [3, 14, 51].

Залучення методів багатofакторного планування обґрунтовано тим, що це дозволяє не тільки значно скоротити т-шсло дослідів, а отже, час і кошти на проведення експерименту, а й дає можливість глибокого та повного аналізу описуваного процесу.

Пошук оптимуму проводили згідно з методикою планування експерименту за алгоритмом Іейтса [42].

Для розрахунку коефіцієнтів регресії за алгоритмом Іейтса будемо таблицю, представлену в додатку А. 3.1. У восьмому стовпці цієї таблиці дано результати дослідів Y_u . Їх розбиваємо на дев'ять груп по три значення у кожній.

Після цього проводимо такі розрахунки. — для кожної групи підраховуємо суму всіх трьох значень Y_u та записуємо до наступного стовпця (дев'ятий стовпець у додатку А).

- Розраховуємо різниці між третім і першим значенням у кожній групі. Отримані т-шеда записуємо в той же дев'ятий стовпець за дев'ятьма сумами, розрахованими відповідно до пункту 1.

- для кожної групи розраховуємо квадратичні ефекти $Y_1 - 2 Y_2 + Y_3$, доповнюючи дев'ятий стовпець до вісімнадцяти значень.

Отриманий стовпець знову розбиваємо на дев'ять груп по три значення і з ними проводимо самі операції в тому ж порядку. В результаті отримуємо десятий стовпець. На третьому кроці алгоритму ми отримуємо (одинадцятий стовпець) 27 чисел, з яких перше, являє собою суму всіх вихідних значень, а

решту 26 чисел - контрасти, що відповідають 26 ефектам, що визначаються за цим планом. Щоб перейти від контрастів до коефіцієнтів регресії, необхідно розділити їх на дільники, величини яких наведені в дванадцятому стовпці таблиці 3.1. Рівняння регресії на основі знайдених коефіцієнтів виглядає так:

$$\begin{aligned}
 Y = & P_3 \cdot P_2 \cdot P_1 \cdot B_{27} + P_3 \cdot P_2 \cdot x_1 \cdot B_{26} + P_3 \cdot P_2 \cdot B_{25} + P_3 \cdot x_2 \cdot P_1 \cdot B_{24} + \\
 & + P_3 \cdot x_2 \cdot x_1 \cdot B_{23} + P_3 \cdot x_2 \cdot B_{22} + P_3 \cdot P_1 \cdot B_{21} + P_3 \cdot x_1 \cdot B_{20} + P_3 \cdot B_{19} + \\
 & + x_3 \cdot P_2 \cdot P_1 \cdot B_{18} + x_3 \cdot P_2 \cdot x_1 \cdot B_{17} + x_3 \cdot P_2 \cdot B_{16} + x_3 \cdot x_2 \cdot P_1 \cdot B_{15} + \\
 & + x_3 \cdot x_2 \cdot x_1 \cdot B_{14} + x_3 \cdot x_2 \cdot B_{13} + x_3 \cdot P_1 \cdot B_{12} + x_3 \cdot x_1 \cdot B_{11} + x_3 \cdot B_{10} + \\
 & + P_2 \cdot P_1 \cdot B_9 + P_2 \cdot x_1 \cdot B_8 + P_2 \cdot B_7 + x_2 \cdot P_1 \cdot B_6 + x_2 \cdot x_1 \cdot B_5 + x_2 \cdot B_4 + \\
 & + P_1 \cdot B_3 + x_1 \cdot B_2 + B_1
 \end{aligned} \quad (3.1)$$

де B_i - коефіцієнти регресії;

P_i - змінні, пов'язані із співвідношенням: $P_i = 3x_i^2 - 2$.

Для визначення значних ефектів використовуємо графічний метод К.

Данієла [31]

Адекватність отриманої математичної моделі перевіряли за критерієм Фішера.

Гіпотеза про адекватність моделі приймається, якщо $F_{\text{розр}} < F_{\text{таб}}$. Крім того, адекватність одержаної моделі оцінювали також непрямим шляхом за значимістю коефіцієнтів парної взаємодії [37]

Оскільки фактори процесу неоднорідні та мають різні одиниці виміру, приводили їх до єдиної системи обчислення шляхом переходу від дійсних значень факторів до кодованих за формулою:

$$x_i = (x_i - x_{i0}) / \Delta x_i \quad (3.2)$$

де x_i - натуральне значення фактора;

x_{i0} - натуральне значення фактора на основному рівні;

Δx_i - натуральне значення інтервалу варіювання фактора.

Використовуючи отримане рівняння, будуємо поверхні відгуків і характером отриманих поверхонь оцінюємо вплив чинників на технологічний процес висів, вибираємо оптимальні параметри.

Методика визначення якості зрідження зернового матеріалу

Опис стану зернового шару в сушарках з псевдозрідженням може бути в кращому випадку оцінено тільки візуально, а тому і не зовсім об'єктивно. Це загальновизнано, і без сумніву, з цієї причини було зроблено багато спроб знайти точніше визначення якості псевдозрідження.

Нами запропоновано метод визначення однорідності псевдозрідження, що полягає у визначенні інтенсивності світлового випромінювання пучка світла, що пронизує зерновий шар. Експериментальні дослідження проводилися на розробленій та виготовленій установці, представленій на рис. 3.4, 3.7. При дії нагрітого електричними тенами повітряного потоку 8, створюваного вентилятором 9 на зерновий шар 5 розташований на решітці 7 за певних умов відбувається послаблення контактів між зернами, порізність шару збільшується, а структура його руйнується. Щільний шар зерна в робочій камері 4 переходить у стан, що нагадує киплячу рідину, тобто стан псевдозрідження. При цьому на якість сушіння основний вплив має ступінь однорідності псевдозрідженого зернового шару.

Інтенсивність світлового випромінювання створюваного джерелом спрямованого світла 6 приймалися датчиком селеновим 2 реєструвалися люксометром 1 і записувалися на відеокамеру 3.

