



В. О. Лукаш, аспірант

ORCID: 0009-0003-5652-9798

Полтавський державний аграрний університет

e-mail: vitalii.lukash@pdau.edu.ua

ТЕПЛОВА ОБРОБКА СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ МАТЕРІАЛІВ І ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЇЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Анотація. У статті розглядаються деякі аспекти теплової обробки сільськогосподарських матеріалів, зокрема процеси сушіння зерна, які є важливими для збереження якості врожаю та забезпечення його довготривалого зберігання. Метою статті є вивчення ключових аспектів теплової обробки сільськогосподарських матеріалів, аналіз проблем, що виконуються в процесі сушіння зерна, а також визначення вимог до конструкції сучасних зерносушилок. Детально проаналізовано проблеми, що виникають під час процесу сушіння зерна, зокрема нерівномірне сушіння, високі енергетичні витрати та можливе зниження якості зерна за неправильного регулювання умов сушіння. Підкреслено важливість відповідності конструкцій сучасних зерносушильних установок вимогам енергоефективності та екологічності. Вказано, що для досягнення оптимальних результатів важливо не тільки правильно налаштувати температурні режими, але й удосконалювати саму конструкцію сушильних установок, ураховуючи новітні технології та матеріали.

Ключові слова: сільськогосподарське виробництво, тепла обробка, сільськогосподарські матеріали, сушіння зерна, зерносушарки, вологість зерна.

Постановка проблеми. Теплова обробка має важливе значення для сільськогосподарського виробництва. Вона використовується в усіх галузях цієї сфери. Наразі близько 15% енергоспоживання агропромислового комплексу розвинених країн йде на теплову обробку сільськогосподарських матеріалів [1]. Тому питання зниження енерговитрат та підвищення ефективності таких процесів є важливим на глобальному рівні. Невідповідність технічного обладнання умовам сільськогосподарського виробництва (різноманітні форми власності та ринкові механізми) вимагає кардинальних змін у забезпеченні процесів теплового оброблення. Ці процеси включають поєднання теплофізичних, фізико-хімічних і біохімічних явищ, що відбуваються одночасно. Головною метою теплової обробки є підвищення стійкості матеріалів під час зберігання або тимчасової консервації.

Процес сушіння є одним із найбільш важливих і енерговитратних видів теплової обробки в сільському господарстві. Він дозволяє забезпечити тривале зберігання продукції та ефективне попереднє оброблення сировини для численних технологічних етапів виробництва і перероблення аграрної продукції. Завдяки сушінню значно покращується якість багатьох сільськогосподарських продуктів.

Збереження, оброблення та перероблення зерна в нашій країні є складними і витратними процесами, які вимагають сучасної матеріально-технічної бази. Однак досвід передових господарств показує, що виробництво високоякісного зерна є вигідним, з рівнем рентабельності не менше 40%. У найближчі роки можна очікувати зростання попиту на нову техніку для оброблення та зберігання зерна. Зростання валових зборів і зменшення витрат на виробництво зерна можливе лише за умови впровадження високоефективних технологій світового рівня, розроблених відповідно до концептуальних принципів їх розвитку [2]. Для успішної реалізації цього напряму необхідно створити ефективну та конкурентоспроможну матеріально-технічну базу

таких підприємств. Ураховуючи обсяги продукції, що ними виробляється, сучасні сушильні комплекси з продуктивністю понад 100 тонн на годину будуть економічно недоцільними. Тому розроблення та адаптація технологій механізації теплової обробки зерна є важливою науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз літературних джерел за останні роки за темою статті свідчить про значну увагу науковців до питань розвитку технологій теплової обробки сільсько-господарських матеріалів і знаходження шляхів підвищення її ефективності. Питання покращення ефективності та зниження енергоспоживання процесів сушіння зерна розглядаються в роботах [3], [4].

