

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний аграрний університет

Інженерно-технологічний факультет

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідуючий кафедри АІ та ТС,
к.т.н., проф.
В.М.Бандура
“ _____ ” _____ 2019 р.

**Пояснювальна записка
до магістерської кваліфікаційної роботи за спеціальністю
208 «Агроінженерія»**

**НА ТЕМУ: «ОБГРУНТУВАННЯ РЕЖИМІВ СУШІННЯ
ДРІБНОНАСІННЄВИХ КУЛЬТУР»**

Виконав: студент групи 61АІ маг
Залевський Олександр Миколайович

Науковий керівник:
к.т.н. проф. Бандура В.М.

2019

ВСТУП

В умовах сучасних економічних відносин зернопереробні господарства змушені шукати нові форми та методи господарювання. Багато господарств, особливо ті, що не мають власної переробки, повністю зорієнтовані на продаж усєї продукції. У цих умовах особливого значення набуває пошук нових нетрадиційних культур, які були б рентабельними. Господарства все частіше стали звертати увагу на сорго та ріпак.

Виробництво зернових та олійних культур у значній мірі залежить від завдань, що ставить агропромисловий комплекс України, при цьому не менш важлива роль належить питанням зберігання зерна, як для внутрішнього споживання (продовольчі, кормові цілі), так і для розв'язання комерційних задач – експорту зерна. Останнім часом таким, давно відомим дрібнонасінневим культурам, як ріпак, сорго та іншим, приділяють велику увагу. Оскільки виробництво цих культур зростає, то для визначення оптимальних режимів їх післязбиральної обробки (сушіння, активне вентилявання, охолодження) та зберігання треба мати повний перелік та числові значення фізико-технологічних та теплофізичних характеристик.

Свіжозібрані дрібнонасінневі культури, як правило, мають підвищену вологість, що може за кілька годин призвести до їх самозігрівання і псування. Для обґрунтування методів та режимів активного вентилявання і сушіння дрібнонасінневих культур особливе значення мають масообмінні властивості.

При проведенні післязбиральної обробки зерна на окремих його стадіях дрібнонасінневі культури піддаються певному термічному впливу. Це стосується, насамперед, процесів сушіння та охолодження. Між тим, термічна обробка – це складний технологічний процес, при якому у дрібнонасінневих культур відбуваються чисельні фізико-механічні та біохімічні зміни, часом незворотні. Крім того, термічні процеси є найбільш енергозатратними.

Таким чином, розробка та обґрунтування ефективних режимів термічної обробки і зберігання дрібнонасінних культур є актуальною задачею.

Метою роботи є розробка ефективних режимів термічної обробки дрібнонасінних культур, які дозволять знизити енерговитрати на їх післязбиральну обробку.

Для досягнення поставленої мети визначено такі основні завдання:

- дослідити фізико-технологічні властивості дрібнонасінних культур;
- визначити гранулометричний склад дрібнонасінних культур;
- уточнити теплофізичні характеристики зернової маси дрібнонасінних культур;
- дослідити кінетику конвективного та мікрохвильового сушіння дрібнонасінних культур в залежності від параметрів зернових мас та режимів сушіння;

Об'єкт дослідження – технологія термічної обробки та зберігання дрібнонасінних культур (сорго та ріпак).

Предмет досліджень – властивості дрібнонасінних культур, процеси їх сушіння, нагрівання, охолодження та зберігання.

Методи дослідження – експериментальні, аналітичні, хімічні, математико-статистичні.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПРОБЛЕМИ СУШІННЯ ДРІБНОНАСІННЄВИХ КУЛЬТУР

1.1. Загальна характеристика дрібнонасінневих культур

Україна потужний світовий виробник та експортер зерна. Однак вирощений врожай вимагає збирання в стислий строк з високими темпами післязбиральної обробки. Більш половини врожаю необхідно очищувати і сушити. Тут криються основні втрати зерна, що в окремі роки досягають третини всього прибраного зерна [16, 24]. Тому так важливо забезпечити зберігання отриманого врожаю, не допустити зниження якості зернової сировини в процесі транспортування і зберігання, а також якості готової продукції при його переробці і зберіганні. Тому недостатньо сформувані товарні партії зерна і знати його якість, їх необхідно зберегти як у кількісному, так і в якісному співвідношенні.

Останнім часом таким, давно відомим дрібнонасінневим культурам, як ріпак, гірчиця, сорго, льон та іншим, приділяють велику увагу.

Сорго культура всебічного використання, за об'ємами виробництва стоїть на п'ятому місці серед зернових в світі.

Сорго використовується для виробництва каш, борошна, яка використовується в виробництві традиційних сортів хліба в Америці і Індії. В Китаї та Західній Америці сорго використовується для виготовлення популярних місцевих сортів пива. В Центральній Америці сорго використовують в приготуванні традиційних солодошів. На Африку приходить 40 % світового виробництва і споживання сорго [26].

Що стосується внутрішнього застосування, то велика доля сорго в США використовується для виробництва кормів для великої рогатої худоби та птиці, де сорго виступає заміником кукурудзи. Хоча в США і Європі сорго культивується переважно як кормова рослина, більше

половини світового споживання припадає на харчові цілі. Широкого застосування сорго набуло також і в інших країнах, наприклад в Африці за останніх 5 років попит на сорго збільшився на 30 %, що перевищує темпи росту населення регіону [35].

За об'ємами споживання сорго Нігерія за останній рік випередила традиційного лідера – Мексику. Сорго – основна зернова культура Нігерії, на неї приходить більше 45 % сільськогосподарського угіддя. При цьому основна маса сорго використовується в харчовій промисловості країни [35].

В Мексиці, навпаки, сорго використовують для виробництва комбикормів, які в останні роки інтенсивно розвиваються за рахунок галузі птахівництва. Країна імпортує приблизно 40 % сорго (3,0...3,5 млн. тонн за рік), в основному з США.

В майбутньому передбачається, що на світове споживання сорго буде впливати зацікавленість до використання культури в сегменті здорового харчування та галузі з виробництва етанолу.

Виробництво сорго в Україні є достатньо перспективним та заслуговує великої уваги. По-перше, за невибагливі до складних агрометеорологічних умов (його ще називають «верблюдом» рослинного світу). По-друге, сорго має дуже стабільну продуктивність в складних ґрунтово-кліматичних умовах. По-третє, сорго формує зерно з високими кормовими та харчовими цінностями (вміст крохмалю 70...75 %, білка – 12...14 %, жиру – 3...5 %). В 100 кг зерна міститься 120...130 кормових одиниць [28, 35]. Крім того, варто відмітити достатньо високу економічну ефективність виробництва сорго.

Для перспективного розвитку вітчизняного аграрного сектора і вирішення актуальних завдань подолання наслідків економічної кризи велике значення мають заходи щодо нарощування виробництва насіння олійних культур, підвищення їх якості. Поряд з традиційною для України культурою – соняшником, особлива увага належить *ріпаку*, олія якого

завдяки унікальним біологічним та хімічним властивостям широко використовується не тільки в продовольчих цілях, але й в багатьох галузях промисловості. Тому в останні роки ріпак дедалі ширше використовується як енергетична культура, з насіння якої виробляється альтернативне біодизельне паливо. Проблема пошуку альтернативних видів енергоресурсів для України є однією з найактуальніших [1, 32].

Враховуючи євроінтеграційні прагнення України, Кабінет Міністрів постановою від 22 грудня 2006 року № 1774 затвердив «Програму розвитку виробництва дизельного біопалива», яка намічає основні орієнтири виробництва та споживання всіх видів біопалива в нашій країні з урахуванням сучасних європейських орієнтирів.

З урахуванням цього в Україні, яка має намір співпрацювати з країнами ЄС, повинно вироблятися та споживатися з 2010 році не менш як 520 тис. тонн усіх видів біопалива [1, 32].

Загалом згадана програма спрямована на розв'язання таких основних завдань:

- створення сировинної бази для виробництва дизельного біопалива;
- розроблення енергозберігаючих технологій вирощування ріпаку;
- розширення площ вирощування ріпаку, підвищення його врожайності;
- створення зон концентрованого вирощування ріпаку з метою наближення джерел сировини до місць виробництва дизельного біопалива;
- створення технічної бази вирощування, зберігання та переробки сировини, зокрема шляхом реалізації пріоритетних інноваційних проектів будівництва заводів з виробництва біодизелю [32].

Основною сировиною для виробництва біодизелю в Україні, як і в інших країнах ЄС, є насіння ріпаку. У країнах ЄС біопаливо використовується як у чистому вигляді, так і в суміші з дизельним. Найпоширенішим видом дизельного біопалива є метиловий ефір олії ріпаку.

Оскільки в Україні відбувається стрімке зростання площ вирощування ріпаку, а відповідно – зменшення посівних площ інших культур, необхідно враховувати агротехнологічні особливості його вирощування та споживчі якості.

Щодо доцільності переходу забезпечення сільськогосподарських товаровиробників біопаливом, що виробляється з ріпаку, свідчить досвід таких країн, як Німеччина, Франція, Австрія, Чехія, США, де для вирощування ріпаку використовується 10...14 відсотків ріллі [1, 32, 46].

Програмою визначається перспектива розвитку ріпаківництва, зокрема створення регіональних зон концентрованого вирощування озимого і ярого ріпаку площею від 50 до 70 тис. гектарів та технічної бази з виробництва дизельного біопалива [32].

Збільшення площі посівів ріпаку до 10 відсотків загальної площі ріллі в Україні і переробка 75 відсотків вирощеного врожаю на дизельне біопаливо дасть змогу розв'язати проблему стабільного постачання енергоресурсів аграрному секторові економіки з використання власного відновлювального джерела.

Переробка насіння ріпаку в Україні не відповідає обсягам його вирощування, за даними експертів, майже 99 % вирощеного насіння буде експортоване [1, 46].

Таким чином, виробництво ріпаку в Україні сьогодні та найближчими роками буде орієнтоване на експорт сировини.

Однак при вирощуванні насіння ріпаку необхідно враховувати багато факторів, щоб запобігти виснажуванню ґрунтів. Спеціалісти вважають, що впровадження ефективних технологій вирощування ріпаку, контроль над дотриманням сівозміни і організація його переробки в Україні є більш ефективним ніж зменшення об'ємів вирощування цієї культури.

Навіть при зниженні врожайності та підвищення собівартості, виробництво ріпаку залишається рентабельним, оскільки ціни реалізації перевищують собівартість одиниці продукції в 1,2...1,4 рази, що свідчить

про досить стабільний стан галузі та перспективи подальшого її розвитку [46].

Але відсутність нових нормативів для зберігання та переробки насіння, передових вітчизняних технологій та технік, методик та оснащення для визначення якості насіння створюють значні проблеми для розвитку виробництва біопалива з насіння ріпаку.

1.2. Технологічні властивості зернової маси

Зернову масу можна класифікувати як суміш наступних компонентів: суміші неоднорідних зерен (або насіння) основної культури і зерен (насіння) інших культур, схожих за характером використання із зерном основної культури; домішок органічного і мінерального походження; мікроорганізмів; комах і кліщів, а також повітря міжзернових просторів, яке може істотно відрізнятися від повітря навколишнього середовища за температурою, відносною вологістю і тиском [13, 22, 23].

Зерно (зернова маса) як об'єкт зберігання характеризується фізичними, теплофізичними, масообмінними і фізіологічними властивостями.

1.2.1. Фізико-механічні властивості.

Знання фізико-механічних властивостей зернової маси як сипкого матеріалу дозволяє розв'язувати велику кількість прикладних задач, які мають практичне значення. Так, механізація і автоматизація транспортування, післязбиральна обробка і зберігання в сховищах (складах, силосах, металевих бункерах) базуються на фізичних властивостях зернової маси. За показниками, що визначають сипкість, можна моделювати поведінку зернової маси при переміщенні по самопливах, ситах, тощо. Вміле використання цих властивостей дозволяє скоротити втрати, поліпшити якість партій зерна й знизити витрати у всіх

галузях народного господарства, пов'язаних з виробництвом і використанням зерна.

Основні властивості зернової маси, що використовуються практикою, можна розділити на дві групи:

перша – властивості, що характеризують зернову масу;

друга – властивості, що характеризують процеси, що протікають у зерновій масі.

До першої групи відносять структурно-механічні, силові й фрикційні, до другої – теплофізичні, аеродинамічні та електрофізичні властивості [13].

Серед фізико-механічних властивостей зернової маси насамперед розглядають такі показники як натуру, кут природного укусу, масу 1000 зерен, шпаруватість, розмірні характеристики окремих зернин, коефіцієнти тертя та інші.

Натурою називається маса одного літру зерна в грамах. На величину натури впливають: домішки, стан поверхні зерна, форма зерна, крупність, вологість, зрілість та виповненість зерна, маса 1000 зерен, тощо [13, 22].

Наявність домішок дає неточні дані про натуру зерна. Важкі домішки (шматочки землі, галька, пісок) збільшують, а легкі (квіткові плівки, шматочки соломи) — зменшують натуру зерна. Дрібні сміттєві домішки, розподіляючись в міжзерновому просторі, підвищують натуру [22].

На сипкість зернової маси впливає багато факторів. Основними з них являються гранулометричний склад і грануломорфологічна характеристика зерна. Найменший кут тертя і кут природного укусу, тобто найбільшу сипкість, мають зернові маси, які складаються із зерен та насіння шароподібної форми з гладкою поверхнею. Чим більше відхиляється форма зерен від шароподібної форми і чим менш гладка їх поверхня, тим менша сипкість зернової маси [43]. З підвищенням вологості зернової маси її сипкість значно зменшується, а кут природного укусу значно

збільшується. В меншій мірі це проявляється в зерновій масі із шароподібних зерен з гладкою поверхнею [22].

Відомо, що шпаруватість (відношення об'єму міжзернового простору до всього об'єму зернової маси, у відсотках) більше впливає на теплопровідні і сорбційні властивості сипкої маси, що особливо важливо при зберіганні. Чим менше шпаруватість, тим більше щільність укладання, тобто більше насипна маса одиниці об'єму зерна. Спосіб укладання зернин значною мірою впливає на шпаруватість зернової маси. Так, засипання одного і того самого зерна у сховища з різною висотою, різні ущільнення зернової маси можуть суттєво змінити частку міжзернового простору [43].

Гранулометричний склад – характеристика, що визначає геометричні розміри частинок і співвідношення їх розмірів в загальному об'ємі сипкого матеріалу, тобто гранулометричний склад – це розподіл за крупністю частинок, визначається розміром найбільших частинок, що містяться в пробі, якщо їх не менше 10.

При визначенні розмірів місткостей, діаметрів самопливів, матеріалопроводів пневмотранспорту, а також при розрахунках термодинамічного характеру використовуються такі показники: форма, об'єм і поверхня одиничних зернин.

Зерно за формою відрізняється від шару. Ступень цієї відмінності оцінюється сферичністю ψ , що представляє собою відношення площі поверхні кулі F_k , рівної за об'ємом зернині до дійсної поверхні зернини F_z .

Зміни в розмірах впливають на такі показники як об'єм зернини V_z , площу зовнішньої поверхні F_z , сферичність ψ і питому поверхню (відношення V_z/F_z) зернини, відображається на вирівненості за крупністю, а останнє, як відомо, визначає ефективність ведення технологічного процесу [13, 15].

Задовільні результати отримують, використовуючи формулу [15]:

$$V_z = k \cdot a \cdot b \cdot l, \quad (1.1)$$

де V_z – об'єм зернини, мм³;

k – коефіцієнт, що враховує форму зерна;

a, b, l – лінійні розміри зернівки, мм

Для визначення площі зовнішньої поверхні зернівки використовується розрахунковий метод:

$$F = 4\pi R(l + 3R), \quad (1.2)$$

де R – радіус зернівки, мм:

$$R = \frac{5a + 6b}{60}. \quad (1.3)$$

Для характеристики гранулометричного складу дисперсного матеріалу, що складається з часток неправильної форми, зазвичай вводять поняття еквівалентний діаметр d_e , що визначається як діаметр шару з об'ємом рівним об'єму зернівки [13, 27].

1.2.2. Гігроскопічні властивості.

