

## ЕКОЛОГІЯ

УДК 66.047.7

**Технологічні аспекти розроблення термовакуумної установки сушіння зерна з одночасною дегідратацією і дезінсекцією**Кутовий В.О.<sup>1</sup> , Куцан О.Т.<sup>2</sup> <sup>1</sup> Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»<sup>2</sup> Інститут ветеринарної медицини НААН

Кутовий В.О., Куцан О.Т. Технологічні аспекти розроблення термовакуумної установки сушіння зерна з одночасною дегідратацією і дезінсекцією. Збірник наукових праць «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва», 2023. № 2. С. 137–144.

Kutovy V., Kutsan O. Technological aspects of the development of thermal vacuum installation for drying grain with simultaneous dehydration and disinsection. «Animal Husbandry Products Production and Processing», 2023. № 2. PP. 137–144.

Рукопис отримано: 04.09.2023 р.

Прийнято: 18.09.2023 р.

Затверджено до друку: 23.11.2023 р.

doi: 10.33245/2310-9289-2023-182-2-137-144

Україна є одним із найбільших виробників зернової продукції. Через природно-кліматичні умови щорічно від 50 до 80 % зібраного врожаю зернових культур підлягає сушінню та дезінсекції. Сушіння і одночасна дезінсекція зерна є основними технологічними операціями з видалення збиткової вологи із зернового матеріалу та звільнення його від комірних шкідників, що в масштабах країни забезпечує уникнення мільйонних збитків. У статті наведено матеріали щодо розроблення високоефективної екологічно чистої установки та енергозберігальної технології дегідратації з одночасною дезінсекцією вологого зерна, яка забезпечує висушування зерна за короткий проміжок часу до вологості 12...14 % та знищення шкідників. В огляді обговорюються основні сушильні установки конвективного типу, які використовують нагріте повітря. Проаналізовано їх основні позитивні та негативні сторони використання. Представлено експериментальну модель розробленої високоефективної екологічно чистої установки сушіння зерна з фізико-математичним обґрунтуванням. Обчислено такі показники, як швидкість завихрення зерна ( $v_B$ ) за різних температур, величина відцентрової сили зерна ( $F$ ), що рухається в порожнині нагрівального елемента спіральним каналом. Обґрунтовано миттєвий процес передавання теплової енергії від стінки нагрівача до вологого зерна. Так, елемент поверхні ( $dS$ ) вологого зерна отримує потік теплової енергії ( $dQ$ ) з температурою ( $T$ ) за короткий проміжок часу ( $\Delta t$ ) за коефіцієнта теплопередачі ( $a$ ).

Експериментально доведено, що на дегідратацію зерна впливає, щонайменше, три параметри: температура нагрівання, його вологість та тиск у вакуумній камері. Усі параметри між собою взаємопов'язані та впливають на технологічні показники. Таким чином, застосування термовакуумної технології є альтернативою традиційним високотемпературним способам сушіння зернових культур.

**Ключові слова:** термовакуумна дегідратація зерна, сушильна установка, дезінсекція.

**Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень.** Показником термостабільності зерна є максимально допустима температура його нагрівання, яка повинна бути нижчою температури денатурації рослинних білків [1]. Зміни показників вологості і температури зерна під час сушіння суттєво впливають на мукомельні, а також на хлібопекарські і кулінарні властивості борошна. Насіннєве зерно під час сушіння допустимо нагрівати до 318 °К, продовольче – до 328 °К, фуражне – до 333 °К [2, 3].

Таким чином, інтенсифікація процесу сушіння зерна шляхом підвищення температури навколишнього середовища є неприйнятною, необхідно досить ретельно підходити до питання вибору температурного режиму.

Впровадження нових методів і прогресивних технологій у процесі сушіння зерна є найважливішим засобом підвищення ефективності роботи зерносушильного обладнання за рахунок зниження енергоспоживання, покращення якості висушеного продукту та зниження його

собівартості. Крім того, конструкція агрегату для сушіння повинна бути надійною, довговічною, повністю вписуватись у конструктивні та технологічні рішення під час сушіння термолабільних матеріалів [4, 5, 6].

У зв'язку з безперервним підвищенням цін на енергоносії актуальною є проблема зниження частки енергозатрат у собівартості сушіння зерна, яка, за оцінками експертів, сягає 75–80%. Пошук оптимального науково-технічного рішення для сушіння термочутливих матеріалів є світовою проблемою. Необхідно створювати перспективні технології і обладнання для сушіння, які б відповідали світовому рівню, а в деяких випадках перевищували його за низкою показників. Використання нової технології та нового обладнання дасть змогу скоротити питомі затрати умовного палива.