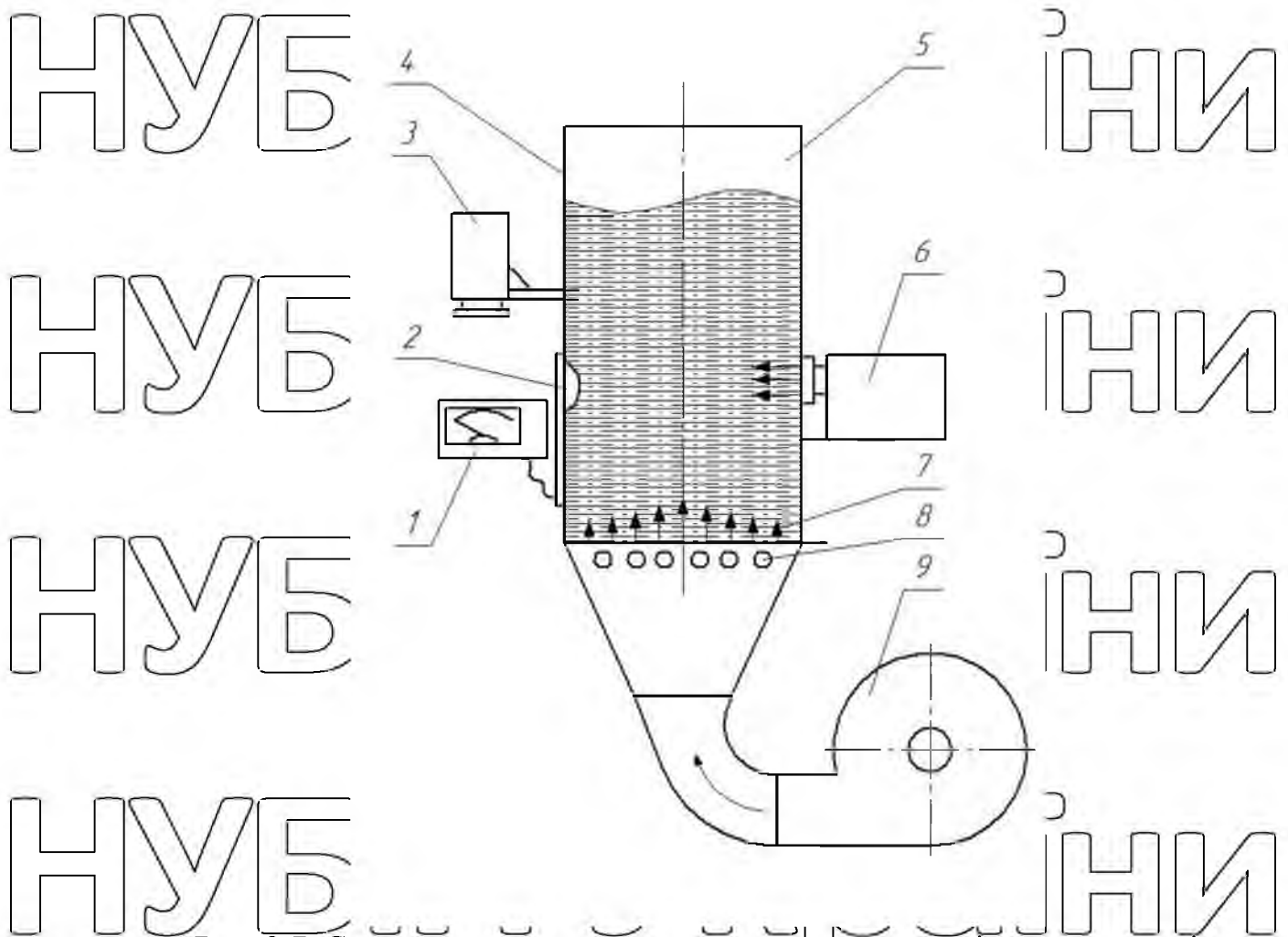


Рис. 3.7. Схема експериментальної установки та розміщення приладів для визначення ступеня однорідності псевдозрідження:

1 – люксметр; 2 – селеновий датчик; 3 – відеокамера; 4 – сушильна камера;
 5 – зерновий шар; 6 – джерело світла; 7 – газорозподільний пристрій; 8 – сл. тени;
 9 – вентилятор

Зміни інтенсивності світлового випромінювання реєструвалися через певні проміжки часу, як показано в додатку, і визначався індекс однорідності I як відношення середнього відхилення $\delta_{\text{ср}}$, % до частоти ксливань t , ксл./сек:

$$I = \delta_{\text{ср}} / t.$$

На рисунку (додаток В) абсцису – тривалість досвіду, сік, ордината – світловий потік, люкс. При цьому люкс відповідає щільності нерухомого шару зерна, 30 люкс – нульовій щільності, 15 люкс – середньої щільності.

Згідно з експериментом індекси однорідності були пов'язані з якістю псевдозрідження наступним чином (табл. 3.1).

Таблиця 3.1.

Зв'язок індексу однорідності з якістю псевдозрідження

Степень однородности	Индекс однородности
Высокая	7 – 15
Удовлетворительная	15 – 32
Низкая, с нарастающим поршневым режимом	

Вочевидь, що з повної однорідності індекс дорівнює нулю. Індекс 7 – гранично можливий для зернового матеріалу.

Користуючись цим методом, було проведено експериментальні дослідження щодо впливу параметрів газорозподільного пристрою на якість зрідження зерна.

У робочій камері сушарки змінювали параметри газорозподільних решіт: діаметр отворів вибирався з такими значеннями: $d = 2; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3$ мм, крок отворів у своїй приймався рівним $= 1; 1,5; 2$. Відношення висоти до діаметра зернового шару приймалося $L/D = 1; 1,5; 2$.

Технологічні властивості насіння пшениці

Для правильного розрахунку основних конструктивних елементів експериментальної зерносушарки, а також для вибору оптимального режиму технологічного процесу сушіння необхідно знати властивості матеріалу, що обробляється. Тому нами було досліджено розмірні характеристики зернового матеріалу, що надходить із поля під час збирання.

Для досліджень властивостей насіння пшениці було взято районований сорт Миронівська 808. Вимірювалися зразки насіння, що мають вологість $34 \pm 2\%$. Їх лінійні розміри та вага представлені в таблиці з додатку А.

З даних таблиці видно, що ширина насіння цього сорту змінюється від 26 до 35 мм. Найменшою мірою змінюється товщина від 2,4 до 3,2 мм. Найбільшу

зміну піддається довжина насіння: від 5,51 до 7,1 мм. Середні значення становлять $a_{\text{сер}} = 6,31$ мм, $b_{\text{сер}} = 3,06$ мм, $c_{\text{сер}} = 2,81$ мм.