Важливий вплив на стан зернової маси при зберіганні і, особливо, при первинній обробці має її гігроскопічність, тобто здатність до сорбції і десорбції парів води. Зволоження зерна в результаті сорбції під час зберігання створює умови для підвищення життєдіяльності насіння, мікроорганізмів та інших живих організмів [43]. Гігроскопічні властивості мають також особливе значення для обґрунтування методів та режимів активного вентилявання і сушіння зерна.

В роботі [2] наведено дані рівноважної вологості зерна сорго при температурі повітря 25 °С та відносної вологості повітря 10...100 %.

В роботі [47] представлені дані рівноважної вологості ріпаку. Наведено ізотерми сорбції і десорбції насіння ріпаку сорту Галицький при температурах 3, 15 та 26 °С. Діапазон відносної вологості повітря, при якій проводили досліди автори, становив 50...80 %, Дослідження проводили при вологості насіння ріпаку 5 %...14 % [4].

Результати представлені в [4] показали, що найбільше активне поглинання вологи відбувається при температурі 25 °С і відносній

вологості повітря 75 %, найменша рівноважна вологість ріпаку спостерігається при температурі повітря 5 °С та його відносній вологості 55 %.

За даними роботи [47] розрахункове значення критичної вологості для насіння ріпаку з вмістом олії 41,6...42,6 % становить 8,2...8,4 %. З наведених вище даних витікає, що при відносній вологості повітря 82 %, рівноважна вологість насіння, яка встановлюється в процесі зберігання, вище критичної вологості. За таких умов в насінні ріпаку відбуваються інтенсивні біохімічні процеси, що призводять до погіршення якості насіння і навіть його псування. У книзі [2] наведена таблиця залежності рівноважної вологості насіння озимого ріпаку від відносної вологості повітря. Так, при відносній вологості повітря $\varphi = 60,7$ % рівноважна вологість насіння дорівнює 7,42 %, а при відносній вологості повітря $\varphi = 76,5$ % складає 9,64 %. З підвищенням температури величина рівноважної вологості, як правило, зменшується: при підвищенні температури на 10 °С рівноважна вологість знижується на 0,6...0,7 %.

1.2.3. Теплофізичні характеристики.

Для техніко-технологічних розрахунків, що стосуються процесів нагрівання, сушіння та охолодження, також необхідно знати теплофізичні характеристики, що залежать від температури t , вологості w та виду зернової культури [11].

Характер перебігу теплових процесів визначається теплофізичними властивостями зерна, до яких відносяться:

- питома теплоємність (c), яка показує інтенсивність зміни температури зерна при його нагріванні чи охолодженні;
- коефіцієнт теплопровідності (λ), який характеризує здатність зерна проводити теплоту;

– коефіцієнт температуропровідності (a), якій визначає здатність зерна пропускати температурну хвилю, характеризує швидкість вирівнювання температури в різних точках температурного поля;

– коефіцієнт теплової активності (ε) – це комплексна величина, що характеризує відведення теплоти поверхні всередину зерна (або підведення теплоти із середини зерна до його поверхні) [11, 42].

Проблеми визначення теплофізичних характеристик зерна полягають не тільки в складності їх вимірювання, а в тому, що вони змінюються при зберіганні і переробці у зв'язку зі змінами вологості, температури, густини, натури, розмірів частинок, щільності їх укладання, тощо. Тобто фактичні дійсні значення теплофізичних характеристик за умовами зберігання і переробки зерна зазвичай не визначаються безпосередніми вимірюваннями. Це пов'язано з тим, що шар зерна уявляє систему зі складними і різноманітними характеристиками.

Для шару зерна теплофізичні характеристики в основному визначаються з урахуванням шпаруватості, тобто з урахуванням теплофізичних характеристик повітряного простору, і визначаються як середньозважена величина між частками сухої речовини, води і повітря. Однак це будуть наближені значення, а для точних розрахунків необхідно проведення спеціальних експериментів в широкому діапазоні вологості зерна [43].

При вологості 14...25 % і температурі 15...30 °С середні значення теплофізичних характеристик зерна змінюються у досить широких межах: $c_3 = (1300...2200)$ Дж/(кг·К), $\lambda_3 = 0,13...0,2$ Вт/(м·К), $a_3 = 40...200 \cdot 10^9$ м²/с.

Як відомо з літературних джерел [11, 13, 39, 43] при передачі теплоти конвекцією коефіцієнти теплообміну складають: при нагріванні і охолодженні газів $\alpha = 10...150$ Вт/(м²·К), при нагріванні і охолодженні води $\alpha = 200...10000$ Вт/(м²·К), при конденсації водяної пари $\alpha = 4000...15000$ Вт/(м²·К), при краплинній конденсації $\alpha = (40...100) \cdot 10^{-9}$ Вт/(м²·К). За даними Г.А. Єгорова [13] при нагріванні зерна конвекцією в

повітряному середовищі коефіцієнт теплообміну $\alpha = 23 \dots 29 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°К})$, а в струмені водяної пари в $5 \dots 6$ разів більше, тобто $\alpha = 100 \dots 170 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°К})$.

В літературі [8, 11, 13, 15, 39, 42, 43] приводяться дані теплофізичних характеристик переважно для зерна пшениці, ячменю, рису, кукурудзи, гороху, а для дрібнонасіньових культур або зовсім не вивчені, або наведені для вузького діапазону зміни параметрів навколишнього середовища.

Найбільш повні дані з теплофізичних характеристик наведені в [11], зокрема є чисельні значення питомої теплоємності для цілого ряду зернових (пшениця, жито, овес, ячмінь, кукурудза, просо, сорго), зернобобових (горох, соя, кормові боби) і ряду інших культур. Там же наведені різні емпіричні формули для визначення питомої теплоємності залежно від вологості і температури зерна, а також їх сумісного впливу.

Sharma D.K., Thompson T.L. [50] проводили дослідження залежності питомої теплоємності насіння сорго від температури та вологості. Вологість зерна сорго змінювали в межах $2 \dots 29 \%$, температура в межах $15 \dots 27 \text{ °С}$ і встановили емпіричну залежність.

За даними статті [49] питома теплоємність насіння ріпаку зростає від 1397 до 1807 Дж/(кг·К) при температурі 2 °С , зі збільшенням вологості від 5,45 до 19,64 %, а при температурі 19 °С змінюється від 1481 до 1812 Дж/(кг·К) зі збільшенням вологості насіння від 5,5 до 15,5 %.

У роботі [49] показано, що питома теплоємність насіння ріпаку залежить від сорту і при збільшенні вологості у межах 3,62...8,40 % змінюється від 1432 до 1830 Дж/(кг·К) для сорту Arlo і від 1537 до 1792 Дж/(кг·К) – для сорту Oro.

Автори роботи [4] стверджують, що підвищення температури насіння ріпаку при даній вологості призводить, в основному, до збільшення коефіцієнта теплопровідності. При вологості насіння ріпаку близько 15 % в інтервалі температур $24 \dots 36 \text{ °С}$ теплопровідність ріпаку практично не змінюється. Коефіцієнт температуропровідності насіння ріпаку при температурі $22 \dots 24 \text{ °С}$ зі збільшенням вологості спочатку

збільшується, а потім зменшується. При температурі 35 °С зменшення коефіцієнта температуропровідності починається з меншої вологості, а при вологості 15 % і вище він знову зростає.

Аналіз літературних джерел [4] показує, що зі збільшенням вологості від 6 до 20 % значення теплофізичних характеристик зростають за винятком коефіцієнта температуропровідності, для якого вологість зерна 15 % є «критичною», а також встановлено, що температура зерна значно менше впливає на теплофізичні характеристики, ніж його вологість..

1.3. Технологія та технологічні процеси термічної обробки зерна

При проведенні післязбиральної обробки зерна на окремих його стадіях дрібнонасіневі культури піддаються певному термічному впливу. Це стосується, насамперед, процесів сушіння та охолодження.

1.3.1. Конвективне сушіння зерна.

Своєчасне і правильне проведення сушіння зерна не тільки підвищує його стійкість під час зберігання, а й поліпшує продовольчі та насінневі якості зерна. В результаті сушіння прискорюється післязбиральне дозрівання, вирівнюється вологість та змінюються технологічні властивості. Сушіння позитивно впливає на вихід та якість зерна і продуктів його переробки.

Огляд літератури показав, що наукові праці присвячено, в основному, проблемам селекції та агротехніки вирощування і збирання насіння. На жаль, майже відсутні дослідження процесу сушіння дрібнонасіневих культур, що вирощуються в Україні. Між тим, сушіння є важливою ланкою у процесі післязбиральної обробки збіжжя [37].

При сушінні дрібнонасіневих культур треба урахувати особливості їх фізико-механічних властивостей, які різко відрізняються

від інших зернових культур [45]. Як відмічають автори [38], при сушінні дрібнонасіньових культур у шахтних зерносушарках подачу агента сушіння і повітря слід зменшити, щоб уникнути винесення насіння з шахти сушарок.

У насінні олійних культур міститься значна кількість рослинного жиру, який дозволяє без погіршення якості більш високе нагрівання, ніж білок чи крохмаль. Однак наявність у насіння цих культур лузги та прошарку повітря навколо ядра створює перешкоди для виходу на зовні вологи, що випаровується. При високій температурі сушильного агента і швидкому нагріванні ядра під лузгою накопичується водяна пара, що може призвести до її розтріскування. Чим вище вологість насіння олійних культур, тим нижча повинна бути температура сушильного агента.

Для гарантованого зберігання насіння ріпаку протягом тривалого часу (180 діб) рекомендують його піддати сушінню до вологості 8 %. Автори [4] відмічають, що навіть при вологості 12...13 % насіння технологічно не придатне до зберігання і може самозігріватися. При вологості 20 % самозігрівання починається вже через 2...4 години. Для промислової переробки вологість насіння не повинна перевищувати 15 % і мати не більше ніж 2 % домішок.

У роботі [4] проводились дослідження стосовно сушіння насіння ріпаку та вибору ефективних режимів сушіння ріпаку товарного і насінневого призначення в шахтних зерносушарках. За початкову вологість насіння взята вологість 15 %. Було встановлено, що основним параметром режиму сушіння насіння ріпаку, який найбільше впливає на його властивості, є температура сушильного агента. Досліди в цієї роботи проводили при двох режимах сушіння: температура агента сушіння при першому режимі становила 70 °С, а при другому –100 °С. Кінцева вологість насіння ріпаку становила 6 %. Також виявлено вплив температури нагрівання на якість насіння, визначено кислотне число

ріпакової олії, а також енергію проростання та схожість насіння до і після сушіння.

Дослідження [4, 37] показали, що основним фактором процесу сушіння, який суттєво впливає на схожість і кислотне число насіння ріпаку, є температура сушильного агента. Наступним за ступенем впливу на схожість є початкова вологість, а на кислотне число – початкова температура насіння. Температура насіння перед сушінням майже не впливає на схожість. На кислотне число ріпакової олії зовсім не впливає початкова вологість насіння.

Процес сушіння не погіршує харчової якості ріпакової олії: значення кислотного числа до і після сушіння відрізняються незначно. Насіння ріпаку продовольчого, кормового та технічного призначення можна сушити при температурі сушильного агента 100 °С. Розроблена принципова схема первинної обробки насіння ріпаку [4, 37].

У [36] наведено режими сушіння насінневого ріпаку в шахтних прямотечійних сушарках. Гранично допустима температура насіння 35...40 °С, агента сушіння 55...65 °С в залежності від вологості.

Ряд робіт [41, 45] присвячений оптимальним режимам і способам сушіння дрібнонасіньових культур. Досліджувався ріпак з вологістю 28,0 і 12,3 %. Експериментально доведено, що таке зростання вологості призводить до росту тривалості процесу сушіння до 40 %. Температура агента сушіння варіювалася від 50 до 80 °С. Сушіння насіння ріпаку здійснювалось під вакуумом, на конденсаційній установці у продуваемому і нерухомому шарі. Як критерій збереження посівних якостей прийнято схожість насіння ріпаку. Результати дослідів показали, що при температурі сушильного агента 50 °С при кінцевій вологості 6...9 % насіння ріпаку зберігають найкращу життєдіяльність. Сушіння насіння ріпаку нижче вказаної вологості призводить до зниження посівних якостей на 65 %. Різні режими сушіння на енергію проростання і схожість не оказують, але визначальним є тривалість процесу. Встановлено, що для сушіння

насінневого ріпаку краще використовувати конвекційні зерносушарки. Така зерносушарка дає можливість скоротити витрати енергії на видалення 1 кг вологи в залежності від початкової вологості в 1,6...2,0 рази.

Артёмов І.В., Філатов Г.А. і Мамонцев І.П. [3] досліджували процес сушіння насіння ріпаку у щільному шарі на касетній лабораторній установці. Касети висотою 5 см з насінням ріпаку розташовували у вертикальній сушильній колонці. Сушильний агент при температурі 150 °С і швидкості 1,3 м/с пронизував шар насіння знизу вгору; початкова вологість насіння 30 %. Вимірювали температуру сушильного агента над кожною касетою та температуру насіння в касеті. Наприкінці досліду (120 хв) різниця температур сушильного агента і насіння в касеті становила 5...6 °С. Показником якості насіння ріпаку після сушіння автори вибрали схожість. У нижній касеті температура насіння досягала 130 °С після 15 хв нагрівання, вологість насіння знижувалась до 7,0 %. Насіння при цьому повністю втрачало схожість. У наступній касеті вологість насіння знизилась до 12 % за 120 хв; насіння при цьому прогрілося до 60 °С (схожість 85 %). За той же час у верхніх трьох касетах вологість насіння знизилась всього на декілька відсотків (температура насіння піднялася до 37...45 °С). Це свідчить про те, що для інтенсифікації процесу сушіння насіння ріпаку максимальна товщина шару насіння повинна бути близько 100 мм, бо шпаруватість насіння ріпаку досить мала і сушильний агент не може ефективно прогріти шар більшої товщини.

Зерно сорго насінневого призначення можна сушити у бункерах, що вентилуються, з використанням повітророзподільників різних типів (табл. 1.1) [39].

Режими сушіння насіння сорго у бункерах, що вентилюються [39]

Початкова вологість насіння, %	Питомі витрати сушильного агента, м ³ /(год·т)	Температура сушильного агента, °С	Тривалість сушіння насіння до середньої вологості 13 %, год
≤ 14	400	42	16
16	500	37	28
18	600	35	37
20	650	32	43
22	700	30	48

В роботах іноземних вчених представлено дані, щодо сушіння зерна сорго у щільному нерухомому шарі [48]. Автори роботи [50] для сушіння зерна сорго на промислові цілі рекомендують збільшувати температура агента сушіння у межах 80...110 °С. Також автори встановили, що температура зерна на виході з сушарки складає 13,8 °С. Наведено закономірності зміни вологості за одиницю часу і зміни температури за одиницю часу, побудовано криві швидкості сушіння і температурні криві сушіння.

1.3.2. Активне вентилювання.

В організації технології обробки зерна, яке приймається на зберігання, важливу роль відіграє активне вентилювання зерна.

Активне вентилювання виконується за умовами:

– вологість зерна вища за його рівноважну вологість;

– необхідності витримувати мінімальні об'єми повітря в процесі обробки;

– забезпечення рівномірного розподілу повітря в зерні та безпечну тривалість процесу [8].

При розрахунках та проектуванні установок активного вентилявання зерна необхідно враховувати його аеродинамічні властивості та опір зернової маси повітряному потоку. У деяких випадках активне вентилявання зерна атмосферним повітрям є практично єдиним найбільш ефективним способом приведення зерна в стійкий для збереження стан і підвищення його якості, наприклад, при обробці олійних культур, насінневого зерна і у деяких інших випадках.

Авторами роботи [26] при дослідженні залежності статичного тиску від висоти шару зерна і витрат повітря для зерна сорго встановлено, що статичний тиск зростає зі збільшенням висоти шару зерна і збільшенням витрат повітря. Опір повітряного потоку тим більший, чим менші розміри має насіння [26]. Аеродинамічний опір, насамперед, залежить від щільності насипу, тобто шпаруватості шару зерна [31].

Найнижчі енерговитрати при вентиляванні досягаються при використанні атмосферного повітря. Його температура повинна бути нижчою на 5 °С і більше в порівнянні з температурою зерна. У вологу погоду ця різниця повинна становити не менш як 8 °С. В такому разі зерно буде ефективно охолоджуватись [8].