У роботі [5] досліджено питання волого-теплової обробки зернової сировини і зазначено, що під впливом температури й тиску відбуваються значні зміни в структурі та властивостях поживних речовин, що дає змогу отримувати продукцію високої якості.

Переривчате сушіння харчових продуктів висвітлюють науковці у роботі [6], де розглядають питання енергозбереження та покращення якості продукції під час такого сушіння. Обговорюються різні стратегії моделювання, а також їх переваги та недоліки. Окремо вивчається процес уривчастого мікрохвильового конвективного сушіння. Зазначено значні можливості та перспективи для подальших досліджень у цій галузі.

Застосування теплової обробки відіграє важливу роль у процесах сушіння, зберігання та перероблення сільськогосподарських матеріалів, що забезпечує їх довготривале збереження, покращення смакових та харчових властивостей.

Однак сучасні технології теплової обробки часто супроводжуються високими енергетичними витратами та не завжди оптимальними результатами. Тому надзвичайно важливим є пошук нових підходів та вдосконалення наявних методів для підвищення ефективності та зниження енергоспоживання, що дозволить зменшити витрати на енергоносії та знизити вплив на навколишнє середовище, при цьому зберігаючи високу якість обробленої продукції [7].

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою статті є вивчення ключових аспектів теплової обробки сільськогосподарських матеріалів, аналіз проблем, що виконуються в процесі сушіння зерна, а також визначення вимог до конструкції сучасних зерносушилок.

Завдання дослідження: 1) розглянути базові аспекти теплової обробки сільськогосподарських матеріалів, зокрема, процесу сушіння зерна; 2) висвітлити основні проблеми, що виникають у процесі сушіння зерна; 3) визначити головні вимоги до конструкції сучасних зерносушилок; 4) вибрати можливі рішення проблеми підвищення ефективності сушіння зерна.

Основна частина. Сушіння є завершальним етапом у виробництві зерна, і від нього значною мірою залежать його якість і здатність до тривалого зберігання. Зерно є живим організмом і за своєю структурою нагадує колоїдне капілярно-пористе тіло. Внутрішні мікропори та капіляри дозволяють волозі переміщуватися як із глибини до поверхні, так і у зворотному напрямку. Вода відіграє ключову роль у життєдіяльності зерна, оскільки бере участь у процесах обміну речовин. Якщо її вміст низький, вона залишається у зв'язаному стані. Проте в разі підвищення вологості понад певний рівень, так званий кондиційний показник, у структурі зерна з'являється вільна вода, що активує біологічні процеси. Таке зерно не може довго зберігатися, оскільки в ньому швидко розмножуються шкідливі мікроорганізми та посилюється інтенсивність дихання. Це призводить до самозігрівання і псування зернової маси [8].

Щоб зберегти якість зібраного врожаю та підготувати його до тривалого зберігання, необхідно видалити надлишкову вологу. Проте підвищення температури сушіння має певні обмеження, пов'язані з такими факторами: зниженням схожості, змінами у структурних компонентах зерна, порушенням його біологічної будови та погіршенням якісних характеристик.

У висушеному зерні практично відсутня вільна волога, і воно перебуває в стані спокою або анабіозу. Життєві процеси в ньому не припиняються повністю, але сповільнюються до мінімального рівня, достатнього для підтримання життєдіяльності клітин зародка. Завдяки цьому таке зерно може зберігатися тривалий час.

Залежно від рівня вологості державні стандарти класифікують насіння зернових культур за чотирма категоріями: сухе, середньої сухості, вологе та сире (табл. 1).