**Метою роботи** є розроблення високоефективної екологічно чистої установки та енергозберігальної технології дегідратації та одночасної дезінсекції вологого зерна, що дасть змогу висушувати зерно за короткий проміжок часу до вологості 12–14 % та знищувати комірних шкідників.

**Матеріал і методи дослідження.** Представлена експериментальна модель розробленої високоефективної екологічно чистої установки сушіння зерна за технологічними особливостями та фізико-математичними критеріями. Обчислено такі показники: швидкість завихрення зерна ( $v_B$ ) за різних температур, величина відцентрової сили зерна ( $F$ ), що рухається в порожнині нагрівального елемента спіральним каналом. Обґрунтовано миттєвий процес передавання теплової енергії від стінки нагрівача до вологого зерна. Так, елемент поверхні ( $dS$ ) вологого зерна отримує потік теплової енергії ( $dQ$ ) з температурою ( $T$ ) за короткий проміжок часу ( $\Delta t$ ) за коефіцієнтом теплопередачі ( $a$ ). Також відпрацьовувалась температура ( $T$ ) усередині поверхневого шару вологого зерна у момент дотику до стінки нагрівача за умови інтенсивного випаровування вологи ( $T_1 > T$ ), щоб не відбулося миттєвого перегрівання рідини і не почався процес інтенсивного паровиділення у поверхневому шарі зерна. Проводили контроль за тиском насиченої пари всередині поверхневого шару. Експериментально було визначено умови, які б не спричиняли локального імпульсного парового вибуху, що призводить до руйнування зерна.

**Результати дослідження та обговорення.** В Україні використовується широка номенклатура зерносушарок як вітчизняних, так і закордонних виробників [7–10].

Сьогодні використовують здебільшого сушильні установки конвективного типу, в яких

застосовують нагріте повітря, яке передає тепло до зерна і видаляє вологу, що випаровується. Повітря, своєю чергою, нагрівають спалюванням рідкого палива, або природного газу. При цьому необхідно використовувати певні види палива, що не забруднюють навколишнє природне середовище та зерно канцерогенними речовинами. Тому сушильні установки, які працюють на рідкому паливі, обладнано теплообмінником, що забезпечує подання чистого повітря до вологого матеріалу [11, 12]. Сушильні установки безперервної дії — шахтні, колонні, карусельні [13, 14]. Установки для сушіння періодичної дії — камерні, лоткові та інші [15]. Для усіх цих установок використовується рідке паливо, потреба в якому становить 0,8...0,9 млн т на рік. Висушене зерно, відповідно, повинно бути екологічно чистим, мати високі харчові якості та звільненим від комірних шкідників [16].

Загальні недоліки зерносушарок на рідкому паливі:

- недостатня інтенсивність процесу сушіння;
- громіздкість;
- можливість перегріву зерна;
- невисока ефективність;
- висока вартість;
- доставка рідкого палива до місця сушіння зерна.

У таких зерносушарках складно контролювати залежність між температурою нагрітого повітря і температурою зерна. Необхідно контролювати об'єм повітря та його вологість. Важливими факторами ефективності установки для сушіння конвективного типу є відношення температури повітря до його витрат та тривалості сушіння. Швидкість сушіння зерна перебуває у прямій залежності від температури повітря. З підвищенням температури зерна об'єм повітря має містити більшу кількість тепла. Ефективність установки для сушіння змінюється залежно від погодних умов. За низької температури повітря температура зерна може бути підвищена шляхом збільшення кількості тепла, яке додається до повітря [4, 5, 6]. Ефективність установки для сушіння залежить також від того, наскільки міцно під час сушіння утримується волога всередині зерна певного виду. Дрібні зерна втрачають вологу швидше, ніж крупні. Якість зерна у разі сушіння нагрітим повітрям низька. Найпоширенішим пошкодженням зерна під час його сушіння є утворення тріщин, що спричинюється високою швидкістю сушіння. Таке пошкодження виявляється в утворенні тріщин на поверхні зерна або всередині. Якщо молоти

зерно із тріщинами, знижується вихід борошна вищого гатунку. Для запобігання утворенню тріщин необхідно контролювати як температуру сушильного агента, так і швидкість видалення вологи із зерна. Утворення тріщин зростає за зростання температури сушильного агента. Швидке охолодження висушеного зерна також сприяє зростанню його руйнування. Розробляється, наприклад, технологія з використанням газових рециркуляційних сушарок з протитоковим короткотерміновим та інтенсивним підігріванням. Ця технологія дає змогу оптимізувати (за енергетичним критерієм) процес сушіння зерна різної вологості у потоці та забезпечує високу якість за мінімальних витрат палива. Використання нової технології і нового обладнання дало можливість скоротити питомі витрати умовного палива.