При підігріванні повітря на 3...5 °С його відносна вологість знижується на 12...20 %. В цьому випадку вентилявання буде вже забезпечувати сушіння зерна. Для підвищення швидкості сушіння необхідно збільшувати питому подачу повітря [8].

Режими вентилявання [19, 25] насіння ріпаку промислового призначення у складах наведено у табл. 1.2.

Режими вентилявання насіння ріпаку промислового призначення

Вологість насіння, %	Установка СВУ-1		Установка СВУ-2	
	Питомі витрати повітря, м ³ /(год·т)	Висота шару, м	Питомі витрати повітря, м ³ /(год·т)	Висота шару, м
До 8	40	2,5	40	3,0
3 8 до 10	–	–	70	2,5
3 10 до 15	–	–	110	2,0

У зв'язку з тим, що дрібнонасінневі культури мають більший аеродинамічний опір у порівнянні з іншими культурами, товщину шару зерна при активному вентиляванні необхідно зменшувати. Олійні культури можна вентилявати підігрітим повітрям (до 60 °С). Однак підвищення температури повітря прискорює процес сушіння, але супроводжується ростом нерівномірності знімання вологи по товщині шару з пересушуванням нижніх шарів і зволоженню верхніх.

1.3.3 Мікрохвильова обробка і сушіння.

На сьогодні переважний розвиток отримала електромагнітна обробка зерна. Механізм впливу електромагнітного поля на дисперсні системи, у тому числі на зернові маси, досліджується тривалий час. Позитивний вплив електромагнітного поля на посівні якості зерна досліджувався вченими України, Росії та інших країн на протязі останніх 50 років [5, 6, 7, 9, 10, 12, 18, 43, 33, 44].

Основна перевага мікрохвильового (МХ) нагрівання – здатність мікрохвильового електромагнітного поля проникати на значну глибину зернової маси, тим самим створюючи об'ємне розподілення потужності

джерел теплоти. У результаті процеси теплопровідності при МХ нагріванні грають меншу роль, ніж при нагріванні теплоносіями, тому тривалість нагрівання зерна мікрохвильовою енергією значно менше.

Збереження насінневих і продовольчих властивостей зерна залежить від температури нагрівання, швидкості нагрівання, часу витримки при максимальній температурі. Значення температури нагрівання слід зв'язати зі способом обробки. В щільному малорухомому шарі спостерігається значна нерівномірність нагрівання зерен, у зв'язку з цим середнє значення максимальної допустимої температури не повинно перевищувати 50 °С.

Над вирішенням питання про вплив мікрохвильового електронного поля на біологічні об'єкти, яким є зернова маса, працювали вчені багатьох країн [17, 20].

Автори роботи [20] досліджували вплив МХ-поля на деякі біохімічні показники зерна пшениці і ячменю. Зерно обробляли на лабораторній мікрохвильовій установці «Артеміда» загальною потужністю 1,5 кВт і на установці «Імпульс-3У» загальною потужністю 3 кВт і частоті 2450 МГц. У результаті мікрохвильової обробки вміст білку збільшився у середньому на 5...8 %, концентрація амінокислот знизилась у середньому на 7...11 %.

Розроблена нова інноваційна технологія і пристрій МХ сушіння зернових і олійних культур [30], що забезпечують сучасні світові вимоги до виробництва сільгосппродукції. Технологія та пристрій, що працює на її основі, є енергозберігаючими, економічно вигідними, екологічно безпечними, не забруднюють продукт сушіння і навколишнє середовище, і, як наслідок, не сприяють виникненню парникового ефекту.

Пристрій, призначений для видалення вологи з сипких матеріалів за допомогою мікрохвильового сушіння, застосовується для отримання заданої вологості насіння зернових і олійних культур, в тому числі насінневого фонду, а також проводить дезінфекцію, знезараження продукту сушіння від шкідливих бактерій, грибків, у тому числі цвілі. Для

нагрівання продукту сушіння використовується енергія МХ поля. Конструктивно даний пристрій являє собою прямотечійну зерносушильну установку вертикального типу модульної конструкції. Технологічний процес сушіння полягає в наступному. Продукт сушіння подається в активну зону через бункер, проходячи через активну зону зверху вниз продукт розігрівається струмами МХ на 12...15 °С вище температури навколишнього середовища. Розігрів відбувається під час проходження продукту через активну зону. У цей момент відбувається інтенсивне виділення вологи на поверхню продукту.

Початковий процес видалення вологи починається в активній зоні. Надалі продукт сушіння поступає в сушильну зону, де відбувається видалення вологи і зниження температури продукту. Далі продукт через шнек вивантажується в приймальний бункер або висипну яму (в залежності від місця установки зерносушарки), де відбувається вирівнювання температури продукту сушіння з температурою навколишнього середовища і остаточне знімання вологи.

Дана технологія дозволяє застосовувати рециркуляцію продукту в сушильній установці і є екологічно чистою, так як відсутні продукти згоряння палива.

1.4. Методи зберігання дрібнонасінневих культур

В залежності від параметрів навколишнього середовища і стану об'єктів зберігання за вологістю, температурою розрізняють наступні режими зберігання:

- зберігання зерна у сухому стані, тобто при вологості нижче критичної;
- зберігання зерна в охолодженому стані, тобто при температурах, які практично гальмують життєві функції усіх компонентів зерна;

– зберігання зерна у безкисневому середовищі — у герметичних умовах, без доступу кисню [22, 23, 43].

Вибір того або іншого методу зберігання партій зерна визначається рядом факторів: метою використання та якістю об'єкта зберігання, кліматичними особливостями регіону зберігання, технічними можливостями підприємства, техніко-економічною доцільністю.

Режими зберігання у *сухому стані* базуються на зниженій фізіологічній активності усіх компонентів, які входять у склад об'єктів зберігання. При вологості нижче критичної зерно впадає у стан анабіозу: життєдіяльність і дихання його загальмовуються, а розвиток мікроорганізмів і більшості шкідників майже зупиняється у наслідок відсутності для цього благоприємних умов [8, 22, 43].

Режими зберігання в *охолодженому стані* засновані на тому, що вже при температурі 10 °С інтенсивність дихання зернової маси знижується. Подальше охолодження призводить до того, що всі комахи та кліщі перестають розмножуватись та через деякий час гинуть. При понижених температурах призупиняється розвиток мікробів, однак їх загибель не відбувається. Цей спосіб дає хороші результати для збереження якості зерна при нетривалому зберіганні. Для довготривалого зберігання свіжозібране зерно треба сушити.

Дуже хороші результати дає комбінування двох способів – зберігання сухого зерна в охолодженому стані [8, 14, 22, 34, 43].

Зберігання зерна у *безкисневому середовищі* на сьогоднішній час мало розповсюджений спосіб зберігання. Це пов'язано з додатковими вимогами до зерносховищ. Обов'язковою вимогою для виконання режимів зберігання зерна у безкисневому середовищі є наявність герметичності зерносховища, наприклад, металевих силосів. Умови зберігання у безкисневому середовищі можливо створити одним з трьох відомих способів: створення модифікованого газового середовища – МГС (природне зниження вмісту кисню і збільшення вмісту діоксиду вуглецю);

створення регульованого газового середовища (введення в зерносховища з об'єктами зберігання інертних газів і витіснення звідти повітря); створення вакууму. Всі ці способи потребують додаткові витрати, зусилля, що несе за собою зменшення привабливості у використанні даного методу зберігання [8, 22, 40].

Роботи [8, 15] присвячена дослідженню явища злежування фізичного та фізіологічного характеру зерна сорго при зберіганні. Показано, що, починаючи з вологості зерна 20 %, температура сорго перевищує температуру навколишнього середовища. При вологості зерна 25 % явище самозігрівання чітко виражене. Температура зерна весь час зростала при знаходженні у силосі і через 48 годин зберігання становила 42,5 °С, що на 22 °С перевищувала температуру навколишнього середовища. При вологості зерна 30 % проходить весь цикл процесу самозігрівання. Температура сорго становила 42,5 °С вже через 3 години зберігання і залишалася сталою.

Результати досліджень [4] також показали, що зберігати насіння ріпаку при вологості повітря 80 % навіть короткий час небезпечно, оскільки відбувається інтенсивний розвиток пліснявих грибів, що призводить до псування насіння, бо саме плісняві гриби викликають зростання інтенсивності дихання насінневої маси в умовах високої вологості. Навіть у сприятливих умовах зберігання (відносна вологість повітря 60 %) і, особливо при високій вологості повітря, необхідно насіння ріпаку провентилувати через місяць його зберігання, щоб запобігти розвитку пліснявих грибів.

Оптимальним способом зберігання насіння ріпаку є його зберігання у мішках. Рекомендують застосовувати поліетиленові укладки. Насіння ріпаку затарюють у джутові мішки по 50 кг. При температурі не вище 10 °С висота штабеля може становити 6 мішків, при більш високій температурі – 4 мішка. Насіння ріпаку можна зберігати також у критих ємностях, що оснащені установками активного вентилування, висота

насипу при цьому для сухого і середньої сухості насіння не повинна перевищувати 2 м [36].

Важливим напрямом технічної політики в елеваторній промисловості визнане будівництво металевих силосів. Їх будівництво повинно дозволити швидше ліквідувати наявний дефіцит місткості [14, 26]. Ряд вітчизняних машинобудівних підприємств почав освоювати виробництво металевих зерносклощ для фермерських господарств. Таким чином, можна говорити, що елеваторна промисловість країни поповнилася новим перспективним сегментом.

Застосування металевих силосів дає багато істотних переваг в порівнянні з монолітними залізобетонними: можливість заводського виготовлення конструкцій, меншу масу, простоту транспортування, зокрема на великі відстані, простоту і невелику трудомісткість монтажу, можливість створення герметичних місткостей, що дозволяє тривалий час підтримувати якість зерна [8].

Відповідно до практики зберігання зернових культур, металеві силоси заслужено можна вважати найрентабельнішими. Адже будівництво і обслуговування таких силосів в 2...3 рази дешевші, а на процес самозігрівання, який відбувається в зерні, можна впливати за допомогою ефективних систем аерації, вентилявання і термометрії, що дозволяє запобігти псуванню зерна.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. В останні роки значно збільшилося надходження на хлібоприймальні підприємства, елеватори і перевантажувальні термінали дрібнонасіненних культур, таких як ріпак, та сорго. Ці культури дають навіть в посушливі роки високий урожай, який дозволяє господарствам отримувати привабливий прибуток, в тому числі і за рахунок експорту.

2. Кожна з перерахованих культур має свої унікальні властивості. На сьогодні не достатньо вивчені та визначені фізико-механічні, аеродинамічні і гігроскопічні властивості, розмірні і теплофізичні характеристики дрібнонасіненних культур, не встановлена їх залежність від вологості зерна. Слід зазначити, що технологічні властивості вказаних дрібнонасіненних культур суттєво відрізняються від зерна традиційних зернових, бобових і олійних культур, і тому необхідно їх детальне вивчення.

3. Сьогодні термічна обробка (активне вентилявання, сушіння, охолодження) та зберігання проводяться за стандартами та нормативними документами, розробленими в 80-х роках минулого сторіччя. Для ефективної роботи хлібоприймальних підприємств та елеваторів необхідно розробити нормативні документи та інструкції (або доповнення до них) з науково обґрунтованими режимами термічного обробки та зберігання дрібнонасіненних культур, які будуть сприяти зниженню енергоємності термічної обробки і зберігання та покращувати якість зерна.

РОЗДІЛ 2

ОБ'ЄКТИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є технологія сушіння та зберігання дрібнонасіньових культур таких як сорго та ріпак. Предметом дослідження є властивості дрібнонасіньових культур (фізичні, технологічні, гранулометричні та теплофізичні характеристики), процеси їх сушіння та зберігання.

2.1 Методики дослідження

При визначенні фізико-механічних властивостей дрібнонасіньових культур були використані методи, затвердженні відповідними ДСТ, або ті що рекомендовані у відповідній науковій літературі.

2.1.1 Методики досліджень фізико-механічних властивостей.

Відбір проб проводили за ДСТУ 3355-96. Вологість насіння визначали за ДСТУ 29144:2009 (ISO 711-85). Були визначені такі показники: коефіцієнти тертя, гранулометричний склад, об'ємна маса (натура) (ГОСТ 10840-64), маса 1000 зерен за (ДСТУ 10842-89), шпаруватість, щільність укладання насіння [23].

Визначення коефіцієнта тертя спокою. Коефіцієнт тертя спокою f_0 визначають за кутом тертя зерна по поверхні. Коефіцієнт тертя спокою чисельно дорівнює тангенсу граничного кута нахилу площини, при якому зерно починає рухатися по похилій площині:

$$f_0 = \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.1)$$

Коефіцієнт зовнішнього тертя спокою визначають за допомогою приладу, зображеного на рис. 2.1. Досліджуваний зразок зерна поміщують на горизонтально встановлену планку, при цьому повинен забезпечуватися контакт зернин із поверхнею планки. Матеріал поверхні можна змінювати. Рукояткою повільно змінюють нахил планки до горизонту. Кут, при якому

починається рух рамки з матеріалом, і є кутом зовнішнього тертя зернин об поверхню матеріалу [23].



Рис.2.1 Установка для визначення коефіцієнта тертя

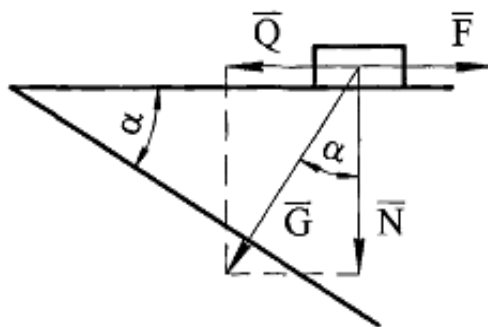


Рис.2.2 Схема сил прикладених до тіла по похилій площині

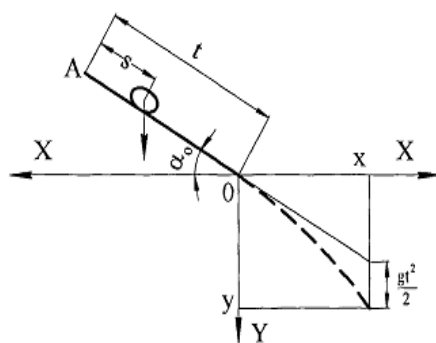


Рис.2.3 Траекторія руху частки при сході з похилої площини

На рисунку 2.2 показана схема сил, які діють на зернину по похилій площині.

Визначення коефіцієнта тертя в русі. Коефіцієнт зовнішнього тертя вантажу в русі менше, ніж у спокої, як правило, на 10...30 %. Для визначення коефіцієнта зовнішнього тертя руху необхідно встановити похилу поверхню

під таким кутом до площини горизонту, при якому відбувається стійкий рух зернин по площині. Визначаємо координати (x, y) у трьох – п'яти точках траєкторії вільного польоту частинок зернової маси з похилої площини (рис.2.3) Коефіцієнт зовнішнього тертя руху розраховують для всіх експериментальних точок траєкторії руху зернової маси.

2.1.2. Методика досліджень гранулометричного складу.

Гранулометричний склад – характеристика, що визначає геометричні розміри частинок і співвідношення їх розмірів в загальному об'ємі сипкого матеріалу, тобто гранулометричний склад – це розподіл за крупністю частинок, що визначається розміром найбільших частинок, які містяться в пробі [15].

Геометричні розміри зернин визначали вимірюванням вибірки із 10...100 зерен. Результати вимірювань записують в порядку зростання (ранжують).

Для кожного зразка дрібнонасінневих культур визначено гранулометричний склад методами математичної статистики, для чого визначили розмах варіювання лінійних розмірів (значення геометричних розмірів частинок a_i , яке спостерігається найбільшу кількість разів).[29]

Розмах варіювання визначили за формулою

$$R_B = a_{\max} - a_{\min} . \quad (2.2)$$

В залежності від значення розмаху варіювання R_B обрано значення класового інтервалу h , який дозволяє розбити зернову масу на класи за розміром та в подальшому визначити модальний інтервал, тобто клас зернової маси, що відповідає максимальній частоті:

$$h = \frac{R_B}{K} , \quad (2.3)$$

де K – кількість класів, визначають за формулою Стерджеса:

$$K = 1 + 3,32 \cdot \lg n , \quad (2.4)$$

де n – кількість спостережень.