У таблиці (додаток А) видно загальна закономірність: лінійні розміри насіння перебувають у тісному зв'язку — велика довжина тягне у себе великі ширину і товщину. У таблиці подано варіаційні показники всіх трьох розмірів насіння.

Результати визначення об'ємно-вагових характеристик насіння пшениці наведено у додатку А.

Таким чином, насіння має в середньому масу $m_{\text{сер}} = 0,03^{-3}$ кг і об'ємну масу $\rho_a = 710,5$ кг/м³, щільність їх становить $\rho_c = 1,093$ кг/м³.

3.3. Вплив конструктивно-технологічних параметрів експериментальної зерносушарки на якість зрідження зернового матеріалу

3.3.1. Залежність індексу однорідності псевдозрідженого шару від діаметра та кроку отворів газорозподільного пристрою

Аналіз технологічного процесу роботи експериментальної сушарки показав, що основними факторами, що визначають якість псевдозрідження зернового шару є: діаметр отворів газорозподільного пристрою, крок отворів газорозподільного пристрою, відношення висоти до діаметра зернового шару в сушильній камері циліндричної форми.

Експериментальні дослідження проводилися з метою підтвердження правильності теоретичних досліджень щодо обґрунтування конструктивних параметрів сушильної камери та встановлення їх можливих значень, що забезпечують задані межі варіювання індексу однорідності псевдозрідженого шару насіння пшениці. У зв'язку з цим необхідно було вивчити вплив зміни діаметра (1 і кроку отворів отворів газорозподільної решітки сушильної камери на індекс однорідності $I_{\text{псевдозрідженого шару зерна}}$.

Діаметр отворів газорозподільного пристрою сушильної камери вибирався з такими значеннями: $d = 2, 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3$ мм. Крок отворів у своїй приймався рівним $= 1; 1,5; 2$.

Результати експериментальних досліджень з вивчення впливу зазначених факторів на індекс однорідності псевдозрідженого матеріалу в сушильній камері представлені графічними залежностями на рисунках 3.8, 3.9

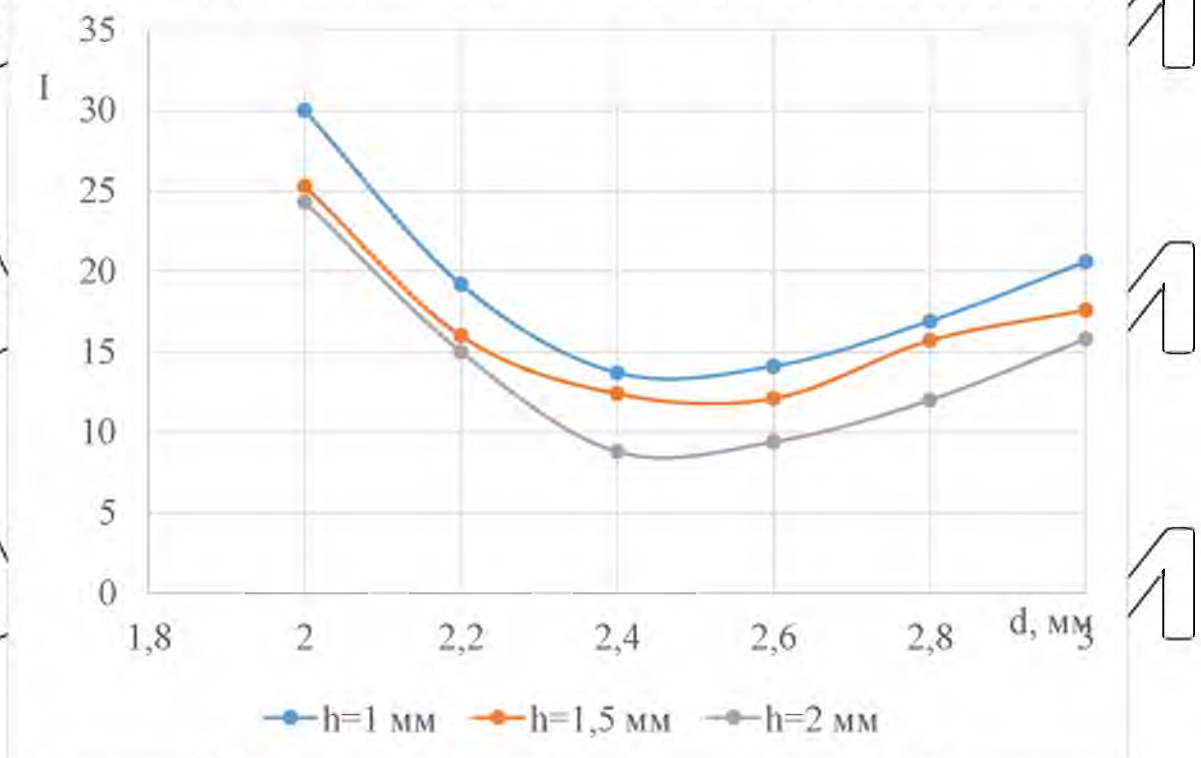


Рис. 3.8. Залежність індексу однорідності I від діаметра отворів d газорозподільних ґрат при різних значеннях кроку отворів

Різне зниження індексу однорідності I (рис. 3.8) зі збільшенням діаметра отворів решітки відбувається до певного значення, потім індекс однорідності починає глибоко збільшуватися. Мінімальна величина індексу I відповідає значенням діаметра решітки, розташованим в інтервалі від 2,4 до 2,6 мм.

На підставі отриманих результатів, необхідно в подальших дослідженнях, а також у практичному використанні решітки з діаметром отворів від 2 до 3 мм. Подальше збільшення діаметра отворів решіток нецільове, тому що через них відбувається прокидання частини зернового матеріалу.