В останні роки для зберігання і сушіння зерна використовують сховища з аерожолобами, в яких сушіння зерна виконується вентиляванням, хоча цей метод енергоємний і нерентабельний. Широкого розвитку набули комбіновані процеси сушіння, які поєднують високошвидкісний процес високотемпературного сушіння періодичної або безперервної дії з низькотемпературним внутрішньобункерним сушінням. Переваги такого комбінованого сушіння — у підвищенні пропускної здатності сушарок, скороченні витрат палива, покращенні якості висушеного зерна.

Використання струмів високої частоти для сушіння зерна дає змогу зменшити час сушіння

і температуру нагрівання матеріалів до гранично допустимих. Робота таких установок високоефективна і рентабельна. Сьогодні тривають роботи щодо впровадження цих установок у виробництво. Недоліком таких установок є наявність високочастотного поля та висока вартість.

Розробляються також вакуумні імпульсні установки для сушіння. Після швидкого нагрівання зерна до відповідної температури камера для сушіння з зерном піддається імпульсному (менше 1,0 с) вакуумуванню. Для цього автоматично перекривають вакуумні клапани на лініях подання та відведення теплоносія, і, відповідно, відкриваються швидкодіючі клапани на лінії вакуумування. За імпульсного вакуумування та витримуванні під вакуумом (1,3...2,4 кПа) зерно за рахунок інтенсивного випаровування вологи охолоджується. Подальші цикли нагрівання, імпульсного вакуумування, скидання вакууму повторюються до досягнення зерновою культурою кіцевої (12...14 %) вологості. Недоліком цієї установки є те, що різкий перепад тиску і температури призводить, як було описано вище, до розтріскування оболонки зерна. Тому зерно, висушене у такий спосіб, можна використовувати лише як фуражне.

У розробленій нами високоефективній екологічно чистій установці з дотриманням енергозберігальної технології дегідратації зерно (1) надходить у внутрішню частину нагрівального елемента (2) термовакуумної установки разом із повітрям (рис. 1) [16].

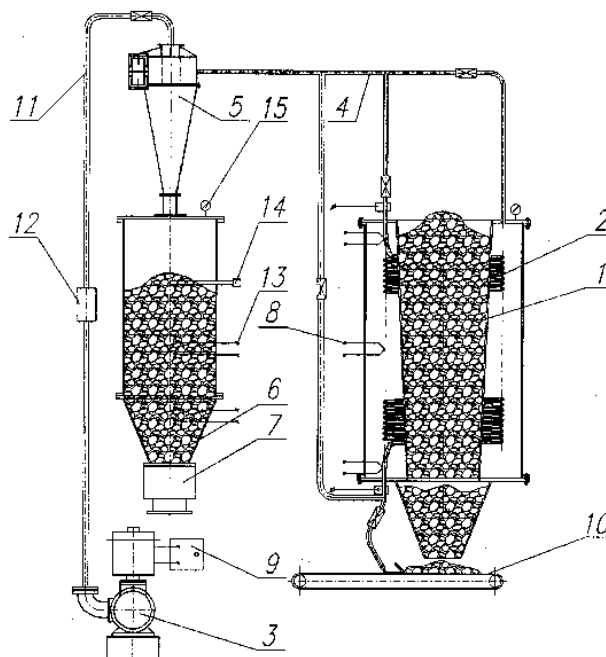


Рис. 1. Схема термовакуумної установки.

Нагрівальний елемент має форму спіралі. Зерно з транспортера (10) разом з повітрям потрапляє на внутрішню частину нагрівального елемента. Для того щоб зерно рухалось всередині нагрівального елемента, у вихідному потоці необхідно, щоб швидкість завихрення зерна задовольняла умову [16].

$$v_B = v_1 \sqrt{\frac{\rho_{1A}}{\rho_{2A}}}, \quad (1)$$

де  $v_B$  – швидкість завихрення, м/с;

$v_1$  – швидкість завихрювання за температури 293 °К, м/с;

$\rho_{1B}$  – густина повітря за температури 293 °К, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{2B}$  – густина повітря за температури нагрівання, кг/м<sup>3</sup>.

Так, за температури навколишнього середовища 298 °К швидкість завихрення зерна пшениці становить приблизно 14 м/с.