Далі здійснюють групування сукупності значень a_i в інтервальний ряд і визначають нижню межу першого класу за формулою

$$l = a_{\min} + 0,5 \cdot h \quad (2.5)$$

Будують графік інтервального варіаційного ряду таким чином: по осі абсцис відкладають межі класових інтервалів, по осі ординат – значення відповідних частот і отримують гістограму розподілення частот (рис. 2.4).

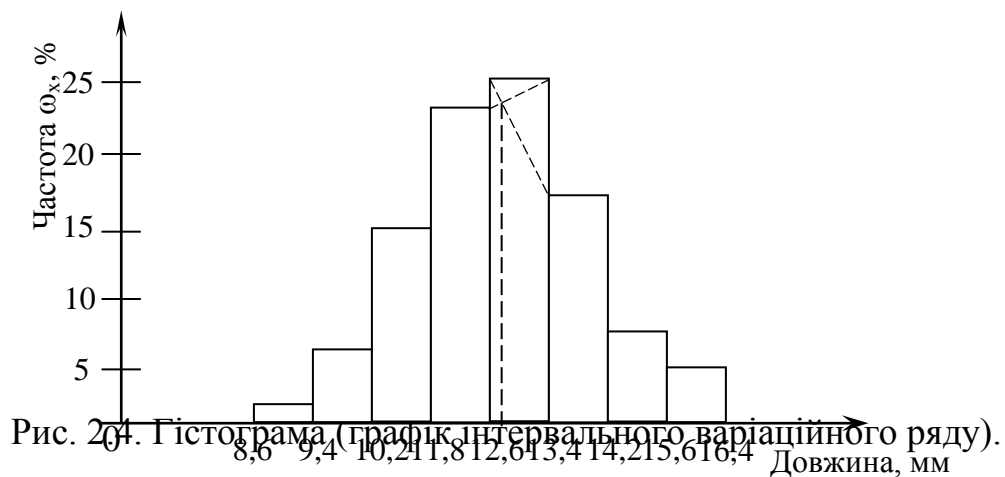


Рис. 2.4. Гістограма (графік інтервального варіаційного ряду).

Частота (ω_x) – це число, що показує скільки разів зустрічаються значення параметра у даному класі.

За гістограмою знаходять значення моди M_0 – значення довжини частинок a_i , яке спостерігається найбільше число разів.

Модальний інтервал – це клас, що відповідає ω_{\max} .

Значення моди визначали за формулою

$$M_0 = a_0 + \frac{h \cdot (\omega_0 - \omega'_0)}{2 \cdot \omega_0 - \omega'_0 - \omega''_0}, \quad (2.6)$$

де a_0 – початок модального інтервалу;

ω_0 – частота модального інтервалу;

ω'_0 – частота інтервалу перед модальним;

ω''_0 – частота інтервалу після модального.

2.1.3. Дослідження теплофізичних характеристик (ТФХ) дрібнонасіневиих культур.

З численних методів визначення ТФХ матеріалів нами був використаний порівняно простий і достатньо точний зондовий метод вистигаючої пластини [11, 23], заснований на розв'язанні задачі про розповсюдження в необмеженому тілі температури, що віддається протягом деякого часу задалегідь нагрітою пластиною. При цьому вважають, що напрям теплового потоку в центральній частині пластини перпендикулярна до її поверхні, а температура в цій області залежить тільки від однієї координати x [11, 42].

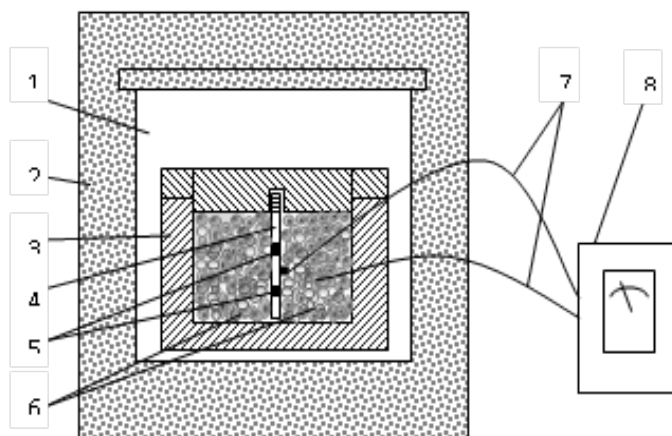


Рис. 2.5. Схема експериментальної установки для визначення теплофізичних характеристик зерна: 1 – термокамера; 2 – теплоізоляційний матеріал; 3 – вимірювальна камера, 4 – латунна пластина (зонд); 5 – ебонітова рамка; 6 – насіння; 7 – термопари; 8 – потенціометр.

Основним елементом установки (рис. 2.5) є вимірювальний осередок, виготовлений з термоізолюючого матеріалу розміром 20x15x15 см, у середині якої перпендикулярно до її довжини розташовується зонд 4 – латунна пластина розміром 15x15x0,3 см. Її центральна частина, розміром 5x5x0,3 см вирізана і обрамлена ебонітовою рамкою 5 шириною 0,3 см для відділення від навколишніх її частин пластини. Останні виконують роль “захисного кільця” по відношенню до центральної частини пластини.

Методика проведення дослідів полягала у тому, що латунну пластину попередньо нагрівали до температури, яка на 18...20 °С перевищувала температуру досліджуваного матеріалу, вводили її в матеріал і через кожні 3 хвилини контролювали температуру матеріалу і пластини. Досліди

проводили в трикратній повторності. Температуру матеріалу і пластини вимірювали за допомогою хромель-копелевих термоелектродів (термопар) завтовшки 0,2 мм в комплексі з потенціометром ПП-63. Підігрів матеріалу і пластини до заданої температури вимірювального осередку проводили в термокамері SPT-200. Для забезпечення заданих значень вологості матеріалу, його штучно зволожували і витримували протягом трьох діб для рівномірного перерозподілу вологи.

Визначення теплофізичних характеристик зерна на описаній експериментальній установці проводили за наступними розрахунковими формулами:

$$a = 3336 \cdot 10^{-9} / \tau_{max} \quad , \quad (2.7)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності, $\text{м}^2/\text{с}$;

τ_{max} – час з початку дослідів до настання максимального значення температури в точці виміру, хв.

$$\ln(c \cdot \gamma) = 11,63 + \ln(\Delta T_n / \Delta T_m), \quad (2.8)$$

де c – питома теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

γ – об'ємна маса матеріалу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ΔT_n – зміна температури протягом дослідів, $^{\circ}\text{C}$;

ΔT_m – зміна температури в даній точці дослідженого матеріалу за час дослідів, $^{\circ}\text{C}$.

$$\lambda = a \cdot c \cdot \gamma \quad , \quad (2.9)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

$$\varepsilon = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \gamma}, \quad (2.10)$$

де ε – коефіцієнт теплової активності, $\text{Дж}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

У формулу (2.7) для визначення коефіцієнта температуропровідності, a входить значення τ_{max} . Як правило, це значення знаходять з графіків залежності температури матеріалу від часу. Проте, для матеріалів, що характеризуються порівняльно високими теплоізоляційними властивостями, визначення τ_{max} графічним методом пов'язано з великими похибками, що виникають через відсутність чітко вираженого максимуму температури

матеріалу в процесі досліду (максимум “розмитий”). Тому для підвищення точності визначення τ_{max} експериментально одержана залежність зміни температури зерна з від часу досліду τ була апроксимована квадратичним поліномом вигляду

$$\Theta_z = b_0 + b_1 \cdot \tau + b_2 \cdot \tau^2, \quad (2.11)$$

на підставі якого, обчислювали екстремальне значення τ_{max} і відповідне йому значення Θ_z , використовувані при розрахунку $\Delta\Theta_z$ у формулі для визначення питомої теплоємності. Коефіцієнти полінома b_0 , b_1 та b_2 визначали методом найменших квадратів [29].

Перед початком досліду температуру пластини доводять до величини, що перевищує температуру зерна на 18...20 °С, потім її вводять в зернову масу. У цей момент відлічують по приладу значення ЕРС, що розвивається термопарами №1 (робочий спай прикріплений до зернівки) і №2 (робочий спай прикріплений до пластини), пускають в хід секундомір.

Після цього відлік роблять через кожні три хвилини при вимірюванні ЕРС пластини і через кожну 1 хвилину при вимірюванні ЕРС зерна. Потім за градуированими графіками термопар визначають температуру зерна і пластини.

З графічних побудов змін температури зерна в часі знаходять τ_{max} . Його значення підставляють у формулу (2.7) для обчислення коефіцієнта температуропровідності a . Потім за формулою (2.8) визначають значення питомої теплоємності c . Значення γ можна обчислити для різних моментів часу, бо, як показав аналіз експериментальних даних, всі ці значення трохи відрізняються один від одного. Величини λ і ϵ знаходять розрахунковим шляхом за формулами (2.9) і (2.10).

Для отримання узагальнених емпіричних залежностей теплофізичних характеристик дрібнонасіньових культур в дослідженій області зміни їх початкової вологості проводили обробку експериментальних даних послідовним множинним регресійним аналізом з наступною статистичною оцінкою результатів [29].

2.2. Методика дослідження кінетики сушіння

2.2.1. Методика дослідження конвективного сушіння зерна.

Експериментальна установка (рис. 2.6) складається з наступних основних вузлів: двох вентиляторів 1, калорифера 3, сушильної камери 9, ваги 6, контрольно-вимірювальних приладів 7, 13. Калорифер 3, сушильна камера 9 і трубопроводи зовні покриті шаром теплоізоляції. У сушильну камеру 9 можна подавати як нагріте у калорифері повітря, так і зовнішнє повітря. Вологе повітря засмоктується вентилятором 1 із приміщення і подається в калорифер 3, де нагрівається від електронагрівників до заданої температури. Витрати повітря, що подається в калорифер, вимірюються за допомогою нормальної діафрагми 2 у комплекті з дифманометром-тягионапороміром 7. Обертаючи маховик вентиля 8, установлюють на дифманометрі типу ТНЖ перепад тиску ΔH , що відповідає розрахованим витратам сушильного агента V .

Потім установлюють регулятор температури потенціометра 13 на задане значення t_1 . Включають електронагрівники і досягають задану температуру сушильного агента на вході в сушильну камеру. Через установлений час знімають показання електронного секундоміра 5 та всіх приладів і вагів.

Для зважування сушильної камери використовують електронні ваги ВЛКТ8-2-М. Під час експерименту підтримують постійним перепад ΔH на дифманометрі 7. По закінченню експерименту спочатку виключають електронагрівники 4, а потім, після продування повітрям калорифера і сушильної камери протягом 5...10хв, виключають вентилятор 1 і електроживлення установки.

Розраховують об'ємні витрати сушильного агента V за формулою

$$V = 3600 f V_{ac} 293 / (273 + t_{c.a.}), \text{ м}^3/\text{год}, \quad (2.12)$$

де f – площа поперечного перерізу сушильної камери, м^2 ;

V_{ac} – швидкість сушильного агента в сушильній камері, умовно віднесена до площі поперечного перерізу сушильної камери, м/с;

$t_{c.a}$ – температура сушильного агента, °С.

Потім за графіком знаходять відповідні витрати V , м³/год та перепад ΔH , Па.

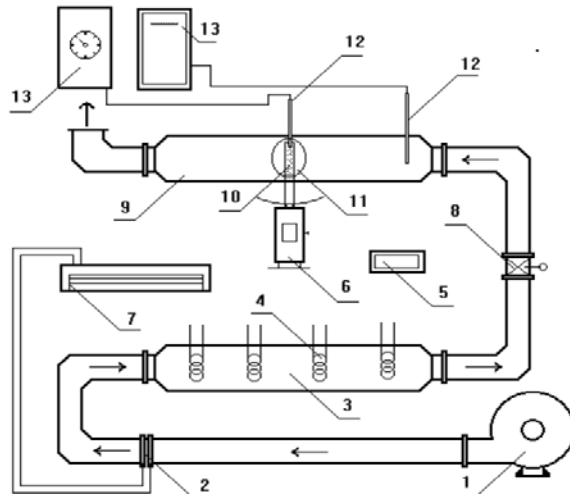


Рис. 2.6. Експериментальна установка для дослідження процесу сушіння.

Як фактори, що визначають кінетику сушіння, були обрані початкова вологість w_0 і температура Θ_0 зерна, а також температура агента сушіння t . Значення висоти зернового шару було прийнято $h = 0,1$ м, а швидкість агента сушіння $v = 0,3$ м/с, що відповідає умовам сушіння.

У зв'язку з нерівномірністю окремих зерен за вологістю, неможливістю формування партій у досліджуваному діапазоні початкової вологості, а також із труднощами збереження вологого зерна, досліди проводили на штучно зволоженому зерні. Для цього зерно зволожували з наступним його відлежуванням для рівномірного розподілу вологи в матеріалі.

Витрати води, необхідні для зволоження зерна, визначають за формулою

$$\Delta m = M_0 (w_{п} - w_k) / (100 - w_k), \quad (2.13)$$

де M_0 – маса зерна, що міститься у вимірювальному осередку, г;

w_n – початкова вологість зерна, %;

w_k – кінцева вологість зерна, %.

Значення вологості зерна перед дослідями визначали за ДСТУ 29144:2009 (ISO 711-85), а значення поточної — розрахунковим шляхом. Для цього в процесі сушіння касету періодично зважують на електронних вагах і за зменшенням маси зерна, за рахунок випаровування вологи, розраховують значення вологості за формулою

$$w_i^3 = 100 - \frac{G_n}{G_i} \cdot (100 - w_n^3), \quad (2.14)$$

де G_n – початкова маса зерна до сушіння, г;

G_i – маса зерна в i -тий момент часу, г;

w_i^3 – початкова вологість зерна до сушіння на загальну масу, %.

Перераховують вологість зерна на суху масу w_c для кожного зафіксованого моменту часу за формулою

$$w^c = \frac{100 \cdot w^3}{100 - w^3}, \quad \% \quad (2.15)$$

На першому етапі обробки результатів дослідів за експериментальними даними w_i^c і τ_i будують криву сушіння, відкладаючи по осі ординат значення вологості w_c (%), а по осі абсцис значення часу τ (хв). Нанесені експериментальні точки з'єднують плавною кривою.

За експериментальними даними будують також і криву температури нагрівання зерна в координатах: на осі ординат – значення температури зерна Θ (°C), а на осі абсцис — значення часу τ (хв).

2.2.2. Методика дослідження конвективно-мікрохвильового сушіння зерна.

Дослідження проводили на експериментальній конвективно-мікрохвильовій установці. Установка працює таким чином (рис.2.7). У робочу камеру надходить енергія через хвилевід від магнетрона з частотою генерації $f = 2450$ МГц, максимальна потужність $P = 800$ Вт, робоча довжина

хвилі $\lambda = 0,125$ м. У робочу камеру 1 поміщається касета з зерном 3. Касета 3 виготовлена з радіопрозорої сітки. Для продування шару зерна повітрям використовується всмоктуючий вентилятор 2, швидкість повітря $v = 1,0$ м/с. Касету з зерном зважували на електронних вагах 4, температуру зерна в період відсутності подачі імпульсу енергії вимірювали термопарою 5.

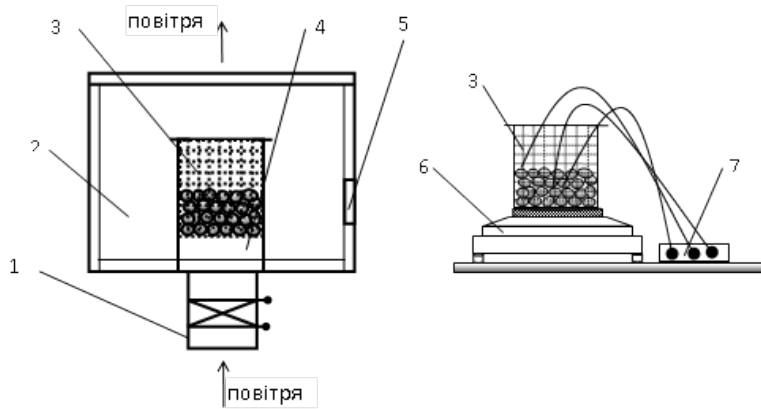


Рис. 2.7. Експериментальна установка для дослідження конвективно-мікрохвильового сушіння зерна: 1 – вентилятор, 2 – робоча камера; 3 – касета з зерном; 4 – підставка; 5 – хвильовід; 6 – електронні ваги; 7 – термопара.