Таблиця 1

Стан зерна за вологістю

Культура	Відносна вологість зерна, %			
	сухе (до)	середньої сухості	вологе	сире (понад)
Зернові злакові:				
пшениця, жито, ячмінь, гречка	14	14,0...15,5	15,7...17,0	17,0
овес, кукурудза (зерно)	14	14,0... 16,0	16,0...18,0	18,0
Зернові бобові:				
горох, кормові боби, люпин	14	14,0... 16,0	16,0...18,0	18,0
квасоля	16	16,0...18,0	18,0...20,0	20,0
Зернові олійні:				
соняшник і льон (насіння)	11	11,0...13,0	13,0...14,5	4,5
конопля (насіння)	11	11,0...12,0	12,0... 14,0	14,0

Отже, головним завданням сушіння є зменшення вологості зерна до кондиційного рівня. Процес сушіння є складним технологічним явищем, що включає низку взаємопов'язаних теплофізичних, фізико-хімічних та біохімічних змін. Це один із найпоширеніших технологічних процесів, що застосовується в різних галузях. Натеper сушінню підлягають деревина, ізоляційні матеріали, цегла, паливо, продукти харчування, а також фрукти. Основна мета теплової обробки сільськогосподарської продукції полягає у підвищенні її стійкості до зберігання або тимчасового консервування. Водночас значення цього процесу не обмежується лише цими аспектами.

Сушіння зерна за науково обґрунтованими режимами сприяє підвищенню його стійкості до зберігання, покращує технологічні та посівні властивості. Наприклад, підсушування насіннєвого матеріалу створює оптимальні умови для дозрівання після збирання, що позитивно впливає на енергію проростання та схожість.

Оброблення товарного зерна теплом покращує якість продукції його переробки, зокрема борошна, олії тощо. Це своєю чергою підвищує продуктивність млинів та олійно-екстракційних підприємств, збільшує вихід кінцевої продукції, зменшує зношення обладнання та сприяє зниженню собівартості виробництва. Водночас використання високих температур у процесі сушіння може призвести до втрати схожості зерна, що зазвичай є незворотним процесом [9].

Досягнення рівномірного прогрівання та однорідного розподілу вологи у зерновій масі, а також контроль температури повітря і швидкості переміщення зерна створюють певні труднощі. Тому на практиці сушіння здійснюється з урахуванням нормативних даних, наведених у відповідних таблицях (табл. 2).

Перегрів зерна понад допустимі значення негативно впливає на вміст білків, крохмалю та жирів. Білкові сполуки мають здатність поглинати воду й набухати, що є важливим фактором як для проростання насіння, так і для приготування тіста. Однак за надмірного нагрівання зерна відбувається денатурація білка, що призводить до зниження його водопоглинальної здатності.

Висока температура також негативно позначається на кількості та якості клейковини в пшеничному зерні під час сушіння, оскільки у структурі відбуваються певні зміни. Під дією тем-

ператури пшеничне зерно з нормальною або слабкою клейковиною до 50 °С не чинить негативного впливу на її якість, проте в разі перевищення цього порога клейковина може втрачати свої властивості. Здатність зерна зберігати природні характеристики під впливом температури називається термостійкістю, яка підвищується зі зменшенням рівня його вологості.

Таблиця 2

Рекомендована максимальна температура нагрівання зерна залежно від його призначення

п/п	Призначення зерна	Максимальна температура нагріву, °С
1	Фуражне	82
2	Для перероблення на борошно	65
3	Насіннєве і для солоду (за вмісту води нижче 26%)	49
4	Насіння олійних культур	46

Наприклад, пшениця з вологістю 7–8% за нагрівання до 70°С не втрачає схожості, тоді як та сама пшениця з вологістю 20% втрачає її вже за 40–45°С. На термостійкість значно впливає також тривалість теплового впливу. За короточасного нагрівання зерно може витримувати вищі температури. Так, у рециркуляційних сушарках насіннєве зерно з вологістю 20% можна прогрівати до 50°С, тоді як у шахтних сушарках – лише до 40°С. Час термічного впливу в рециркуляційній сушарці становить 2–3 секунди, а в шахтній – 20 хвилин.

У сушінні діє основне правило: температура нагрівання зерна має бути тим нижчою, чим вища його вологість і довший період термічного впливу.