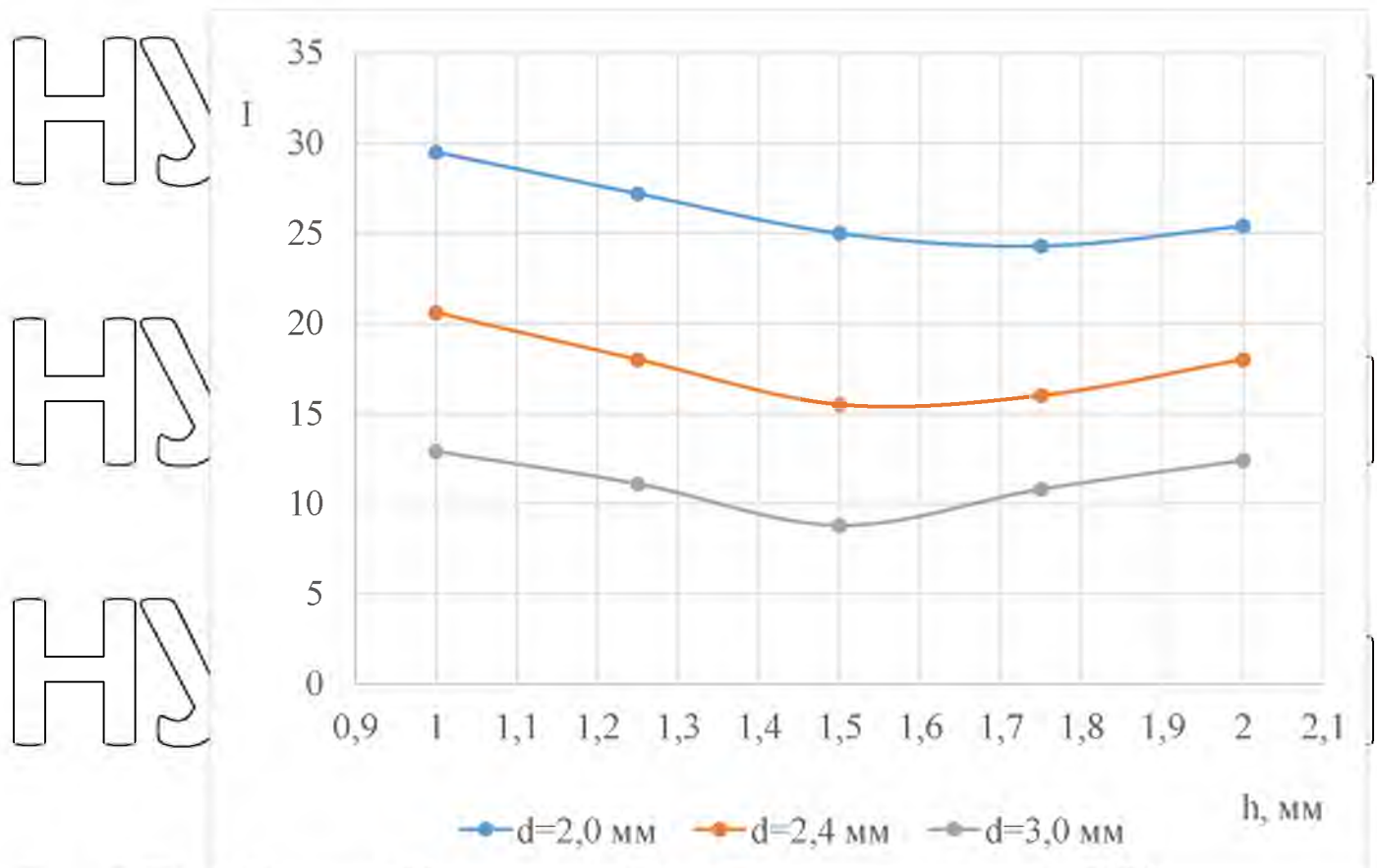


Рис. 3.9. Залежність індексу однорідності I від кроку отворів h газорозподільних ґрат при різних значеннях діаметра отворів d

Аналіз отриманих даних та графічних залежностей (рис. 3.9) індексу однорідності від кроку отворів решета показує, що зі збільшенням кроку отворів решета індекс однорідності знижується та досягає найменшого значення при кроці отворів рівним 1,5 мм. Подальше збільшення кроку отворів призводить до поступового збільшення індексу однорідності за будь-яких заданих значеннях діаметра отворів решета.

Подальше збільшення кроку отворів у газорозподільних решітках вважаємо неможливим через зменшення живого перерізу решета і як наслідок значного збільшення його гідравлічного опору. Характер залежності, отриманої в ході експерименту, досить високої точністю відповідає теоретичної.

3.3.2 Вплив відношення висоти до діаметра зернового шару на індекс однорідності псевдозрідження експериментальної зерносушарки

Характеристика псевдозрідження залежить як від висоти шару, а й від діаметра апарату, чи, в таний спосіб, від відношення висоти до діаметру. Мінімальне відношення висоти до діаметру зернового шару було прийнято $q = L/D = 1$, подальше зниження цієї величини недовільно з економічних міркувань, оскільки помітно знижується продуктивність сушарки.