На зерно, що рухається в порожнині нагрівального елемента спіральним каналом, діє відцентрова сила  $F$ .

$$F = \frac{mv^2}{R}, \quad (2)$$

де  $m$  – зерно, (кг);  $v$  – швидкість руху зерна в порожнині спірального нагрівального елемента, м/с;

$R$  – радіус спіралі нагрівального елемента, м.

Відцентрова сила притискає зерно до стінки нагрівального елемента. Між поверхневою площиною зерна та стінкою нагрівача утворюється тісний контакт, що дає змогу максимально використовувати тепло нагрівального елемента. Відбувається миттєвий процес передавання теплової енергії від стінки нагрівача до вологого зерна [7]. Елемент поверхні  $dS$  (м<sup>2</sup>) вологого зерна отримує потік теплової енергії  $dQ$  (Дж) з температурою  $T$  (К) за короткий проміжок часу  $d\tau$  (с) за коефіцієнта теплопередавання  $a$ , (Вт/м<sup>2</sup>·К):

$$dQ = a \cdot T \cdot d\tau \cdot dS. \quad (3)$$

Тепловий опір  $R_c$  поверхневого шару зерна визначає товщину проникнення теплової енергії всередину вологого матеріалу:

$$l = R_c \cdot dS \cdot \lambda,$$

де  $l$  – товщина проникнення теплової енергії всередину вологого зерна, м;

$R_c$  – тепловий опір зерна, К/Вт;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності зерна, Вт/м·К.

Підставивши значення  $dS$  із виразу (2) у вираз (3), отримаємо товщину проникнення теплової енергії  $dQ$  всередину вологого зерна за певний проміжок часу  $d\tau$ .

$$l = \frac{R_c \cdot \lambda \cdot dQ}{a \cdot T \cdot d\tau} = \frac{R_c \cdot \lambda \cdot P}{a \cdot T}, \quad (4)$$

де  $P = dQ/d\tau$  – теплова потужність, Вт.

Температура ( $T$ ) усередині поверхневого шару вологого зерна у момент дотику до стінки нагрівача не повинна бути вищою за температуру ( $T_1$ ) інтенсивного випаровування вологи ( $T_1 > T$ ), щоб не відбулося миттєвого перегрівання рідини і не почався процес інтенсивного паровиділення у поверхневому шарі зерна. У результаті цього тиск насиченої пари усередині поверхневого шару стає значно вищим, ніж на поверхні. Утворюється локальний імпульсний паровий вибух, що призводить до руйнування зерна. Температура зерна під час дегідратації не повинна перевищувати 323 °К.

У нагрітому стані зерно через трубопровід (4) потрапляє в циклон-розподільник (5), а з нього – у вакуумний об'єм (6). У циклоні зерно відділяється від сумішей, комах, і частково звільняється від вологи. Різні домішки і комахи залишаються на фільтрі (12), а пара та газу по трубопроводу (11) переходять у насос (3).

Контроль за температурою нагрівального елемента з точністю  $\pm 1^\circ\text{C}$ , виконується за допомогою вимірювача температури (8). За досягнення нагрівачем заданої температури прилад подає сигнал на вимкнення електричного струму від нагрівача. Після зниження температури нижче заданої прилад подає сигнал для увімкнення джерела енергії нагрівального елемента. За температурою нагрітого зерна, яке надходить у бункер, також здійснюється контроль. Якщо в бункер надходить зерно з температурою вищою від заданої, прилад (13) дає сигнал на вимкнення джерела енергії від нагрівача. У міру заповнення бункера нагрітим зерном датчик рівня (14) подає сигнал на вимкнення вакуумного трубопроводу, який подає нагріте зерно у вакуумний бункер і вмикає вакуумний трубопровід, який подає нагріте зерно до порожнього вакуумного бункера.

Насос створює в бункері тиск  $26,6 \cdot 10^2$  Па і видаляє вологу, яка випаровується із бункера. За досягнення зерном вологості 12 % індикатор вологості подає сигнал шлюзовому засуву (7) на вивантаження зерна із бункера. У міру заповнення фільтра дрібними частинами і комахами пропускна здатність фільтра погіршується та змінюється тиск у трубопроводі (11).

Індикатор тиску (15) подає сигнал на увімкнення вібраційного приладу фільтра, внаслідок чого пропускна здатність фільтра покращується. Установка продовжує працювати в штатному режимі. Управління термовакуумною установкою здійснюється з пульта (9).

Під час проходження вологого зерна в порожнині нагрівального елемента за 20 с відбувається перемішування і рівномірне його нагрівання. Вологість зерна знижується до 8 %, при цьому зерно нагрівається до температури не більш, як 323 °К. (Рис. 2).