Обробку отриманих даних проводили аналогічно дослідженням конвективного способу сушіння.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Відповідно поставленій меті та сформульованим завданням розроблена програма теоретичних та експериментальних досліджень.

2. Для реалізації поставлених завдань обґрунтовано методи та методики досліджень. Наведено опис основних експериментальних установок.

РОЗДІЛ 3

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
ДРІБНОНАСІННЄВИХ КУЛЬТУР**

У розділі досліджено основні фізико-технологічні, гігроскопічні і теплофізичні характеристики дрібнонасінневих культур, які можуть бути використані на практиці при організації технологічного процесу їх термічної обробки та зберігання.

3.1. Фізико-технологічні властивості

Знання фізико-технологічних властивостей зернової маси як сипкого матеріалу дозволяє вирішувати велику кількість прикладних задач, які мають практичне значення. Так, механізація і автоматизація транспортування, післязбиральна обробка і зберігання в сховищах (складах, силосах, металевих бункерах) базуються на фізичних властивостях. За показниками, що визначають сипкість, можна моделювати поведінку зернової маси при переміщенні по самопливах, ситах тощо. Вміле використання цих властивостей дозволяє скоротити втрати, поліпшити якість партій зерна й знизити витрати у всіх галузях народного господарства, пов'язаних з виробництвом і використанням зерна.

Лише досконале вивчення фізико-технологічних властивостей може забезпечити оптимальні умови для зберігання зерна без погіршення його якості. Визначено наступні показники фізико-технологічних властивостей: об'ємна маса (натура), маса 1000 зерен, щільність укладання, шпаруватість, кут природного укусу і коефіцієнти зовнішнього тертя спокою і руху.

При визначенні фізико-технологічних властивостей досліджуваних культур використовували методи, затверджені відповідними ДСТ, а також застосовувані в науково-дослідних роботах і рекомендовані у відповідній

літературі. Відбір проб проводили за ДСТ 13586.3-83. Узагальнені результати досліджень представлені у табл. 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1

Результати дослідження фізико-технологічних властивостей сорго

(n = 3, p ≥ 0,95)

Найменування показника	Зразок № 1	Зразок № 2	Зразок № 3	Зразок № 4
Масова частка вологи, %	11,8	16,3	20,1	24,2
Натура (об'ємна маса), кг/м ³	770	738	748	710
Маса 1000 зерен, г	23,1	23,9	27,0	37,4
Істинний об'єм 1000 зерен, см ³	22,0	20,0	23,0	24,0
Шпаруватість, %	26,7	33,6	37,9	38,3
Кут природного укусу, град.	26,0	30,0	32,0	38,0
Коефіцієнти зовнішнього тертя спокою:				
по пластмасі	0,28	0,28	0,28	0,34
по сталі	0,28	0,34	0,34	0,38
по гумі	0,26	0,32	0,34	0,36
Коефіцієнт зовнішнього тертя в русі	0,28	0,29	0,30	0,38

Таблиця 3.2

Результати дослідження фізико-технологічних властивостей ріпаку

Найменування показника	Зразок № 1	Зразок № 2	Зразок № 3	Зразок № 4
Масова частка вологи, %	7,3	10,1	13,8	18,0
Натура (об'ємна маса), кг/м ³	600	598	585	572
Маса 1000 зерен, г	3,70	3,72	3,82	3,89
Істинний об'єм 1000 зерен, см ³	4,00	4,20	4,50	4,60
Шпаруватість, %	31,0	32,3	33,1	35,1
Кут природного укусу, град.	30,0	31,0	34,0	34,0
Коефіцієнти зовнішнього тертя спокою:				
по пластмасі	0,29	0,29	0,32	0,32
по сталі	0,29	0,29	0,31	0,32
по гумі	0,29	0,30	0,31	0,32
Коефіцієнт зовнішнього тертя в русі	0,33	0,35	0,41	0,42

Відомо, що шпаруватість більше впливає на теплопровідні і сорбційні властивості сипкої маси, що особливо важливо при зберіганні. Чим менше шпаруватість, тим більше щільність укладання, тобто більше насипна маса одиниця об'єму. Нами підтверджено, що при збільшенні вологості спостерігається збільшення шпаруватості, що очевидно, відбувається за рахунок збільшення об'єму зернівок, унаслідок їхнього набрякання [33].

Сипкість зернової маси характеризується коефіцієнтами зовнішнього і внутрішнього тертя, що визначається шляхом вимірювання кутів тертя і природного укусу. Досліджувані зразки насіння можна віднести до добре сипких продуктів, оскільки кут природного укусу в них менше 38 градусів і збільшення вологості дрібнонасінневих культур призводить до зменшення їх сипкості

З наведених даних видно, що зі збільшенням вологості зерна зменшується натура (об'ємна маса), та незначно зростають маса 1000 зерен, шпаруватість, кут природного укусу і коефіцієнти зовнішнього тертя в стані спокою та руху.

Для характеристик окремих зернин і шару зерна встановлено стандартні вимірювання їх характеристики: геометричні розміри зерен; маса 1000 зерен; густина зернин; об'ємна маса шару зерна.

Геометричні розміри визначали для сухого зерна та зволоженого: ріпак до вологості 9,9...22,1 %, а сорго – до 16,3 та 24,2 %. Результати вимірювання геометричних розмірів, що вивчались, наведено у табл. 3.3

Таблиця 3.3

Результати вимірювань геометричних розмірів дрібнонасінневих культур (n = 3, p ≥ 0,95)

Вологість, %	Довжина (l), мм		Ширина (a), мм		Товщина (b), мм	
	min	max	min	max	min	max
Сорго						
11,8	3,30	4,30	2,80	4,00	2,00	3,50

Продовження табл.3.6

16,3	3,30	4,50	3,00	4,20	2,10	3,50
24,2	3,40	4,60	3,00	4,20	2,10	3,50
Ріпак						
7,3	1,40	2,10	1,00	1,70	1,00	1,70
10,1	1,40	2,10	1,00	1,70	1,00	1,70
13,8	1,40	2,10	1,20	1,80	1,20	1,80
22,0	1,40	2,30	1,30	2,00	1,30	2,00

Для кожного зразка зерна визначено гранулометричний склад та ряд важливих статистичних характеристик (табл. 3.4) – розкид варіювання лінійних розмірів, класи, частоту та моду зернин (значення геометричних розмірів зернин, які спостерігаються найбільше число разів).

Таблиця 3.4

Результати визначення оптимального значення лінійних розмірів та моди деяких дрібнонасінневих культур (n = 3, p ≥ 0,95)

Вологість, %	Довжина (l), мм			Ширина (a), мм			Товщина (b), мм			Мода, M _o		
	Модальний інтервал		Мода, M _o	Модальний інтервал		Мода, M _o	Модальний інтервал		Мода, M _o			
	min	max		Час тота	min		max	Час тота			min	max
Сорго												
11,8	3,75	3,90	13	3,78	3,35	3,52	10	3,43	2,47	2,69	14	2,59
16,3	3,85	4,02	14	3,88	3,55	3,72	14	3,67	2,75	2,9	16	2,82
24,2	4,13	4,30	12	4,23	3,72	3,90	13	3,77	2,25	3,15	19	2,92
Ріпак												
7,3	1,40	1,51	16	1,48	1,12	1,22	20	1,18	1,12	1,22	20	1,18
10,1	1,52	1,62	22	1,56	1,22	1,33	13	1,24	1,22	1,33	13	1,24
13,8	1,77	1,84	10	1,72	1,57	1,65	22	1,6	1,57	1,65	22	1,60
22,0	1,97	2,1	17	2,01	1,74	1,85	14	1,81	1,74	1,85	14	1,81

Отже, видно, що з підвищенням вологості діапазон модального інтервалу збільшується пропорційно майже в усіх зразках. У сорго зміна частоти за довжиною та товщиною при вологості 16,3 та 24,2 % лежить в межі 2...5 %, а при вологості 11,8 % значення для всіх геометричних параметрів відрізняється майже на 30 %. Значення моди за довжиною при вологості 16,3 і 24,2 % відрізняються на 1 % друг від друга, а від моди при вологості 11,8 % на 13 %, за шириною мода змінюється пропорційно. Також видно, що за товщиною значення моди майже співпадають при різній вологості.

Аналогічна залежність впливу вологості на зміну геометричних розмірів спостерігається і для насіння досліджених олійних культур [28].

Основні геометричні показники насіння дрібнонасіненних культур в залежності від вологості наведено у табл. 3.5.

Таблиця 3.5

Геометричні показники насіння досліджених дрібнонасіненних культур (n = 3, p ≥ 0,95)

Вологість, %	Об'єм зернини V_z , мм ³	Площа зовнішньої поверхні F_z , мм ²	Сферичність ψ	Еквівалентний діаметр d_e , мм	Питома поверхня a_0 (мм ² /мм ³),
Сорго					
11,8	19,30	32,24	0,93	3,33	1,67
16,3	27,10	37,75	0,87	3,73	1,39
24,2	36,48	42,37	0,80	4,11	1,16
Ріпак					
7,30	2,29	7,99	0,87	1,35	3,86
10,1	2,56	8,66	0,87	1,44	3,63
13,8	3,95	9,44	0,85	1,78	2,86
22,0	4,35	11,04	0,86	2,02	2,54

Розраховано основні геометричні показники дрібнонасінневих культур, які дозволяють моделювати процеси вентиляції, сушіння, підбирати режимні параметри технологічних машин. Аналіз отриманих даних показав, що з підвищенням вологості у досліджуваному діапазоні об'єм зернин V_z , площа зовнішньої поверхні F_z , еквівалентний діаметр d_e – збільшуються, а питома поверхня зернин a_0 – зменшується.

3.2. Теплофізичні властивості

Нами було проведено дослідження впливу вологості та температури дрібнонасінневих культур на їх теплофізичні характеристики. Для визначення теплофізичних характеристик дрібнонасінневих культур був використаний один із варіантів зондового методу — метод вистигаючої пластини (див. розділ 2).

Значення теплофізичних характеристик дрібнонасінневих культур наведено у табл. 3.6 та 3.7.

Таблиця 3.6

Теплофізичні характеристики насіння ріпаку

($n = 3, p \geq 0,95$)

Вологість, w, %	Температура, $\theta, ^\circ\text{C}$	Питома теплоємність с, Дж/(кг·К)	Коефіцієнт температуро- провідності $a \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$	Коефіцієнт теплопро- відності $\lambda, \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$	Коефіцієнт теплової активності $\varepsilon, \text{ Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с}^{-0,5})$
7,2	5	996	166,3	0,148	411,8
	15	1806	158,5	0,170	423,9
	25	2410	190,0	0,187	443,9
12,2	5	1626	175,4	0,159	420,8
	15	2204	160,5	0,182	433,6
	25	2445	196,7	0,191	451,7

Продовження табл.3.6.

15,9	5	1723	187,5	0,169	438,9
	15	2291	175,4	0,188	453,9
	25	2495	197,8	0,197	458,3

На основі отриманих даних була проведена математична обробка даних і їх статистична оцінка та отримані емпіричні рівняння, що описують залежності теплофізичних характеристик дрібнонасінневих культур від їх вологості та температури.

Рівняння залежності теплофізичних характеристик від вологості та температури насіння ріпаку:

$$c = -32,76 + 95,12 \theta + 96,46 w - 3,46 \theta \cdot w, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); \quad (3.1)$$

$$a = 141,69 - 1,69\theta + 2,66 w - 0,07 \theta \cdot w, 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}; \quad (3.2)$$

$$\lambda = 0,12 + 0,0023\theta + 0,0025w, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}); \quad (3.3)$$

$$\varepsilon = 380,7 + 2,088\theta + 3,27w - 0,007 \theta \cdot w, \text{ Дж}/(\text{м}^2\cdot\text{К}\cdot\text{с}^{-0,5}). \quad (3.4)$$

Таблиця 3.7

Теплофізичні характеристики насіння сорго

(n = 3, p ≥ 0,95)

Вологість, w, %	Температура, θ , °C	Питома теплоємність c, Дж/(кг·К)	Коефіцієнт температуропровідності $a \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·К)	Коефіцієнт теплової активності ε , Дж/($\text{м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{с}^{-0,5}$)
10,8	5	1133	167,4	0,160	405,7
	15	2024	173,9	0,174	436,9
	25	2263	191,9	0,187	472,5
18,1	5	1705	170,7	0,169	420,0
	15	2174	179,5	0,176	455,2
	25	2434	193,7	0,189	479,5
23,7	5	1960	171,2	0,173	429,3
	15	2233	183,6	0,183	468,1
	25	2626	197,4	0,198	481,1

Рівняння залежності теплофізичних характеристик від вологості та температури насіння сорго:

$$c = 29,18 + 76,70 \theta + 76,04 w - 1,87 \theta \cdot w, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K}); \quad (3.5)$$

$$a = 158,3 + 1,15 \theta + 0,27 w + 0,006 \theta \cdot w, 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}; \quad (3.6)$$

$$\lambda = 0,14 + 0,0015 \theta + 0,001 w, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{K}); \quad (3.7)$$

$$\varepsilon = 395,6 + 1,530 \theta + 2,031 w - 0,01 \theta \cdot w, \text{ Дж}/(\text{м}^2\cdot\text{K}\cdot\text{с}^{-0,5}). \quad (3.8)$$

Аналіз отриманих результатів показує, що в дослідженій області параметрів зерна сорго менше значення теплофізичних характеристик спостерігається при $\theta = 5$ °С. З підвищенням вологості та температури зерна значення цих характеристик зростає, отже збільшується інтенсивність зміни температури при нагріванні зерна та швидкість вирівнювання температури.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Досліджено фізико-технологічні, теплофізичні властивості та гранулометричний склад, геометричні показники насіння дрібнонасіньєвих культур (сорго, та ріпаку) при різних значеннях вологості, які можуть бути використані для визначення ефективних режимів термічної обробки і зберігання насіння. Встановлено, що зі збільшенням вологості насіння зменшується натура, незначно зростають маса 1000 зерен та коефіцієнти зовнішнього тертя в стані спокою та руху, збільшуються розміри зернівок за довжиною, а за товщиною і шириною вони практично не змінюються.

2. Визначено теплофізичні характеристики дрібнонасіньєвих культур – питому теплоємність c , коефіцієнти температуропровідності a , теплопровідності λ і теплової активності ε . Отримано емпіричні рівняння, що описують залежності вказаних теплофізичних характеристик дрібнонасіньєвих культур від їх вологості і температури.

4. Дослідження технологічні властивості дрібнонасіньєвих культур дозволять обґрунтувати режими їх термічної обробки та зберігання.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ СУШІННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ДРІБНОНАСІННЄВИХ КУЛЬТУР

4.1 Дослідження кінетики сушіння та нагрівання дрібнонасіненних культур

Важливою стадією процесу післязбиральної обробки насіння є сушіння. Своєчасне і правильно проведене сушіння насіння не тільки підвищує його стійкість під час зберігання, а й поліпшує якість насіння.

4.1.1. Конвективне сушіння дрібнонасіненних культур.

Сушіння насіння дрібнонасіненних культур проводили на експериментальній стендовій установці, що моделює процес сушіння зерна (див. розд. 2).

Свіжозібране насіння, як правило, має підвищену вологість. Це може за кілька годин призвести до самозгрівання і псування насіння. Післязбиральна обробка дрібнонасіненних культур повинна надати їм таких властивостей, при яких зерно буде зберігати свою якість до моменту його використання. Важливою стадією процесу післязбиральної обробки насіння є сушіння. Між тим, теплове сушіння – це складний технологічний процес, при якому в насінні відбуваються численні необоротні фізико-механічні, колоїдні та біохімічні зміни [21]. Найбільш нестійкі до нагрівання є білкові сполуки — вони найчастіше і зумовлюють гранично допустиму температуру нагрівання насіння. В звичайних сушарках відбувається нерівномірне нагрівання різних шарів насіння, в наслідок чого відбувається його перегрівання, що призводить до погіршення якості насіння. Проблему становить дуже дрібний розмір насіння.

Основними параметрами, що визначають інтенсивність процесу і збереження якості висушеного насіння, для всіх методів і прийомів сушіння є: температура сушильного агента, тривалість процесу, температура нагрівання насіння [39]. Необхідно підкреслити, що температура, до якої

насіннева маса прогривається при сушці, визначає життєздатність насіння, здібність до зберігання та якість олії.