За температури понад 70°С у зерні відбуваються зміни в крохмалі, зокрема процес клейстеризації, що негативно позначається на його хлібопекарських властивостях. Із підвищенням температури зростає активність ферментів, сягаючи максимуму в діапазоні 35–55°С. Однак подальше підвищення температури до 60–70°С спричиняє її поступове зниження, а за 80°С ферментативна активність повністю зникає, що супроводжується втратою схожості зерна.

Зниження температури нагрівання нижче встановлених режимних значень неминуче призводить до падіння продуктивності сушарки, збільшення питомих витрат пального та електроенергії. Отже, під час сушіння неприпустиме зниження температури нижче встановлених технологічних параметрів.

Якщо порівнювати швидкість висушування різних зернових культур за однакового підведення теплової енергії, можна помітити значні відмінності. Залежно від цього параметра зернові поділяються на три групи:

- швидко висихаючі (насіння капусти, цукрового буряка, ріпаку);
- із середньою швидкістю висихання (пшениця, жито, овес, ячмінь);
- повільно висихаючі (горох, квасоля, люпин).

Термічну обробку сільськогосподарських матеріалів також використовують для боротьби зі шкідниками хлібних запасів та мікроорганізмами. Важливо при цьому правильно поєднувати температуру нагрівання і тривалість процесу сушіння [9].

Для дезінсекції зерно нагрівають до 50–60°С протягом 1–2 хвилин. Це призводить до загибелі таких шкідників, як кліщі, довгоносики, брухуси та мукоїди на всіх стадіях розвитку (табл. 3). Специфічні енерговитрати на проведення дезінсекції зерна становлять 17 кВт·год/т.

Сушіння також сприяє зменшенню маси оброблюваних продуктів, що має важливе значення. Наприклад, у процесі сушіння маса молока зменшується на 80%, овочів – на 70–75%, фруктів – на 50%, а зерна – до 10–15%.

Доцільною є організація сушіння безпосередньо в місцях виробництва сільськогосподарської продукції, оскільки це дає змогу зменшити навантаження на залізничний та інші

види транспорту, позбавляючи їх необхідності перевезення значної кількості зайвої маси у вигляді води.

Таблиця 3

Режими термічного знезараження зерна

Шкідники	Тривалість існування в хвилинах (за найбільш стійкими стадіями) за температури:		
	50°C	55°C	60°C
Амбарний довгоносик	55	10	-
Рисовий довгоносик	60	20	-
Борошняний хрущак	-	10	-
Рудий борошноїд	190	25	10
Сурінамський борошноїд	40	10	7
Борошняний кліщ	20	10	5

Аналіз наукових досліджень і наведені вище дані свідчать про те, що для підвищення ефективності процесу сушіння зерна конструкція зерносушарки має забезпечувати рівномірний нагрів та видалення вологи за умови надійного контролю температури й вологості зерна протягом усього процесу.

Сучасні зерносушарки повинні бути універсальними, що дозволяє обробляти різні види зерна (пшениця, рис, соняшник, кукурудза тощо), які мають різні фізико-хімічні, біохімічні, структурно-механічні та інші технологічні властивості. Для підвищення ефективності сушіння можна збільшити активну поверхню зерна, яка бере участь у тепло- і вологообміні, а також оптимізувати поєднання технологічних методів зневоднення, підвищення температури зерна, що надходить на сушіння, і його подальше охолодження.

Одним зі способів підвищення ефективності сушіння зерна є розроблення методів інтенсифікації випаровування вологи з матеріалу та зменшення енергетичних витрат, що необхідні для цього процесу. Для розв'язання питання зменшення енергоємності сушіння зерна можливі такі підходи:

- Підвищення температури сушильного агента та збільшення його витрати;
- Рециркуляція відпрацьованого теплоносія в зерносушарці;
- Попередній підігрів зерна перед сушінням;
- Герметизація та теплоізоляція сушарки, каналів і повітропроводів;
- Використання неоднорідних електричних полів;
- Регенерація тепла з відпрацьованого теплоносія;
- Застосування електромагнітних полів високої та надвисокої частоти.