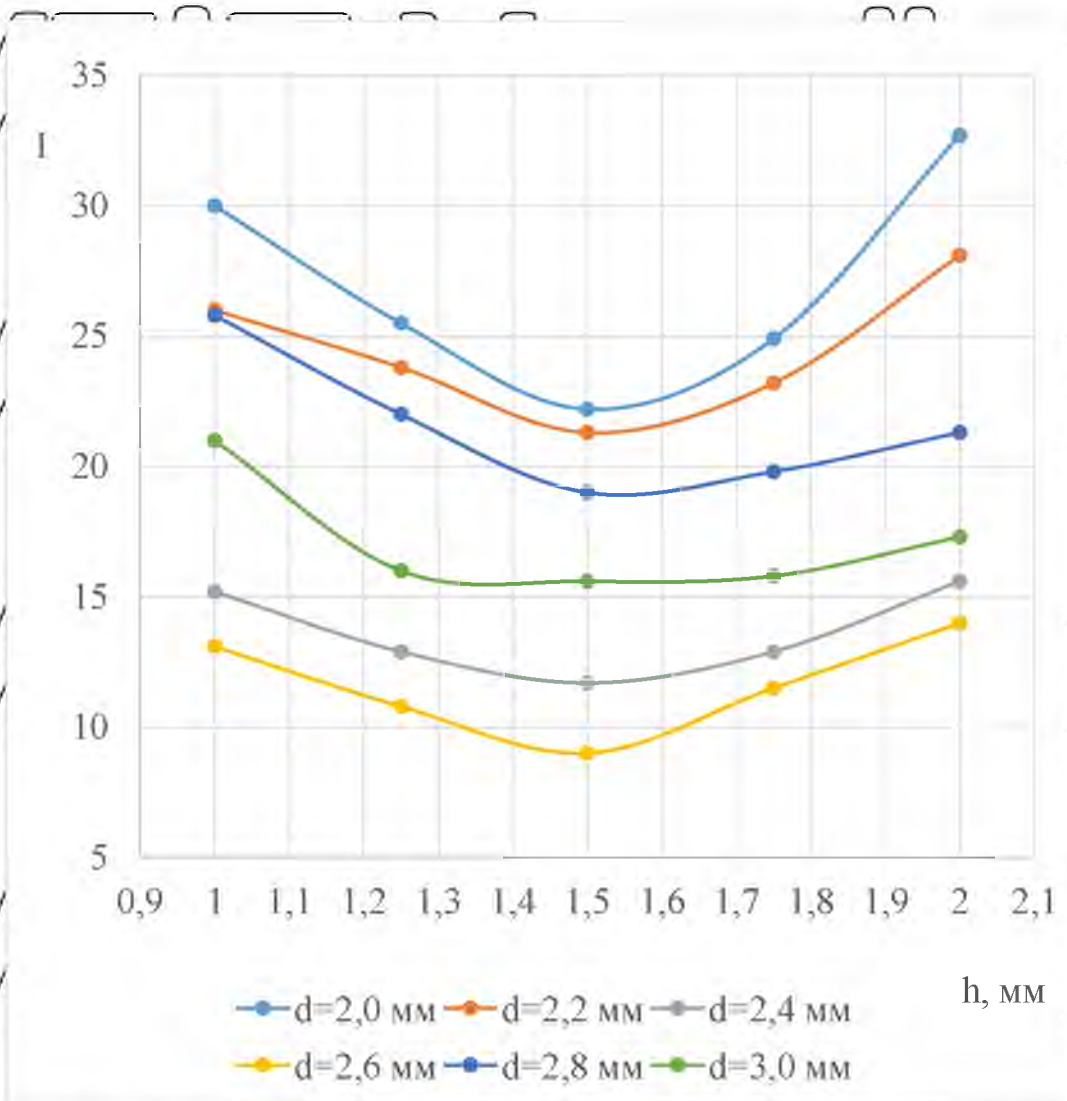


Рис. 3.10. Залежність індексу однорідності від величини відношення

Максимальне значення відношення висоти до діаметру зернового шару, що не порушує стійкість зрідження, визначалося дослідним шляхом, і було прийнято $q = 2$. Аналіз графічних залежностей (рис. 3.10) індексу однорідності I від величини відношення при різних діаметрах отворів газорозподільних решіт d показує, що процес зрідження зернового матеріалу до величини відношення $q=2$ є стійким.

Подальше збільшення величини L/D призводить до переходу від псевдозрідженого стану поршневого режиму і викиду зернового матеріалу з сушильної камери, тобто, при $L/D > 2$ робота зерносушарки неможлива.

Найбільш якісне зрідження за мінімального індексу однорідності спостерігалось при $L/D = 1,5$.

Таким чином, при проектуванні експериментальної зерносушарки слід обмежитися діапазоном відношень L/D від 1 до 2.

3.3.3. Результати оптимізації конструктивних параметрів

експериментальної сушарки за індексом однорідності зрідження зернового матеріалу

З метою оцінки взаємодії та впливу конструктивних та режимних параметрів експериментальної сушарки з псевдозрідженим зерновим шаром на індекс однорідності зрідження було проведено повний факторний експеримент.

Встановлено, що на індекс однорідності найбільше впливають: діаметр та крок отворів газорозподільного решета, відношення висоти до діаметра зернового шару. Рівні та інтервали варіювання перелічених факторів, подані в таблиці 3.2, вибиралися на підставі результатів попередніх лабораторних досліджень.

Для отримання математичної моделі технологічного процесу псевдозрідження зерна реалізовано повний факторний експеримент 3^3 , матриця планування якого та результати дослідів наведені в додатку В, де Y – індекс однорідності зрідження зерна в сушильній камері експериментальної зерносушарки.

Після проведення експерименту зробили розрахунок за алгоритмом Іейтса, який представлений у таблиці додатка А.

Значущі ефекти визначили графічним методом Данієла за допомогою $1/2$ -нормального графіка (додаток Г). Для визначення ординати $1/2$ -нормального графіка перейшли від порядкового номера ефекту ранжованого ряду (i) (див. Додаток Г) до довірчої ймовірності p .

Таблиця 3.2.

Рівні варіювання факторів	Фактори			Фактори в кодованому вигляді		
	d, мм	h, мм	q, мм	X ₁	X ₂	X ₃
Верхній	3	2	2	+1	+1	+1
Нижній	2	1	1	-1	-1	-1
Основний	2,5	1,5	1,5	0	0	0
Інтервал варіювання	0,5	0,5	0,5	1	1	1

Після виділення значних ефектів отримали рівняння регресії виду:

$$y = 1,498 - 3,303X_1 - 0,933X_2 + 9,81X_1^2 - 4,758X_2^2 + 1,798X_1X_3 + 2,777X_2^2 - 2,693X_1X_3^2 \quad (3.3)$$

Адекватність моделі перевіряли по F-критерію Фішера:

$$F_{\text{розр}} = s_{\text{ад}}^2 / s_y^2 = 1,503$$

Дисперсія неадекватності $s_{\text{ад}}^2$ і дисперсія відтворюваності s_y^2 , що характеризує помилки.

Табличне значення F-критерія при рівні значущості 0,05 та числі ступенів вільності $f_1 = 19$, $f_2 = 54$, складе $F = 1,95$.

Розрахункове значення F-критерія менше табличного, відповідно можна зробити висновок про адекватність математичної моделі, що описує технологічний процес з достовірністю 0,95.

Кінцевою дією є заміна кодових значень факторів на натуральні, окремуючи розкодовану форму математичної моделі:

$$I = 432,714 - 240,856d - 35,178h + 57,488dq - 200,761q + 39,251d^2 + 72,921q^2 + 11,11h^2 - 21,551dq^2 \quad (3.4)$$

Візуалізацією отриманої математичної моделі є поверхня відгуку, побудована на основі факторної залежності зміни індексу однорідності псевдозрідження I (рис. 3.11).