12 % в сушильній шафі за атмосферного тиску впродовж 9 годин, що у 9 разів повільніше, порівняно з термовакуумною установкою. Низькотемпературний режим сушіння насінневого зерна зберігає поживні речовини та забезпечує його життєздатність.

У термовакуумній установці рух вологи із внутрішньої частини каркасу зерна назовні відбувається за нижчих температур. Інтенсивність дегідратації зерна залежить від температури нагрівача, тиску навколишнього середовища, коефіцієнта дифузії вологи.

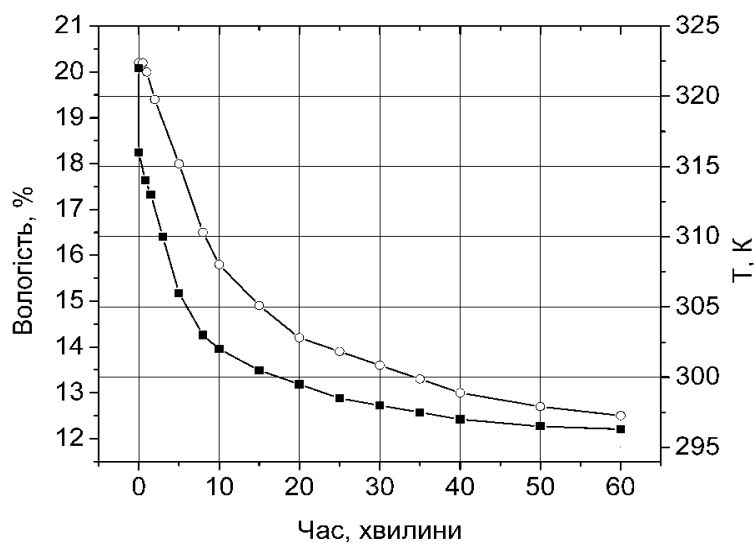


Рис. 2. Зміни вологості зерна (%) і температури (К) під час термовакуумного сушіння.

Із нагрівального елемента зерно потрапляє у вакуумний бункер-накопичувач. У бункері вологе зерно продовжує висихати за рахунок градієнту тиску навколишнього середовища і тиском у тілі зерна, теплової енергії, яку зерно отримало під час перебування в нагрівальному елементі. Через 60 хвилин його вологість становить приблизно 12 %. За цей час температура зерна знижується до 297 °К.

Отже, на дегідратацію зерна впливає щонайменше три параметри: температура нагрівання, його вологість та тиск у вакуумній камері. Усі параметри між собою взаємопов'язані та впливають на технологічні показники. Спосіб термовакуумної дегідратації не чинить забруднення навколишнього середовища та безпосередньо зерна. Для порівняння – зерно із початковою вологістю 20 % висихає до вологості

Дослідження показали, що зерно швидко нагрівається, але повільно віддає вологу. Максимально допустима температура нагрівання зерна визначається термостійкістю його білкового компонента. Для дегідратації насінневого зерна необхідно застосовувати низькотемпературний режим, який зберігає поживні речовини в зерні, щоб воно залишалось життєздатним. Як видно із рисунка 3, алейронові клітини, крохмаль, білок, клейковина в зерні збережені, не зруйновано оболонки зерна, збережено від руйнування алейроновий пласт, який, своєю чергою, повністю зберігає клітини ендосперму.

У разі підвищення температури нагрівання життєздатні клітини гинуть, і зерно може використовуватись як фуражне (рис. 4).

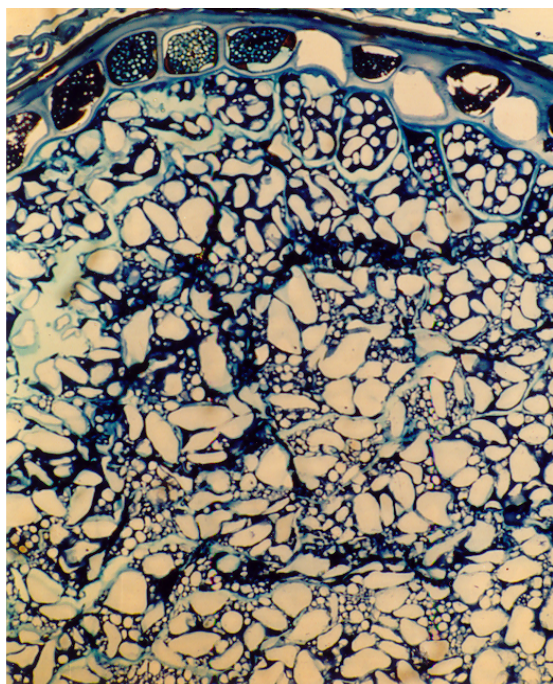


Рис. 3. Дегідратація зерна за температури 343 °К.