Для встановлення ефективного технологічного режиму сушіння необхідно, щоб процес був максимально коротким і при цьому, зберігалася або навіть поліпшувалися технологічні властивості та якість насіння і продуктів їх переробки (олії – для олійних культур).

Параметри процесу сушіння можуть порізному діяти на якість насіння і олії з них, це залежить від термолабільності насіння і їх складових частин. Термолабільність визначається сукупною дією підвищеної температури і вологи. При певному поєднанні температури і вологи можуть створитися сприятливі умови для протікання небажаних процесів хімічного і біохімічного окислення, гідролізу, денатурації білків. Результатом небажаних процесів є погіршення якості продуктів переробки дрібнонасінневих культур – олії і білкових концентратів, зменшення їх виходу [23].

Теплове сушіння спричиняє певні зміни фізіологічних і біохімічних властивостей насіння і якості їх олії. Дії теплоти і вологи піддається найбільш термолабільна частина насінини – це білки, і в них перш за все починається денатурація. [27, 44, 45].

Для математичного опису процесу сушіння проведено двохфакторний експеримент з центральною точкою [29]. За основні фактори, що впливають на кінетику процесу сушіння та якість дрібнонасінневих культур прийнято початкову вологість w_0 (12,1...18,2) % для олійних дрібнонасінневих культур та w_0 (18,3...24,2) % для зернових дрібнонасінневих культур, температуру сушильного агента $t_{c.a}$ (50...80) °C для олійних дрібнонасінневих культур та $t_{c.a}$ (90...110) °C для зернових дрібнонасінневих культур. Швидкість сушильного агента у всіх дослідах складала 0,4 м/с, кінцева вологість $w_k = 7,0\%$ (для олійних), $w_k = 14,0\%$ (для зернових – сорго). За результатами досліджень процесу сушіння дрібнонасінневих культур визначали коефіцієнт сушіння K , кінцеву температуру нагрівання дрібнонасінневих культур θ_k ,

тривалість τ_k процесу сушіння від початкової вологості до кінцевої. Результати сушіння насіння ріпаку наведено у табл. 4.1.

Таблиця 4.1

Результати сушіння насіння ріпаку

(n = 3, p ≥ 0,95)

Вологість w_0 , %	Температура сушильного агента $t_{c.a.}$, °C	Температура нагрівання зерна θ_k , °C	Коефіцієнт сушіння K, хв ⁻¹
12,2	50	34	0,193
15,9	50	38	0,176
12,2	80	43	0,143
15,9	80	49	0,163
14,8	65	42	0,170

За результатами дослідження складені рівняння залежності впливу режиму сушіння та початкової вологості дрібнонасіневих культур на кінетику їх сушіння та якість. Для ріпаку ці рівняння у кодованих змінних мають такий вигляд:

$$\theta_k = 41,2 + 2,50 x_1 - 5,00 x_2; \quad (4.1)$$

$$K = 0,18 - 0,035 x_1 - 0,025 x_2; \quad (4.2)$$

де x_1 – початкова вологість насіння;

x_2 – температура сушильного агента.

Кодовані значення факторів зв'язані з натуральними співвідношеннями:

$$x_1 = \frac{w_0 - 14,8}{3}; \quad x_2 = \frac{t_{c.a.} - 65}{15}. \quad (4.3)$$

Аналіз отриманих рівнянь показує, що на величину кінцевої температури насіння ріпаку в процесі сушіння при обраних режимах найбільший вплив має значення температури сушильного агента. Основним фактором, що впливає на тривалість процесу сушіння та коефіцієнт сушіння,

є початкова вологість насіння: тривалість процесу зростає зі збільшенням початкової вологості, а коефіцієнт сушіння відповідно зменшується. Кінцева температура нагрівання насіння ріпаку не перевищує граничне значення 50 °С.

Одержані рівняння регресії в натуральних величинах:

$$\theta_k = 7,31 + 0,81 w_0 - 0,33 t \text{ a.c.} \quad (4.4)$$

$$K = (0,161 + 1,98w_0 - 0,126 t \text{ a.c.}) \cdot 10^{-2}; \quad (4.5)$$

Криві температури нагрівання та криві сушіння насіння ріпаку наведено на рис. 4.1.

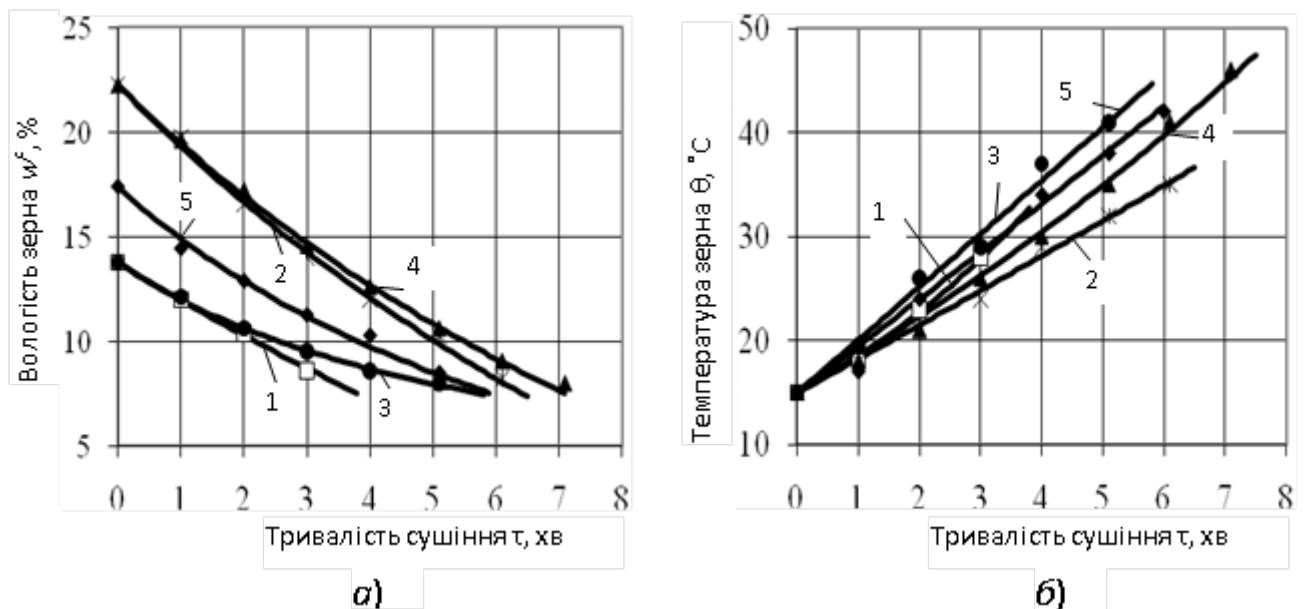


Рис. 4.1. Криві сушіння (а) та криві температури нагрівання (б) насіння ріпаку: 1 – $w_0 = 12,2$; $t_{a.c.} = 50$ °С; 2 – $w_0 = 15,9$; $t_{a.c.} = 50$ °С; 3 – $w_0 = 12,2$; $t_{a.c.} = 80$ °С; 4 – $w_0 = 15,9$; $t_{a.c.} = 80$ °С; 5 – $w_0 = 14,8$; $t_{a.c.} = 65$ °С.

Кінетика сушіння та нагрівання насіння ріпаку залежить від його початкової вологості та температури сушильного агенту. Зі збільшенням вологості насіння швидкість його нагрівання знижується [41].

4.1.2. Конвективно-мікрохвильове сушіння дрібнонасінневих культур.

Для того, щоб забезпечити зняття вологи одночасно із зовнішніх та внутрішніх шарів зернівки, необхідно поєднувати традиційне сушіння з сушінням зерна на мікрохвильовому обладнанні. Варіантом реалізації комплексного підходу до сушіння зерна може бути комбінована взаємодія фізичних факторів, які забезпечуються електромагнітним полем, і псевдорозрідженого шару шляхом продування його повітрям з навколишнього середовища. Такий підхід характеризується системою показників, які дозволяють зменшити енергетичні затрати, скоротити тривалість сушіння зерна, покращити екологічний стан навколишнього середовища [17].

Осцилююче конвективно-мікрохвильове сушіння дрібнонасіненних культур проводили при двох значеннях імпульсів підведення енергії ($\tau_e = 6 \dots 10$ с) та двох значеннях тривалості продування шару зерна ($\tau_n = 20 \dots 30$ с). Діапазон зміни вологості: для зернових культур $w_0 = 18 \dots 24$ %, для олійних культур $w = 12 \dots 16$ %, висота шару зерна $h = 30 \dots 60$ мм. Результати дослідження конвективно-мікрохвильового сушіння дрібнонасіненних культур наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4

**Результати дослідження конвективно-мікрохвильового сушіння
дрібнонасіненних культур** (n = 3, p ≥ 0,95)

Культура	Початкова вологість, %	Висота шару зерна, мм	Режим сушіння							
			$\tau_e = 6$ с, $\tau_n = 20$ с,		$\tau_e = 10$ с, $\tau_n = 20$ с,		$\tau_e = 6$ с, $\tau_n = 30$ с		$\tau_e = 10$ с, $\tau_n = 30$ с	
			τ , хв	θ_k , °C	τ , хв	θ_k , °C	τ , хв	θ_k , °C	τ , хв	θ_k , °C
Сорго	18	30	6,8	47	8,2	62	13,8	45	10,4	41
		60	11,4	51	12,8	65	14,0	46	13,4	46
	24	30	8,2	34	9,0	68	14,2	46	13,6	54
		60	14,4	53	14,4	68	15,6	48	14,6	56

Продовження табл.4.4

Ріпак	12	30	5,0	55	3,7	65	6,1	59	4,6	70
		60	7,0	56	5,2	66	6,9	59	6,3	72
	16	30	5,1	58	4,4	66	6,1	60	5,4	69
		60	7,4	62	5,6	73	7,2	60	6,0	69

Для математичного опису кривих температури нагрівання та кривих сушіння зерна досліджуваних культур використовували рівняння, яке за виглядом аналогічно рівнянню Н.Ф. Докучаєва і М.С. Смірнова для опису кінетики сушіння [42].

Коефіцієнти a , b , c і d розраховували методом найменших квадратів, їх значення наведено в табл. 4.5 і 4.6.

Таблиця 4.5

Коефіцієнти a і b для опису кривих температури нагрівання зерна

($n = 3, p \geq 0,95$)

Культура	Початкова вологість, %	Висота шару зерна, мм	Режим сушіння							
			$\tau_e = 6$ с, $\tau_{II} = 20$ с,		$\tau_e = 10$ с, $\tau_{II} = 20$ с,		$\tau_e = 6$ с, $\tau_{II} = 30$ с,		$\tau_e = 10$ с, $\tau_{II} = 30$ с,	
			a	b	a	b	a	b	a	b
Сорго	18	30	0,151	0,011	0,065	0,013	0,078	0,033	0,054	0,031
		60	0,134	0,018	0,065	0,013	0,789	0,033	0,054	0,022
	24	30	0,151	0,011	0,065	0,013	0,078	0,033	0,005	0,022
		60	0,115	0,061	0,020	0,073	0,015	0,052	0,018	0,048
Ріпак	12	30	0,068	0,014	0,025	0,016	0,034	0,019	0,033	0,012
		60	0,050	0,020	0,023	0,017	0,034	0,019	0,030	0,014
	16	30	0,064	0,015	0,023	0,017	0,035	0,019	0,030	0,014
		60	0,068	0,014	0,023	0,017	0,034	0,020	0,027	0,015

Для математичного опису процесу сушіння та його узагальнення проведено трьохфакторний експеримент за D-оптимальним планом Бокса. За основні фактори, що впливають на кінетику сушіння та якість насіння, прийнято початкову вологість насіння w_0 , висоту шару зерна h , тривалості підведення енергії τ_e та тривалості продування шару зерна τ_{II} .

Залежності кінцевої температури дрібнонасіневих культур від початкової вологості насіння w_0 , висоту шару зерна h і тривалості підведення

енергії τ_e та тривалості продування шару зерна τ_n . були узагальнені рівняннями регресії для кожної дослідженої культури:

– для сорго

$$\theta_k = 67,616 - 6,376 w + 0,458 h + 5,876 \tau_e + 0,626 \tau_n + 0,014 w \cdot h + 0,417 w \cdot \tau_e + 0,117 w \cdot \tau_n - 0,033 h \cdot \tau_e - 0,013 h \cdot \tau_n - 0,413 \tau_e \cdot \tau_n \quad (4.15)$$

– для ріпака

$$\theta_k = 18,652 - 3,655 w + 0,004 h - 3,122 \tau_e - 2,136 \tau_n - 0,015 w \cdot h - 0,109 w \cdot \tau_e + 0,119 w \cdot \tau_n - 0,010 h \cdot \tau_e - 0,009 h \cdot \tau_n - 0,119 \tau_e \cdot \tau_n \quad (4.18)$$

Таблиця 4.6

Коефіцієнти c і d для опису кривих сушіння дрібнонасінневих культур

($n = 3, p \geq 0,95$)

Культура	Початкова вологість, %	Висота шару зерна, мм	Режим сушіння							
			$\tau_e = 6$ с, $\tau_n = 20$ с,		$\tau_e = 10$ с, $\tau_n = 20$ с,		$\tau_e = 6$ с, $\tau_n = 30$ с,		$\tau_e = 10$ с, $\tau_n = 30$ с,	
			c	d	c	d	c	d	c	d
Сорго	18	30	1,434	- 0,012	1,460	0,021	2,123	0,110	1,478	0,057
		60	2,076	0,028	1,920	0,053	2,113	0,110	1,476	0,057
	24	30	0,763	0,035	0,919	0,032	0,739	0,016	0,768	0,020
		60	1,28	- 0,005	0,697	0,004	1,418	- 0,010	0,862	- 0,001
		60	1,092	- 0,036	0,551	0,005	0,905	0,008	0,730	0,016
Ріпак	12	30	1,101	- 0,055	0,633	0,022	1,081	- 0,015	0,793	- 0,008
		60	0,915	0,033	1,005	- 0,012	1,081	- 0,015	1,574	- 0,086
	16	30	0,426	0,003	0,527	0,001	0,676	- 0,023	0,533	- 0,019
		60	0,807	- 0,034	0,865	- 0,057	0,613	0,001	0,591	0,008

Адекватність рівнянь оцінювали за критерієм Фішера. Оскільки виконується умова $F_p < F_{кр}$, то одержані рівняння з надійністю $p = 0,95$ адекватні експериментальним даним у вивченому діапазоні зміни факторів.

Встановлено, що з підвищенням початкової вологості та висоти шару дрібнонасіненних культур їх кінцева температура при осцилююче конвективно-мікрохвильому сушінні підвищується [6, 9, 35].

4.2. Дослідження температури насіння при зберіганні в металевих силосах

Актуальним на сьогоднішній день стає питання розвитку переробних зернових підприємств, які в свою чергу пов'язані зі зберіганням сировини в елеваторах. Поширення набули металеві елеватори, які на відміну від залізобетонних значно дешевші та потребують меншого часу для їх зведення. Але постають питання, як зберегти зерно в металевих силосах, як часто контролювати температуру в ньому, за яких умов навколишнього середовища краще його там зберігати та як веде себе зернова маса у різних шарах насипу. Температура зернової маси – це важливий показник, що характеризує стан зернової маси при зберіганні. Підвищення температури зернової маси, що не відповідає зміні температури навколишнього середовища, свідчить про активацію фізіологічних процесів та початок процесу самозігрівання. Тому, спостерігаючи за зерном, потрібно одночасно враховувати температуру зовнішнього повітря та повітря в силосі. Слід зауважити, що необхідно враховувати як денну, так і нічну температури повітря. Різкі перепади температури зовнішнього повітря протягом доби є особливо шкідливими для зернових мас, що зберігаються в силосах. В результаті різких коливань температур на внутрішніх поверхнях силосу конденсується волога, поява якої призводить до інтенсифікації фізіологічних процесів в зерновій масі, і як наслідок, псування зерна (проростання, самозігрівання, пліснявіння, тощо). Крім того, через перепади денних і нічних температур в металевому силосі можуть виникати циклічні напруження стиску і розширення, що можуть призвести до ущільнення зернової маси і її злежування [6, 8, 10, 23, 43].