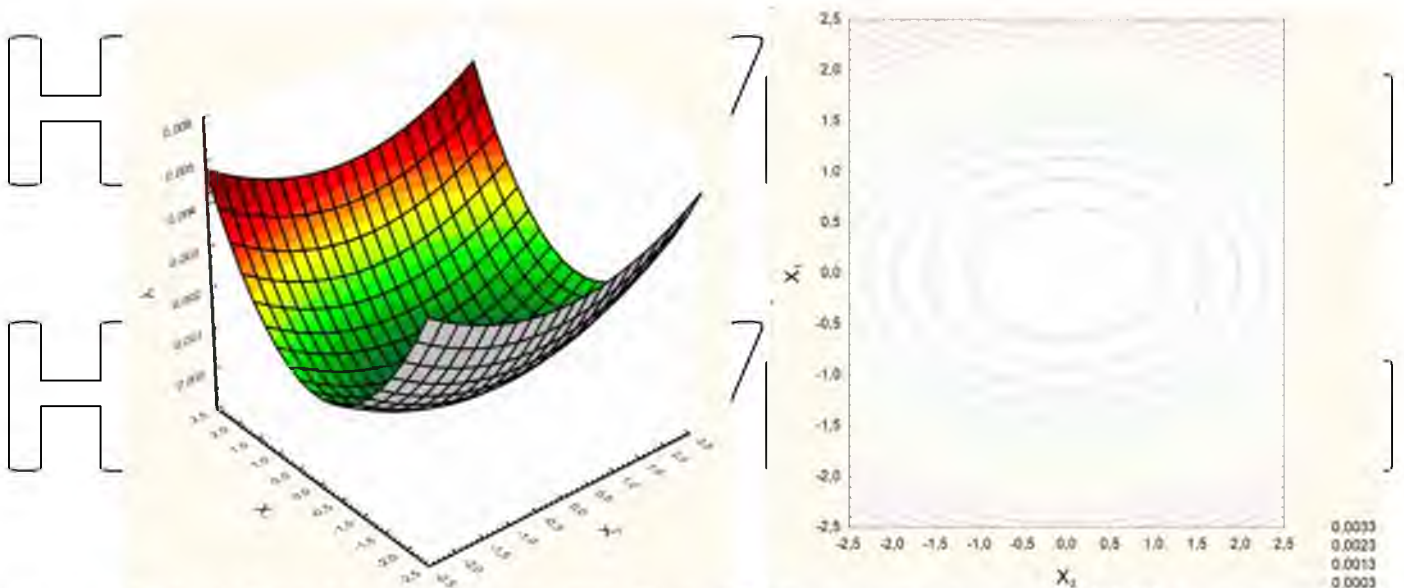


Рис. 3.11. Факторна залежність індексу однорідності псевдозрідження експериментальної зерносушаркою

3.4. Висновки про розділ 3

В результаті зіставлення всіх отриманих даних щодо дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів експериментальної зерносушарки на якість зрідження зернового матеріалу зробимо висновок:

- Діаметр отворів газорозподільного решета повинен знаходитися в межах

2,5 ... 3 мм;

- Оптимальний крок отворів 1,5 ... 2 мм;

- Відношення висоти шару до його діаметру 1,5

Аналіз графічних залежностей показує, що зміна відношення висоти шару

до діаметру апарату від його оптимального значення призводить до незначного зростання індексу однорідності, тоді як зменшення діаметра отворів газорозподільного решета тягне за собою різке збільшення неоднорідності псевдозрідженого шару зерна. Табличне значення F-критерія при рівні значущості 0,05 та числі ступенів вільності $f_1 = 19$, $f_2 = 54$, складе $F = 1,95$.

Розрахункове значення F-критерія менше табличного, відповідно можна зробити висновок про адекватність математичної моделі, що описує технологічний процес з достовірністю 0,95.

ВИСНОВКИ

1. При заданому типі сушіння найбільший вплив на якість сушіння здійснює однорідність зрідження зерна.

2. В наслідок інтенсивного теплообміну зерно нагрівається до гранично допустимої температури $55...60^{\circ}\text{C}$ вже за $50 - 200$ сек, залежно від температури агента сушіння.

3. Вибір типу газорозподільного пристрою та обґрунтування його параметрів має суттєве практичне значення.

4. В результаті проведеного аналізу конструкцій сушарок конвективної дії з псевдозрідженим зерновим шаром, а також теоретичних досліджень у цій галузі були виявлені недоліки псевдозрідженого шару. Це все робить удосконалення конструкції газорозподільного апарату сушарки з псевдозрідженим шаром дуже актуальним.

5. Розроблено теоретичну модель структури киплячого шару.
6. Теоретичними дослідженнями визначено три умови, які необхідно виконати при конструюванні газорозподільних ґрат для задовільного зрідження по всьому перерізу зернового шару.

7. Виведена система рівнянь, що дозволяє, задаючись різними параметрами газорозподільного решета, знайти відповідні значення частоти ω і амплітуди A коливань псевдозрідженого шару зерна.

8. На основі отриманої математичної моделі структури киплячого шару визначено залежність однорідності псевдозрідження від частоти та амплітуди коливань шару зерна.

9. В результаті зіставлення всіх отриманих даних щодо дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів експериментальної зерносушарки на якість зрідження зернового матеріалу визначено, що діаметр

отворів газорозподільного решета повинен знаходитися в межах $2,5...3$ мм; оптимальний крок отворів $1,5...2$ мм; відношення висоти шару до його діаметру $1,5$.

10. Аналіз графічних залежностей показує, що зміна відношення висоти шару до діаметру апарату від його оптимального значення призводить до незначного зростання індексу однорідності, тоді як зменшення діаметра отворів газорозподільного решета тягне за собою різке збільшення неоднорідності псевдозрідженого шару зерна.

11. Табличне значення F-критерія при рівні значущості 0,05 та числі ступенів вільності $f_1=19$, $f_2=54$, складе $F=1,95$. Розрахункове значення F-критерія $F_{\text{табл}}=1,503$ менше табличного, відповідно можна зробити висновок про адекватність математичної моделі, що описує технологічний процес із достовірністю 0,95.