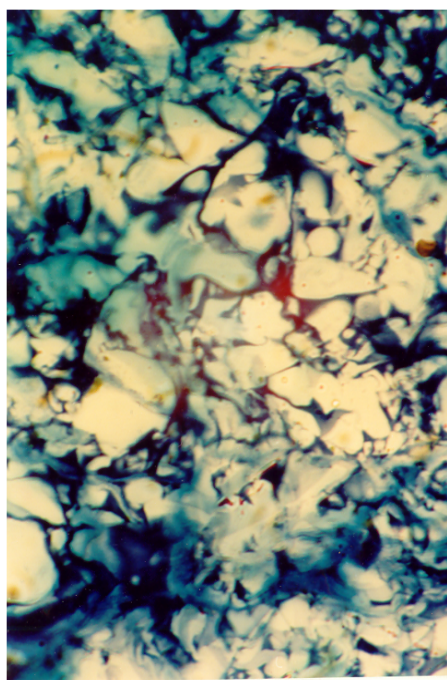


Рис. 4. Дегідратація зерна за температури 318 °К.

Із викладеного вище слідує, що для дегідратації зерна раціонально застосовувати термовакуумний метод, оскільки термовакуумна технологія є альтернативою традиційним високотемпературним способам сушіння зернових культур. Перевагою термовакуумної дегідратації є те, що за залишкового тиску 1,3...6,6 кПа у зерні гинуть різноманітні шкідники та мікроорганізми. Дослідним шляхом встановлено, що довгоносик комірний, борошноїд, борошняний кліщ у вакуумі гинуть практично миттєво.

На підставі аналізу експериментальних досліджень із дегідратації зерна слідує, що термовакуумна установка задовольняє вимоги, до зерносушильних агрегатів та має низку переваг порівняно з традиційними способами сушіння та існуючими зерносушарками. Технічні дані термовакуумної установки для дегідратації зерна є такими:

- прискорений процес дегідратації за рахунок підвищення інтенсивності випаровування у вакуумному об'ємі;
- енергоносій – електричний струм;
- немає необхідності в придбанні і постачанні рідкого або твердого палива, природного газу;
- зерно не підгорає, не розтріскується; низька температура нагрівання, що запобігає перегріванню зерна;
- відсутність забрудненості зерна продук-

тами згорання палива забезпечує екологічну чистоту висушеного зерна;

- можливість очищення зерна від легких домішок та комах;
- безперервний процес дегідратації з дезінсекційною обробкою зерна;
- надійність та безпечність;
- продуктивність та мобільність;
- низька металоємність та малі габарити;

**Висновки.** Розроблена термовакуумна технологія дегідратації зерна дає можливість безперервно, рівномірно і з високою продуктивністю видаляти вологу із зерна, не змінюючи його фізичних, фізіологічних та біохімічних властивостей. Нагрівання зерна відбувається за рахунок електроенергії. Температура нагрівання не перевищує 323 °К, що запобігає перегріванню зерна. Зерно під час дегідратації не підгорає і не розтріскується. Відсутнє забруднення зерна продуктами згорання палива. Відсутня потреба у придбанні і використанні рідкого або твердого палива, природного газу для нагрівання зерна. Термовакуумний метод дає змогу одночасно проводити дегідратацію і очищення зерна від легких домішок і комах та значно знижує час на підготовку зерна до тривалого зберігання. Термовакуумна дегідратація дає змогу здешевити і покращити якість отриманої продукції, знижує енерговитрати на одиницю висушеної продукції, сприяє