Контроль температури зерна – найбільш ефективний і доступний спосіб відстеження результатів біохімічних процесів, що протікають у зерновому насипу під час зберігання зерна в зерносховищах. Необхідність встановлення системи термометрії є невід'ємною частиною контролю за зерном, що зберігається [8, 43].

Нами проводилось дослідження зміни температури сформованих шарів зерна сорго при його зберіганні у період вересня-жовтня 2019 року в металевих силосах різного діаметру [26].

На зберігання в металевий силос місткістю 4,0 тис. тонн (діаметр силосу 16,5 м) було закладено сорго третього класу з показниками якості: вологість 13,5 %, вміст смітної домішки 4,4 %, вміст зернової домішки 9,4 %.

У силос місткістю 5,5 тис. тонн (діаметр силосу 22,0 м) було закладено сорго першого класу з наступними показниками: вологість 13,5 %, вміст смітної домішки 1,2 %, вміст зернової домішки 2,7 %.

Для контролю температури зернової маси силоси обладнані системою термометрії. Пристрій контролю температури зерна з цифровим дисплеєм дозволяє виводити цифрові дані температури зернової маси, яка зберігається в силосах. Система термометрії (рис. 4.9) в силосі діаметром 16,5 м складається з 7 термопідвісок, на яких встановлено по 8 датчиків і 9 – на центральній термопідвісці, а в силосі діаметром 22,0 м – 13 термопідвісок, де на термопідвіски 1-4 встановлено по 11 датчиків і по 10 датчиків на термопідвіски 5-13. Заповнення зерном сорго силосів діаметром 16,5 м і 22,0 м становило відповідно 90 % і 80 %.

Для встановлення залежності температури зернового насипу від зовнішніх факторів (вплив нагрітих стін, даху силосу, температури повітряного шару всередині силосу) будували графіки зміни температури зернового насипу сорго на 10 жовтня 2019 року, оскільки за період дослідження різниця денної і нічної температур була максимальною.

На рис. 4.10 наведені графіки зміни температури зернового насипу зерна сорго першого класу, яке зберігалося в металевому силосі діаметром 16,5 м. На графіку також нанесена максимальна денна (+24 °C) і мінімальна нічна (+15 °C) температури повітря в день вимірювань. Температуру граничного шару «повітря-зерно» вимірюють датчики № 8 термopідвісок 2-7 і датчик № 9 термopідвіски 1, показники яких дещо більше від інших датчиків.

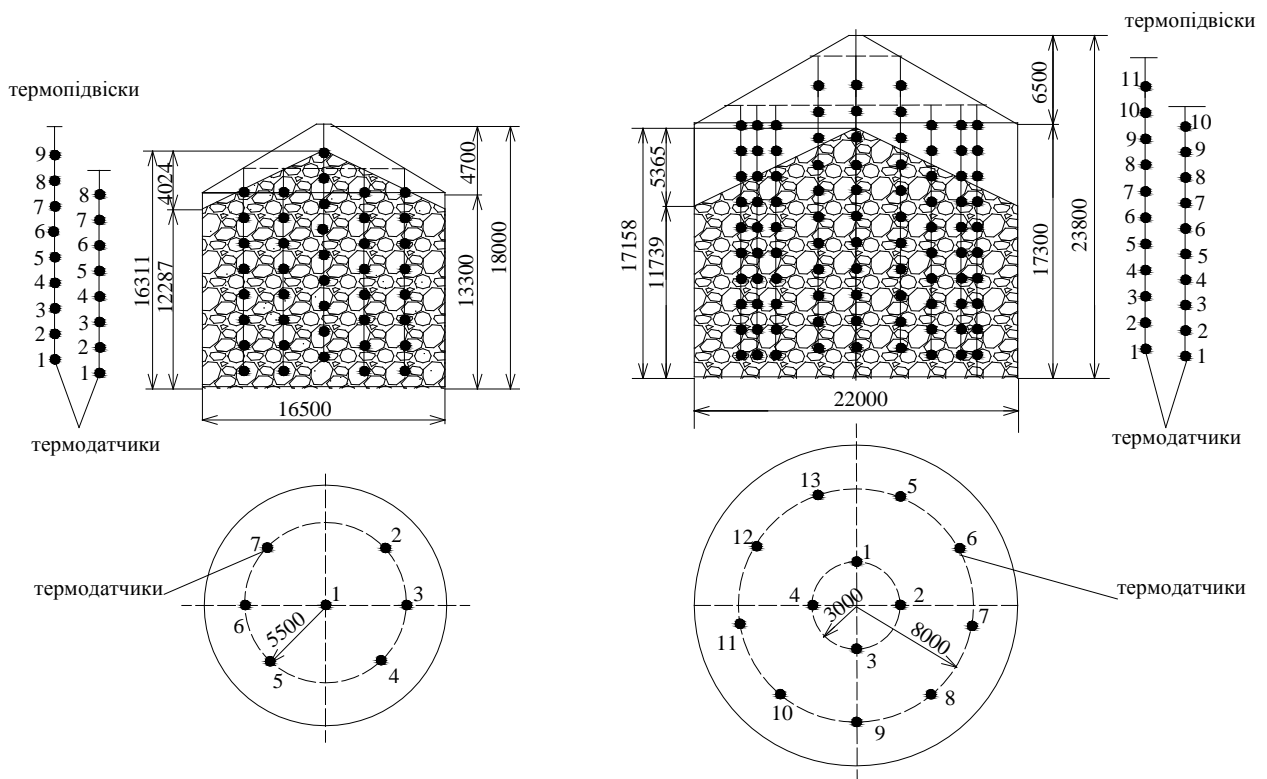


Рис. 4.9. Розміщення системи термометрії у силосах.

Отже, найбільше піддається впливу температури повітря верхній шар зернового насипу, а саме «конус» в його вершині, який найбільш контактує з поверхнею, оскільки денна температура сприяє нагріванню металевій конструкції силосу і, як наслідок, дещо підвищує температуру повітря в силосі.

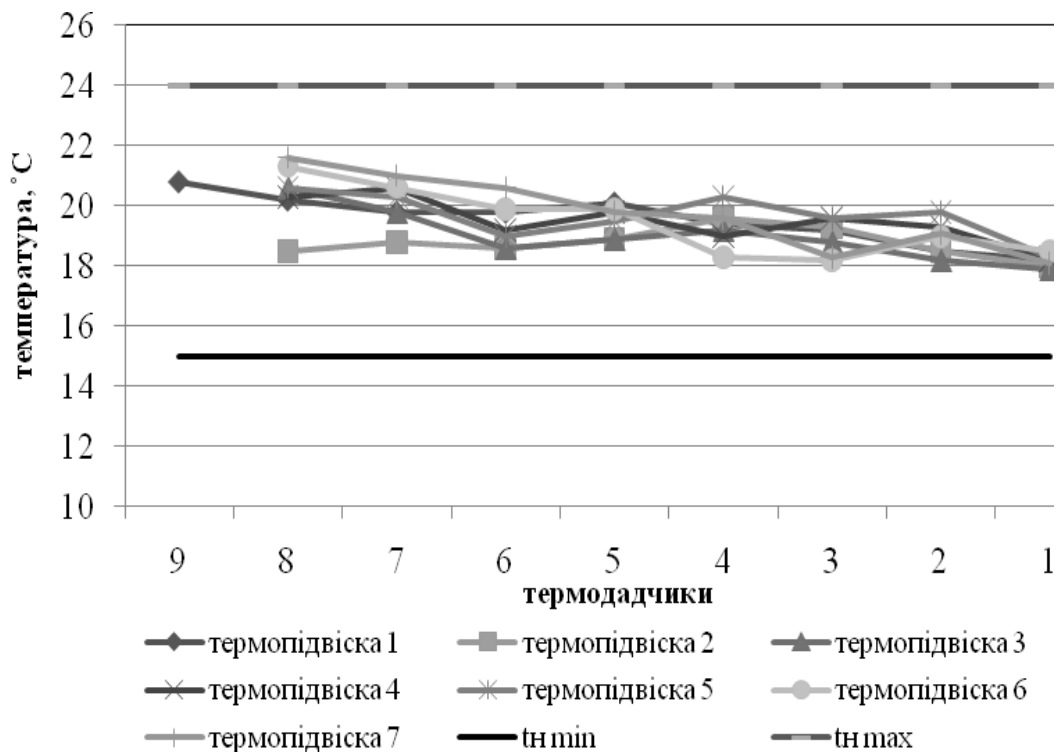


Рис. 4.10. Графіки зміни температури зернового насипу сорго першого класу, що зберігалось у металевому силосі діаметром 16,5 м.

З отриманих даних [26] видно, що при параметрах навколишнього середовища близьких до температури зернового насипу в силосі, впливу на стан його верхнього шару не відбувається. Температура зернової маси залежить також від якості зерна, що надходить на зберігання. Графіки зміни температур зернової маси свідчить про те, що процес зберігання протікав стабільно. Це пов'язано з низькою вологістю і засміченістю зерна. У цьому випадку фізіологічні процеси в зерновій масі протікають менш інтенсивно.

При зберіганні зерна сорго третього класу його температура вища, ніж температура зерна сорго першого класу і досягає $+25^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.11).

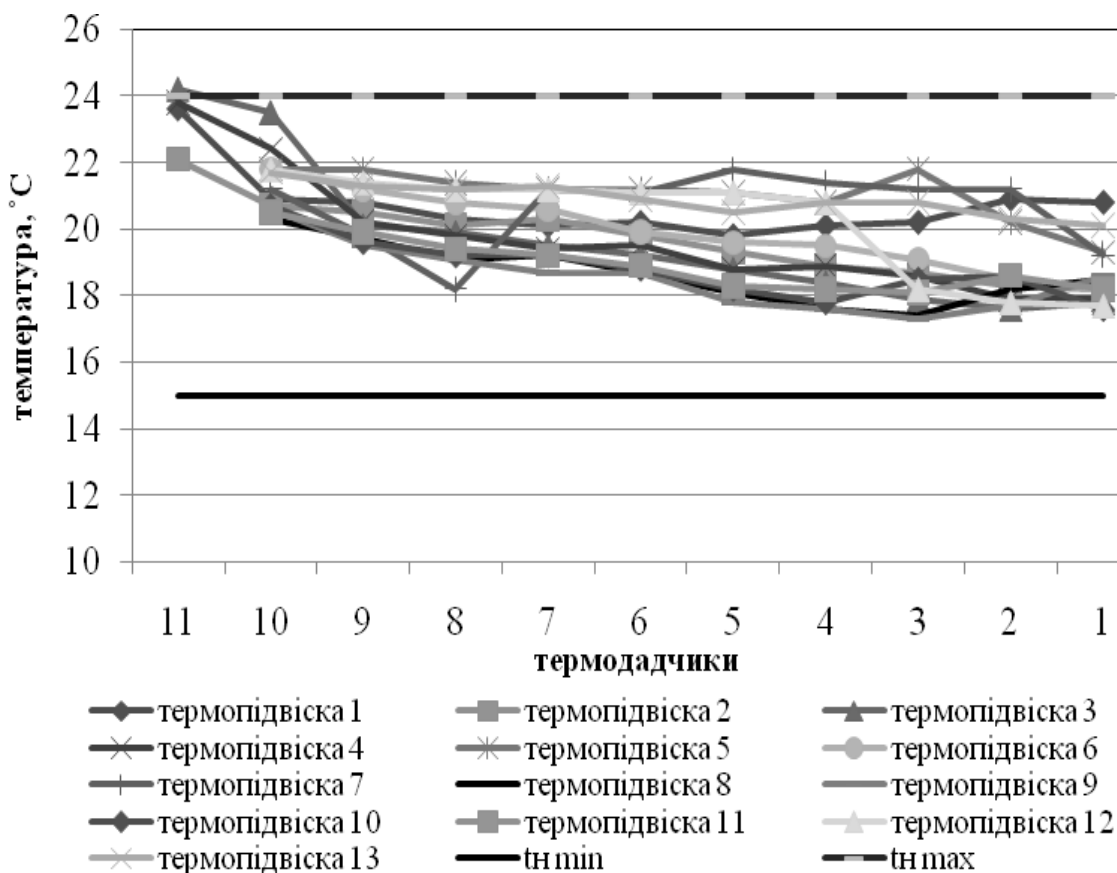


Рис. 4.11. Графіки зміни температури зернового насипу сорго третього класу, що зберігалось у металевому силосі діаметром 22 м.

Необхідно підкреслити, що зерно, закладене на зберігання, було сухим, але засміченим (середній вміст зернової домішки представляє 9,4%). Зміна температури зерна могло бути викликано процесом дихання, який інтенсифікується при більшій засміченості зерна. Отже, на зберігання в металеві силоси доцільно подавати тільки сухе і чисте зерно сорго.

Аналіз результатів проведених досліджень, а також дані літературних джерел [11, 22, 45] показали, що контроль температури зерна – найбільш ефективний і практично доступний спосіб відстеження результатів біохімічних процесів, що протікають в зерновому насипу під час зберігання зерна у металевих зерносховищах. Необхідність установки системи

термометрії є невід'ємною частиною контролю за станом зерна, що зберігається.

Низька температура у всіх шарах зернової маси є показником її нормального стану і свідчить про її консервування. Підвищення температури зернової маси, яка не відповідає зміні температури навколишнього середовища, свідчить про активацію фізіологічних процесів і початку самозігрівання. Тому, спостерігаючи за зерном, необхідно одночасно враховувати температуру повітря навколишнього середовища і повітря в силосі (при цьому необхідно враховувати як денну, так і нічну температури повітря). Різкі перепади температури зовнішнього повітря протягом доби є особливо шкідливими для зберігаються в силосі зернових мас. Через високу теплопровідність стінок і даху металевих силосів, змінюється температура зерна, що контактує з ними. Виникають перепади температур між окремими шарами зерна, розташованими на різній відстані від стінок силосу. Це в свою чергу призводить до виникнення конвективних потоків повітря і вологи, що міститься в ньому.

В результаті значних перепадів температур на внутрішніх поверхнях силосу конденсується волога, поява якої призводить до інтенсифікації фізіологічних процесів в зерновій масі і, як наслідок, псування зерна (проростання, самозігрівання, пліснявіння, тощо). Крім того, через перепади денних і нічних температур в силосі можуть виникати циклічні напруження стиску і розширення, які можуть призвести до ущільнення зернової маси і її злежування.

Напрямок руху конвективних потоків повітря усередині силосу і місця конденсації вологи залежать від пори року. Восени волога конденсується переважно в центральній верхній частині силосу (під дахом), а навесні - в центральній частині дна силосу. *Конвективні потоки та міграція вологи в металевих силосах при різних погодних умовах наведено на рис. 4.12.*

Чим більшої місткості бункери, тим більше часу потрібно для переміщення теплоти з центру на периферію. При теплому зерні в центрі сховища і холодному зерні на

периферії виникають конвекційні повітряні потоки, що переміщуються вниз, в області холодного зерна, і вгору, в області теплого зерна в центрі сховища (рис. 4.12, а).

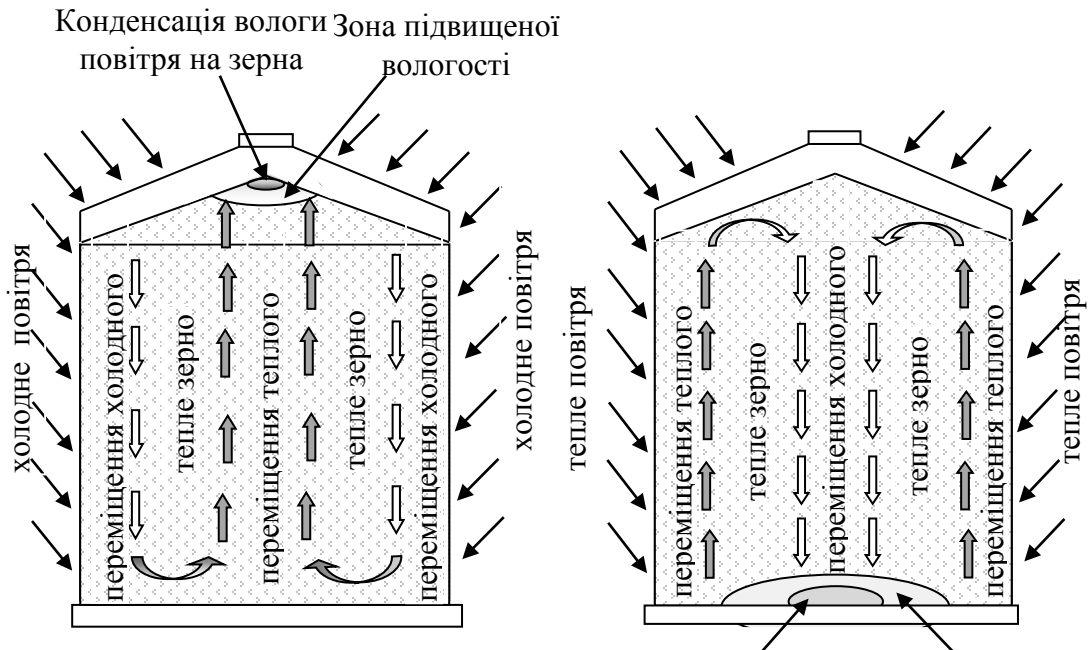


Рис. 4.12. Конвективні потоки та міграція вологи в металевих силосах.
 а – при холодних погодних умовах (температура повітря менше плюс 5 °С),
 б – при теплих погодних умовах (температура повітря більше плюс 15 °С).