12. Практичну цінність роботи становлять:

- експериментальні залежності оцінки кількісних і якісних показників роботи експериментальної сушарки з псевдозрідженням зернового шару від основних факторів, що впливають на її робочі процеси;

- методика визначення якості зрідження зернового матеріалу;

- раціональні технологічні режими роботи експериментальної сушарки;

- конструктивно-технологічна схема та методика розрахунку параметрів роботи експериментальної зерносушарки, що виключає перегрів та зберігає технологічні властивості зерна.

13. Наукову новизну роботи складають:

- Теоретична модель структури псевдозрідженого шару, що дозволяє пояснити природу виникнення неоднорідності зрідження;

- Математичні моделі, що описують вплив конструктивних параметрів газорозподільного пристрою на характеристики псевдозрідження;

- Розроблено технологічну схему зерносушарки псевдозрідженого шару, що дозволяє здійснити рециркуляцію зерна всередині сушарки з чергуванням циклів нагрівання-охолодження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 05/02585 Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains. (2005). *Fuel and Energy Abstracts*, 46(6), 378–379. doi:10.1016/s0140-6701(05)83083-8
2. Aboltins A. (1997). Mathematical model of deep-bed grain layer drying by ventilation. *Progress in industrial mathematics at ECMI 96*. B. G. Teubner Stuttgart, 143–149.
3. Aboltins, A. Theoretical study of material drying coefficient, *Proceedings of 12th International Scientific Conference “Engineering for Rural Development”*, May 23-24, 2013, Jelgava, Latvia, 153–158.
4. Aghbashlo, M., Kianmehr, M. H., & Samimi-Akhijahani, H. (2008). Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). *Energy Conversion and Management*, 49(10), 2865–2871.
5. Ayeni, K. I., Atanda, O. O., Krska, R., & Ezekiel, C. N. (2021). Present status and future perspectives of grain drying and storage practices as a means to reduce mycotoxin exposure in Nigeria. *Food Control*, 126, 108074.
6. Azmir, J., Hou, Q., & Yu, A. (2018). CFD-DEM simulation of drying of food grains with particle shrinkage. *Powder Technology*. doi:10.1016/j.powtec.2018.11.097
7. Azmir, J., Hou, Q., & Yu, A. (2019). CFD-DEM study of the effects of food grain properties on drying and shrinkage in a fluidised bed. *Powder Technology*. doi:10.1016/j.powtec.2019.10.021
8. Batista, J. N. M., Santos, D. A., & Bettega, R. (2020). Determination of the physical and interaction properties of sorghum grains: Application to computational fluid dynamics-discrete element method simulations of the fluid dynamics of a conical spouted bed. *Particuology*. doi:10.1016/j.partic.2020.04.005

9. Borel, L. D. M. S., Marques, L. G., & Prado, M. M. (2020). Performance evaluation of an infrared heating-assisted fluidized bed dryer for processing bee-pollen grains. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 155, 108044. doi:10.1016/j.cep.2020.108044
10. Bridges, T.C., Loewer, O.J., Jr., Walker, J.N. & Overhults, D.G. (1979). A Computer Model for Evaluating Corn Harvesting, Handling, Drying and Storage Systems. *Transactions of the ASAE*, 22(3), 6618–6621. doi:10.13031/2013.35072
11. Chen, Z., Li, P., Du, Y., Jiang, Y., Cai, M., & Cao, C. (2021). Dry cultivation and cultivar affect starch synthesis and traits to define rice grain quality in various panicle parts. *Carbohydrate Polymers*, 269, 118336.
12. Dondee, S., Meeso, N., Soponromarit, S., & Siriamornpun, S. (2011). Reducing cracking and breakage of soybean grains under combined near-infrared radiation and fluidized-bed drying. *Journal of Food Engineering*, 104(1), 6–13.
13. Ebrahimifakhar, A., & Yuill, D. (2020). Inverse estimation of thermophysical properties and initial moisture content of cereal grains during deep-bed grain drying. *Biosystems Engineering*, 196, 97–111. doi:10.1016/j.biosystemseng.2020
14. Hou, Q.F., Zhou, Z.Y., Yu, A.B. (2012). Computational of heat transfer in a bubbling fluidized bed with a horizontal tube. *AIChE journal*, 58, 5, 1422–1434
15. Hou, Q.F., Zhou, Z.Y., Yu, A.B. (2012). Micromechanical modeling and analysis of different flow regimes in gas fluidization. *Chemical Engineering Science*, 84, 449–468.
16. Hovmand, S. (1995). Fluidized bed drying. *Handbook of Industrial Drying*. Mujumdar A.S. (Ed.). New York: CRC press, 195–248.
17. Jajcevic, D., Siegmanna, E., Radeke, Ch., Khinastab, J.G. (2013). Large-scale CFD-DEM simulations of fluidized granular systems. *Chemical Engineering Science*, 98, 298–310.
18. Jumah, R. (2005). Modelling and Simulation of Continuous and Intermittent Radio Frequency-Assisted Fluidized Bed Drying of Grains. *Food and Bioproducts Processing*, 83(3), 203–210. doi:10.1205/fbp.04291