збереженню навколишнього природного середовища, зберігає біологічну цінність зерна, покращує умови праці персоналу, знижує питомі витрати умовного палива.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Nurhaslina C.R., Bacho S.A., Mustapa A.N. Review on drying methods. *Materials Today: Proceedings*. 2022. P. 27–28. DOI:10.1016/j.matpr.2022.02.052.
2. Станкевич А. В., Страхова Т. В., Антаназевич В. І. Сушіння зерна. К.: Либідь, 1997. 352 с.
3. Cold Plasma: A Potential Alternative for Rice Grain Postharvest / M.F.I. Mianal et al. *Treatment Management in Malaysia*. 2021. P. 67–74. DOI:10.1007/s00267-020-01365-7.
4. Ginzburg A. S. Calculation and design of drying plants of the food industry. M.: Agropromizdat, 1985. 336 p.
5. Do L. T. K., Vu L. T. K., Phan D. T. A. Mathematical modeling and optimization of low-temperature vacuum drying for banana. *Carpathian Journal of Food Science. Abstracts*. 2021. P. 202–203. DOI:10.34302/crpfst/2021.13.4.5.
6. Mathematical modeling on Vacuum drying of Olive Pomace / M.I. Maamar et al. *Trends in Sciences*. 2023. P. 186–188. DOI:10.48048/tis.2023.3822.
7. Obeid K. Al., Barr A. Energieeffektivisering av Scania's automationsindustri: En studie som syftar till att förbättra Scania's verktyg. MDC-EE och utfors för att eliminera icke vardegivande. 2022. 176 p. DOI:10.1016/j.cirp.2022.05.008.
8. Low-pressure conductive thin film drying of acai pulp / R da Silva Simão et al. *LWT*. 2022. 123 p. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113695.
9. Intermittent high-power short-time microwave-vacuum treatment combined with steam impingement for effective microbial decontamination of black pepper (*Piper nigrum*) / P. Sharma et al. *Journal of Food Engineering*. 2023. Vol. 343. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2022.111373.
10. Harahap H. M. Penerapan Metode Pengeringan Vakuum Pada Teh Herbal dari Daun Gaharu (*Aquilaria mallacensis*). *Journal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*. 2022. P. 391–395. ISSN 2808-7712 (Online).
11. The virgin coconut oil (VCO) emulsion powder characteristics: effect of pickering emulsion with microcrystalline cellulose (MCC) and different drying techniques / B. Nurhadi et al. *Italian Journal of Food*. 2022. P. 41–46. DOI:10.15586/ijfs.v34i1.2111.
12. Tan C. H., Hii C. L., Borompichaichartku C. Valorization of fruits, vegetables and their by-products. *Drying Technology*. 2022. P. 317–319. DOI:10.1080/07373937.2022.2068570.
13. Susilo B., Rohim A., Filayati M. Vacuum drying as a natural preservation method of post-harvest lemon might accelerate drying duration and produce the high-quality of dried lemon slices. *Food Science and Technology*. 2022. P. 48–54. DOI:10.1590/fst.58722.
14. Impact of plasma irradiation on *Tribolium castaneum* / W.A.A. Sayed et al. *Journal of Pest Science*. 2021. P. 43–49. URL:https://link.springer.com/article/10.1007/s10340-021-01360-9.

15. Bazyma L., Kutovoy V. Vacuum drying and hybrid technologies. *Stewart Postharvest Review*. 2005. 1. P. 1–4. DOI:10.2212/spr.2005.4.7.

16. Sharma P., Xiao H.W., Zhang Q., Sutar P.P. Intermittent high-power short-time microwave-vacuum treatment combined with steam impingement for effective microbial decontamination of black pepper. *Journal of Food Engineering. Abstract Black Pepper*. 2022. P. 875–879. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2022.111373.

#### REFERENCES

1. Nurhaslina, C. R., Bacho, S. A., Mustapa, A. N. (2022). Review on drying methods. *Materials Today: Proceedings*. pp. 27–28. DOI:10.1016/j.matpr.2022.02.052.
2. Stankevich, A. V., Strahova, T. V., Antanazevich, V. I. (1997). *The grain drying*. K.: Lybed, 352 p. (in Ukrainian).
3. Mianal, M. F. I., Redzuan, N., Zainal, M. N. F., Ahmad, N. (2021). Cold Plasma: A Potential Alternative for Rice Grain Postharvest. *Treatment Management in Malaysia*. pp. 67–74. DOI:10.1007/s00267-020-01365-7.
4. Ginzburg, A. S. (1985). *Calculation and design of drying plants of the food industry*. M.: Agropromizdat, 336 p.
5. Do, L. T. K., Vu, L. T. K., Phan, D. T. A. (2021). Mathematical modeling and optimization of low-temperature vacuum drying for banana. *Carpathian Journal of Food Science. Abstracts*. pp. 202–203. DOI:10.34302/crpfst/2021.13.4.5.
6. Maamar, M. I., Badraoui, M., Mazouzi, M., Mouakkir, L. (2023). Mathematical modeling on Vacuum drying of Olive Pomace. *Trends in Sciences*. pp. 186–188. DOI:10.48048/tis.2023.3822.
7. Obeid, K. Al., Barr, A. (2022). Energieeffektivisering av Scania's automationsindustri: En studie som syftar till att förbättra Scania's verktyg. MDC-EE och utfors för att eliminera icke vardegivande. 176 p. DOI:10.1016/j.cirp.2022.05.008.
8. Simão, R da Silva., Zhang, L., de Moraes, J. O., Schröder, A. (2022). Low-pressure conductive thin film drying of acai pulp. *LWT*. 123 p. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113695.
9. Sharma, P., Xiao, H., Zhang, Qi., Sutar, P. P. (2023). Intermittent high-power short-time microwave-vacuum treatment combined with steam impingement for effective microbial decontamination of black pepper (*Piper nigrum*). *Journal of Food Engineering*, Vol. 343. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2022.111373.
10. Harahap, H. M. (2022). Penerapan Metode Pengeringan Vakuum Pada Teh Herbal dari Daun Gaharu (*Aquilaria mallacensis*). *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Pertanian*, pp. 391–395. ISSN 2808-7712 (Online).
11. Nurhadi, B., Selly, S., Nurhasanah, S., Saputra, R. A. (2022). The virgin coconut oil (VCO) emulsion powder characteristics: effect of pickering emulsion with microcrystalline cellulose (MCC) and different drying techniques. *Italian Journal of Food*, pp. 41–46. DOI:10.15586/ijfs.v34i1.2111.