Температура зерна при закладці на зберігання у заготівельний період становить плюс (10 ...22) °С, тобто дорівнює температурі зовнішнього повітря. В зимовий період зовнішні температури падають до (-1...-20) °С, і зерно, близьке до стінок металевих силосів, охолоджується до температур близьких до температури зимового повітря, в той час як зерно, близьке до центру металевих силосів, ще тепле, що пояснюється низькою теплопровідністю зерна.

Чим більшої місткості металеві силоси або бункери, тим більше часу потрібно для переміщення теплоти з центру на периферію. При теплому зерні в центрі сховища і холодному зерні на периферії виникають конвекційні повітряні потоки, що переміщуються вниз, в області холодного зерна, і вгору, в області теплого зерна в центрі сховища (рис. 4.12, а).

Конвекційні потоки викликані різницею густин холодного і теплого повітря. При переміщенні теплого повітря з центру зернової маси переміщує малі кількості вологи з зерна. Потім при контакті теплого повітря з холодним зерном у верхній частині зерна і з холодним дахом силосу волога конденсується на холодних поверхнях. Частина вологи також переміщається між теплим і холодним зерном внаслідок дифузії. Комбінація факторів конвекційних потоків і дифузії призводить до поступового зволоження зерна у

верхніх шарах центральній частині силоса. При достатньому зволоженні і при підвищенні температури зовнішнього повітря зерно покривається пліснявою і в ньому збільшується кількість комах.

Конденсація вологи на зерні також відбувається в літні місяці, коли вологе тепле повітря контактує з холодним зерном (рис. 4.12, б).

Оптимальна температура зберігання зерна залежить від географічних чинників і погодних умов. У цілому при виборі рекомендованих температур зберігання зерна можна керуватися таким принципом: температура зерна повинна бути трохи вище середніх температур найхолодніших зимових місяців і нижче середніх температур самих теплих літніх місяців. Для реалізації цих рекомендацій необхідно часто контролювати температуру зерна, а на початку нового сезону бажано застосовувати заходи для зміни температури зерна.

Дослідженнями встановлено, що незалежно від того, яка стратегія зберігання зерна обрана, температура його не повинна бути вище за 15...17 °С.

На зберігання, по можливості, слід засипати холодні дрібнонасіненні культури, оскільки для переміщення теплоти з центру зернової маси сховища до його периферії потрібен тривалий час через низьку теплопровідність зерна. На початку нового сезону бажано застосовувати заходи для зміни температури зерна (вентилювання чи переміщення).

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. За результатами досліджень процесу сушіння дрібнонасіневих культур визначено коефіцієнт сушіння K , кінцеву температуру нагрівання θ_k , тривалість τ_k процесу сушіння від початкової вологості до кінцевої.

2. Досліджено кінетику сушіння та нагрівання зерна при конвективно-мікрохвильовому сушінні дрібнонасіневих культур. Отримано рівняння, які дозволяють прогнозувати процес сушіння при різних значеннях вологості, висоти шару зерна та тривалості імпульсів підведення МХ енергії і продування повітрям.

3. Отримані узагальнені рівняння залежності кінцевої температури зерна від початкової вологості w_0 , висоти шару зерна h і тривалості підведення енергії τ_e та тривалості продування шару зерна $\tau_{\text{п}}$: Встановлено, що з підвищенням початкової вологості та висоти шару зерна кінцева температура зерна підвищується.

6. При виборі рекомендованих температур зберігання зерна можна керуватися таким принципом: температура зерна повинна бути трохи вище середніх температур найхолодніших зимових місяців і нижче середніх температур самих теплих літніх місяців. Для реалізації цих рекомендацій необхідно часто контролювати температуру зерна, а на початку нового сезону бажано застосовувати заходи для зміни температури зерна. Дослідженнями встановлено, що незалежно від того, яка стратегія зберігання зерна обрана, температура його не повинна бути вище за 15...17°C.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Альтернативні енергоресурси та енергозберігаючі технології:
[Текст] // Пропозиція. – 2006. – № 6. – С. 20-21.
2. Анискин, В.И. Гигроскопические свойства зерна различных культур
[Текст] / В.И. Анискин, Г.С. Окунь, А.Г. Чижиков. – М.: ЦИНТИ
Госкомзаг, 1967. – 86 с.
3. Артемов, И.В. Интенсификация процесса сушки семян рапса
[Текст] / И.В. Артемов, Г.А. Филатов, И.П. Мамонцев // Масличные
культуры. – 1987. – № 2. – С. 25.
4. Берегова, О.М. Удосконалення технології первинної обробки та
зберігання насіння ріпаку [Текст]: дис...канд. техн. наук: 05.18.03 /
О.М. Берегова. – О., 2002. – 276 с.
5. 6. Бородин, И.Ф. Применение сверхвысоких частот в сельском
хозяйстве [Текст] / И.Ф. Бородин // Электричество. – 1989. – № 9. –
С. 1-5.
6. 7. Бурдо, О.Г. Эволюция сушильных установок [Текст]: монография
/ О.Г. Бурдо. – О.: «Полиграф», 2010. – 368 с.
7. 8. Визначення впливу мікрохвильового поля на посівні і врожайні
якості насіння злакових, олійних і овочевих культур [Текст] /
Л.Г. Калинин, В.П. Тучний, Є.А. Левченко і ін. // Наук. пр. / ОДАХТ.
– О., 2001. – Вип. 21. – С. 16.
8. 11. Вобликов, Е.Б. Послеуборочная обработка и хранение зерна
[Текст] / Е.Б. Вобликов, В.А. Буханцов, Б.К. Маратов и др. – Ростов
н/Д: издательский центр «МарТ», 2001. – 240 с.
9. 3. Бурдо О.Г., Бандура В.Н., Ружицкая Н.В. Принципы адресного
подвода энергии при переработке пищевого сырья // Інтегровані
технології та енергозбереження. Щоквартальний науково-
практичний журнал – Харків: НТУ «ХТІ», 2014.–№4.– С.79-85.

10. Бандура В.М. Перспективи комбінованих методів переробки олійних культур. Зб.наук. пр. Вінницького національного аграрного університету. Вип. 8. Серія: Технічні науки. Вінниця, 2011. С.32-36.
11. 17. Гинзбург, А.С. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы [Текст] / А.С. Гинзбург, М.А. Громов. – М.: Колос, 1984. – 304 с.
12. Бандура В.М. Енергоефективні технологічні процеси переробки олійних культур. Наукові праці ОНАХТ. Випуск 39, Том 2, Одеса 2011. С.234-240.
13. 31. Егоров, Г.А. Влияние тепла и влаги на процессы переработки и хранения зерна [Текст] / Г.А. Егоров. – М.: Колос, 1973. – 264 с.
14. 20. Дзядзио, А.М. Вентиляционные установки зерноперерабатывающих предприятий [Текст] / А.М. Дзядзио. – М.: Колос, 1974. – 398 с.
15. 36. Зверев, С.В. Физические свойства зерна и продуктов его переработки: підруч. / С.В. Зверев, Н.С. Зверева – М.: ДеЛи принт, 2007. – 176 с.
16. 37. Зерновий та хлібопродуктовий товарообіг в Україні: Енциклопедичний довідник [Текст] / В.Т. Александров, М.В. Гладій, Є.М. Лавров і ін. – К.: АртЕк, 2000. – 500 с.
17. 41. Исследование кинетики конвективно-микроволновой сушки зерновых культур в неподвижном слое [Текст] / Т.Ю. Дементьева, Г.Н. Станкевич, Л.К. Овсянникова, Е.Г. Соколовская // Междунар. научно-техн. семинар «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов» [Текст]: материалы семинара; Фед. агентство по образованию, ГОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2010. – С. 286-295.
18. 42. Исследование микроволнового поля для повешения урожайности полевых культур и защиты семян от вредителей и болезней [Микроволновые технологии в народном хозяйстве. Внедрение. Проблемы. Перспективы [Текст] / Л.Г. Калинин, В.П. Тучный, Е.А.

- Левченко и др. – К.-О.: АСП, 2002. – Вып. 4. – С. 8-35.
19. 44. Кіндрук, М.О. Насінництво й насіннезнавство зернових культур [Текст] / М.О. Кіндрук. – К.: Аграрна наука, 2003. – 118 с.
 20. 49. Леус, Н.Г. Влияние микроволнового поля на некоторые биохимические показатели зерна пшеницы и ячменя [Текст] / Н.Г. Леус, С.Г. Коломейчук, Л.Г. Калинин // Хранение и переработка зерна. – 2001. – № 1. – С. 42.
 21. 51. Лыков, А.В. Тепломассообмен [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.
 22. 52. Малин, Н.И. Технология хранения зерна [Текст] / Н.И. Малин. – М.: Колос, 2005. – 280 с.
 23. 54 Мельник, Б.Е. Технология приемки, хранения и переработки зерна. [Текст]: учеб. / Б.Е. Мельник, В.Б. Лебедев, Г.А. Винников. – М.: Агропромиздат, 1990. – 367 с.
 24. 63 Обзор рынка масличных культур [Электронный ресурс]. – Режим доступа: < <http://skalat.info/stati-o-masle-oil/46-rynok-maslichnyh-kultur-ukrainy> >
 25. 64 Овсянникова, Л. Для ефективного очищення насіння ріпаку від важковідокремлюваних домішок варто достовірно знати фізико-механічні властивості цих високоолійних культур [Текст] / Л. Овсянникова, С. Орлова, Г. Гончарук // Зерно і хліб. – 2007. – № 2. – С. 24-25.
 26. 68 Овсянникова, Л.К. Дослідження температури насіння сорго при зберіганні в металевих силосах [Текст] / Л.К. Овсянникова, О.Г. Соколовська, О.М. Шевчук // Наук. пр. / ОНАХТ. – О., 2012. – Вип. 42, т. 1. – С. 6-11.
 27. 69 Овсянникова, Л.К. Дослідження тепломасообмінних процесів у зерновій масі олійних культур [Текст] / Л.К. Овсянникова, С.С. Орлова // Зернові продукти і комбікорми. – 2004. – № 3. – С. 48-50.

28. 75 Орлова С.С. Аналіз статистичних характеристик розмірів дрібнонасіньєвих культур для обґрунтування їх післязбиральної обробки [Текст] / С.С. Орлова, О.Г. Соколовська // Наук. пр. молодих вчен., асп. та студ. / ОНАХТ. – О., 2009. – С. 128.
29. 77 Остапчук М.В. Математичне моделювання на ЕОМ [Текст]: підруч. / М.В. Остапчук, Г.М. Станкевич. – О.: Друк, 2006. – 313 с.
30. 79 Пат. на изобретение 2267067 Российская Федерация, МПК F26B17/12, F26B3/347. Установка для сушки сыпучих материалов и вертикальная сушильная камера / Оболенский А.С., Сахаров Л.В., заявитель патентообладатель ООО «Аграрные сверхвысокочастотные технологии», (ООО «АСТ») - № 2004101907; заявл.25.12.05
31. 82 Платонов, П.Н. Элеваторы и склады [Текст] / П.Н. Платонов, В.Г. Лебединський, В.Б. Фасман. – М.: Колос, 1971. – 311 с.
32. 85 Програма розвитку виробництва дизельного біопалива. Затверджено постановою кабінету міністрів України від 22 грудня 2006 р. № 1774 [Текст]. – Київ.
33. 86 Разработка оптимальных режимов и способов сушки семенного рапса [Текст] / Ю.Ф. Снежкин, Д.В. Чалаев, Р.А. Шапарь и др. // Зернові продукти і комбікорми. – 2006. – № 4. – С. 38.
34. 88 Рогов, И.А. Сверхвысокочастотный нагрев пищевых продуктов [Текст] / И.А. Рогов, С.В. Некрутман. – М.: Агропрмиздат, 1986. – 351 с.
35. 90 Самойленко, В.В. Сорго зернофуражне і харчове [Текст] / В.В. Самойленко, А.Т. Самойленко // Хранение и переработка зерна. – 2001. – № 2. – С. 30.
36. 102 Станкевич, Г. Перспективний, високорентабельний та екологічний ріпак [Текст] / Г. Станкевич, О. Берегова // Зерно і хліб. – 2003. – № 3. – С. 39.
37. 103 Станкевич, Г. Повчимося очищати й сушити ріпак [Текст] / Г.

- Станкевич, Т. Страхова, О. Берегова // *Зерно і хліб*. – 2003. – № 4. – С. 17.
38. 105 Станкевич, Г.М. Дослідження аеродинамічних властивостей та активного вентилявання дрібнонасінневих культур [Текст] / Г.М. Станкевич, Л.К. Овсянникова, О.Г. Соколовська // *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка «Механізація с/г виробництва та переробки с/г продукції»*. – Харків, 2010. – Вип. 103. – С. 409.
39. 107 Станкевич, Г.М. Сушіння зерна [Текст]: підруч. / Г.М. Станкевич, Т.В. Страхова, В.І. Атаназевич. – К.: Либідь, 1997. – 351 с.
40. 112 Стародубцева, А.И. Практикум по хранению зерна [Текст] / А.И. Стародубцева, В.С. Сергунов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 192 с.
41. 113 Сушити насінневий ріпак оптимально за температури 50 °С конденсаційним методом [Текст] / Ю. Снежкин, Р. Шапар, Ж. Петрова та ін. // *Зерно і хліб*. – 2007. – № 1. – С. 52.
42. 115 Теория хранения зерна [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <<http://zernolab.com.ua/ru/view-news/id-teoriya-hraneniya-zerna-11.htm>>
43. 125 Трисвятский, Л.А. Хранение зерна [Текст] / Л.А. Трисвятский. – М.: Агропромиздат, 1986. – 400 с.
44. 126 Тучний, В.П. Настоящее и будущее микроволновых технологий [Текст] / В.П. Тучний, В.М. Иванов, Е.А. Левченко и др. // *Хранение и переработки зерна*. – 2006. – №6(84). – С. 20.
45. 129 Установление оптимальных режимов и способов сушки семенного рапса [Текст] / Ю.Ф. Снежкин, Д.М. Чалаев, Р.А. и др. // *Хранение и переработка зерна*. – 2006. – № 11. – С. 27.
46. 128 Уланчук, В.С. Напрями підвищення ефективності виробництва насіння ріпаку / В.С. Уланчук, С.М. Дишлюк [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <<http://udau.edu.ua/library.php?pid=390>>
47. 120 Тіора, В. Дослідження сорбційних властивостей ріпаку та

- гірчиці [Текст] / В. Тіора // Наук. пр. молодих вчен., асп. та студ. / ОНАХТ. – 2007. – С. 55.
48. 141 [Bala](#), B. K. Drying and Storage of Cereal Grains [Text] / [B. K. Bala](#) – 1997– 302 p.
49. 153 Maysey, E.B. The effect of temperature and moisture on the thermal properties of rapeseed [Text] / Maysey E.B, Shaw G.T. Lampman W.P. // Trans. ASAE. – 1977. – Vol. 20. – №4. – P. 788.
50. 161 Sharma, D.K. Specific Heat and Thermal Conductivity of Sorghum [Text] / D.K. Sharma, T.L. Thompson. – Trans ASAE. – 1973. – № 16. – P. 114.