19. Lermen, F. H., Ribeiro, J. L. D., Echeveste, M. E., Milani-Martins, V. L., & Tinoco, M. A. C. (2020). Sustainable offers for drying and storage of grains: Identifying perceived value for Brazilian farmers. *Journal of Stored Products Research*, 87, 101579. doi:10.1016/j.jspr.2020.101579
20. Lopes, D. de C., Steidle Neto, A. J., & Santiago, J. K. (2014). Comparison of equilibrium and logarithmic models for grain drying. *Biosystems Engineering*, 118, 105–114. doi:10.1016/j.biosystemseng.2013
21. Luthra, K., & Sadaka, S. S. (2020). Challenges and Opportunities Associated with Drying Rough Rice in Fluidized Bed Dryers: A Review. *Transactions of the ASABE*, 63(3), 583–595. doi:10.13031/trans.13760
22. Mehran, S., Nikian, M., Ghazi, M., Zareiforush, H., & Bagheri, I. (2019). Experimental investigation and energy analysis of a solar-assisted fluidized-bed dryer including solar water heater and solar-powered infrared lamp for paddy grains drying. *Solar Energy*, 190, 167–184.
23. Nanyakenari, S., Movagharnjad, K., & Latifi, A. (2021). Evaluating the fluidized-bed drying of rice using response surface methodology and artificial neural network. *LWT*, 147, 111589. doi:10.1016/j.lwt.2021.111589
24. Özbey, M., & Söylemez, M. S. (2005). Effect of swirling flow on fluidized bed drying of wheat grains. *Energy Conversion and Management*, 46(9-10), 1495–1512. doi:10.1016/j.enconman.2004.08.00
25. Perazzini, H., Leonel, A., & Perazzini, M. T. B. (2021). Energy of activation, instantaneous energy consumption, and coupled heat and mass transfer modeling in drying of sorghum grains. *Biosystems Engineering*, 210, 181–192.
26. Sadaka, S. (2022). Impact of grain layer thickness on rough rice drying kinetics parameters. *Case Studies in Thermal Engineering*, 35, 102026. doi.org/10.1016/j.csite.2022.102026
27. Sadaka, S., & Atungulu, G. (2018). Grain Sorghum Drying Kinetics Under Isothermal Conditions Using Thermogravimetric Analyzer. *BioResources*, 13(1). doi:10.15376/biores.13.1.1534-1547

28. Scariot, M. A., Karlinski, L., Dionello, R. G., Radünz, A. L., & Radünz, L. L. (2020). Effect of drying air temperature and storage on industrial and chemical quality of rice grains. *Journal of Stored Products Research*, 89, 101717. doi:10.1016/j.jspr.2020.101717

29. Schemminger, J., Mbugu, D., & Hofacker, W. (2019). Ambient Air Cereal Grain Drying - Simulation of the Thermodynamic and Microbial Behavior. *Thermal Science and Engineering Progress*, 100382. doi:10.1016/j.tsep.2019.100382

30. Silva, G. M. da, Ferreira, A. G., Coutinho, R. M., & Maia, C. B. (2021). Energy and exergy analysis of the drying of corn grains. *Renewable Energy*, 163, 1942–1950. doi:10.1016/j.renene.2020.10.116

31. Sivakumar, R., Saravanan, R., Elaya Perumal, A., & Ithyan, S. (2016). Fluidized bed drying of some agro products – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 61, 280–301. doi:10.1016/j.rser.2016.04.014

32. Sun, Da-Wen, Woods, J.L. (1997). Deep-bed simulation of the cooling of stored grain with ambient air: a test bed for ventilation control strategies. *Journal of Stored Products Research*, 33, 4, 299–312.

33. Syahrul, S., Hamdullahpur, F., Dincer, I. (2002). Thermal analysis in fluidized bed drying of moist particles. *Applied Thermal Engineering*, 22, 15, 1689–1776.

34. Torrez Trigoyen, R. M., Giner, S.A. (2014). Drying-toasting kinetics of presoaked soybean in fluidised bed. Experimental study and mathematical modelling with analytical solutions. *Journal of Food Engineering*, 128, 31–39.

35. Yogendrasasidhar, D., & Pydi Setty, Y. (2018). Drying kinetics, exergy and energy analyses of Kodo millet grains and Fenugreek seeds using wall heated fluidized bed dryer. *Energy*, 151, 799–811. doi:10.1016/j.energy.2018.03.089

36. Ziegler, V., da Silva Timm, N., Ferreira, C. D., Goebel, J. T., Pohndorf, R. S., & de Oliveira, M. (2019). Effects of drying temperature of red popcorn grains on the morphology, technological, and digestibility properties of starch. *International Journal of Biological Macromolecules*. doi:10.1016/j.ijbiomae.2019.12.19

37. Атаназевич В.И. Сушка зерна. М.: ДеЛи принт, 2007. 480 с.

38. Аэров М.Э., Тодес О.М. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: Химия, 1968. 512 с.

39. Берегова О.М. (2001). Вплив вологості і температури на теплофізичні характеристики насіння ріпаку. Холодильна техніка і технологія, 2 (71), 49–51.

40. Берегова О.М., Станкевич Г.М. (2004). Дослідження процесу сушіння насіння ріпаку. Вісник харківського державного технічного університету сільського господарства, Вип. 5: Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв, 282–288.

41. Бурдо О.Г. Эволюция сушильных установок. Одесса: Полиграф, 2010. 368 с.

42. Бурдо О.Г., Виков О.В. (2014). Дослідження процесу сушіння в рекуперативній зерносушарці. Зернові продукти і комбікорми, 55, 47–50.

43. Гинзбург А.С. Расчет и проектирование сушильных установок пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1985. 336 с.

44. Гинзбург А.С., Громов М.А. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы. М.: Колос, 1984. 304 с.

45. Гмурман В.Л. Теория вероятностей и математическая статистика. Изд. 12-е перераб. и доп. М.: Высшее образование, 2006. 479 с.

46. Жидко В.И., Резчиков В.А., Уколов В.С. Зерносушение и зерносушилки. М.: Колос, 1982. 239 с.

47. Зберігання і переробка продукції рослинництва: навч. посіб./ Г.І. Подпрятков, Л.Ф. Скалецька, А.М. Сеньков, В. . Хилевич. К.: Мета, 2002. 495 с.

48. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок. М.: Госэнергоиздат, 1963. 320 с.

49. Левин М.Д. Термодинамическая теория и расчет сушильных установок. М.: Пищепромиздат, 1969. 289 с.

50. Мельников С.В., Ацелкин В.Р., Рошин П.М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Л.: Колос, 1980. 168 с.

51. Мухлев И.П., Сажин Б.С., Фролов В.Ф. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник. Л.: Химия, 1986, 352 с.

52. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Петрова Ж.А. (2011). Вплив режимів режиму сушіння на якісні показники зерна насіннєвого призначення. Наукові праці ОДАХТ, Одеса, Вип. 40, Т.1. С. 39–43.

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

54. Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва / Л.Ф. Скалецька, Т.М. Духовська, А.М. Сеньков. К.: Вища школа, 1994. 301 с.

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

56. Янцевич А.А., Александров Ю.А. Планирование эксперимента: Учеб. пособ. для студ. экон. и техн. спец. Вузов. Х.: Издательство НУА, 2004. 208 с.

ДОДАТКИ