12. Tan, C. H., Hii, C. L., Borompichaichartku, C. (2022). Valorization of fruits, vegetables and their by-products. *Drying Technology*. pp. 317–319. DOI:10.1080/07373937.2022.2068570.

13. Susilo, B., Rohim, A., Maj Filayati (2022) Vacuum drying as a natural preservation method of post-harvest lemon might accelerate drying duration and produce the high-quality of dried lemon slices. *Food Science and Technology*. pp. 48–54. DOI:10.1590/fst.58722.

14. Sayed, W. A. A., Hassan, R. S., Sileem, T. M., Rumpold, B. A. (2021). Impact of plasma irradiation on *Tribolium castaneum*. *Journal of Pest Science*, pp. 43–49. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10340-021-01360-9>.

15. Bazyma, L., Kutovoy, V. (2005). Vacuum drying and hybrid technologies. *Stewart Postharvest Review*, 1, pp. 1–4. DOI:10.2212/spr.2005.4.7.

16. Sharma, P., Xiao, H. W., Zhang, Q., Sutar, P. P. (2022). Intermittent high-power short-time microwave-vacuum treatment combined with steam impingement for effective microbial decontamination of black pepper. *Abstract Black Pepper. Journal of Food Engineering*, pp. 875–879. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2022.111373.

#### Technological aspects of the development of thermal vacuum installation for drying grain with simultaneous dehydration and disinsection

**Kutovy V., Kutsan O.**

The Ukraine is one of the largest producers of grain products. Its natural and climatic conditions are such that annually from 50 to 80 % of the harvested crop of grain crops is subject to drying and disinsection. Drying and simultaneous disinsection of grain are the

main technological operations for removing harmful moisture from grain material and freeing it from barn pests, which on a national scale makes it possible to avoid millions of losses. The article provides materials on the development of a highly efficient environmentally friendly installation and energy-saving technology of dehydration with simultaneous disinsection of wet grain, which makes it possible to dry grain in a short period of time to a moisture content of 12...14 % and destroy pests. A brief review discusses the main drying units, which are of the convective type and mainly use heated air. Their main positive and negative aspects of use are analyzed. An experimental model of the developed highly efficient environmentally friendly grain drying plant with physical and mathematical justification is presented. Thus, at the same time, such indicators as the speed of grain swirling ( $v_B$ ) at different temperatures, the value of the centrifugal force of the grain ( $F$ ) moving in the cavity of the heating element through a spiral channel were calculated. The instantaneous process of thermal energy transfer from the heater wall to the wet grain is substantiated. Thus, the surface element ( $dS$ ) of a wet grain receives a flow of thermal energy ( $dQ$ ) with a temperature ( $T$ ) in a short period of time ( $\Delta\tau$ ) with a heat transfer coefficient ( $a$ ).

It has been experimentally proven that grain dehydration is affected by at least three parameters: the heating temperature, its humidity, and the pressure in the vacuum chamber. All parameters are interconnected and affect technological indicators. Thus, the use of thermovacuum technology is an alternative to traditional high-temperature methods of drying grain crops.

**Key words:** thermovacuum dehydration of grain, drying, disinsection.



Copyright: Кутовий В.О., Кудан О.Т. © This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.



ORCID iD:

Кутовий В.О.

Кудан О.Т.

<https://orcid.org/0009-0008-2705-4937>

<https://orcid.org/0000-0002-5898-3420>