Порівнюючи ефективність застосування зазначених технічних прийомів, варто відзначити, що найбільш доцільним з точки зору технології післязбирального оброблення зерна є попередній підігрів зерна перед сушінням. Однак для реалізації цього процесу в конструкції зерносушарки необхідно передбачити спеціальну ємність для підігріву, що призводить до збільшення її металомісткості.

Висновки. У висновках до статті можна підсумувати основні результати дослідження:

1. Вивчення ключових аспектів теплової обробки сільськогосподарських матеріалів показало, що цей процес є важливим для забезпечення високої якості та тривалого зберігання врожаю. Теплова обробка, зокрема сушіння зерна, впливає на збереження його харчової цінності та запобігання втратам під час зберігання.

2. Аналіз проблем, що виникають під час сушіння зерна, вказав на такі критичні фактори, як нерівномірне сушіння, високі енергетичні витрати та можливе зниження якості зерна за непра-

вильно налаштованих умов процесу. Вказані проблеми потребують ретельного контролю та постійного вдосконалення технологічних процесів для досягнення оптимальних результатів.

3. Визначення вимог до конструкції сучасних зерносушилок підкреслило необхідність забезпечення енергоефективності та екологічності в процесі сушіння. Сучасні зерносушильні установки повинні бути адаптовані до змінюваних кліматичних умов, використовувати новітні технології та матеріали для зменшення енергоспоживання та підвищення ефективності процесу.

4. Розвиток технологій і конструкцій зерносушильних установок є необхідним для подальшого вдосконалення процесу сушіння. Урахування інноваційних підходів до матеріалів і конструкційних рішень дозволить знизити витрати енергії та поліпшити якість продукції, що зберігається.

Таким чином, результати дослідження підкреслюють важливість інновацій та удосконалення як технологічних процесів, так і конструкцій сушильних установок для досягнення максимального ефекту від теплової обробки сільськогосподарських матеріалів.

Перспективами подальших досліджень з цієї теми є: розроблення нових технологій сушіння; оптимізація енергоспоживання в процесах теплової обробки; вдосконалення конструкцій зерносушилок; інтеграція новітніх матеріалів і технологій; покращення якості обробленої продукції; вивчення впливу кліматичних умов на ефективність процесів теплової обробки; створення системи моніторингу та контролю якості процесу сушіння.

Список використаних джерел

1. Макалюк І.В., Місйяло О.В. Особливості планування діяльності сільськогосподарських підприємств, що займаються рослинництвом. The 3th International scientific and practical conference «*Topical issues of the development of modern science*» (November 13–15, 2019). Publishing House «ACCENT», Sofia, Bulgaria. 2019. 493 p. P. 144–149.
2. Ленкова Т. М., Паньков П. Ефективність СВЧ-обробки зерна. *Комбікорми*. 2000. № 4. С. 31–32.
3. Дідух В.Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів : монографія. Луцьк : ЛДТУ, 2002. 165 с.
4. Гапонюк О.І., Остапчук М.В., Станкевич Г.М. Активне вентильовання та сушіння зерна : монографія. Одеса : Поліграф, 2014. 324 с.
5. Яшук Н. Зберігання зерна та якісні засоби обробки в післязбиральний період. *Пропозиція: український журнал з питань агробізнесу*. 2009. № 9. С. 90–95.
6. Kumar C., Karim M., Joardder M. Intermittent drying of food products: a critical review. *Journal of Food Engineering*. 2014. 121. 48–57.
7. Bandura V., Kalinichenko R., Kotov B., Spirin A. Theoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. nr. 8(94). 50–58.
8. Котов Б.І., Грищенко В.О. Математична модель охолодження вологого зерна у вентильованих бункерах з радіальним розподіленням повітря. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2017. Вип. 47(1). С. 132–139.
9. Лукаш В.О., Костенко О.М., Дрожжана О.У. Теплова обробка зерна та шляхи підвищення її ефективності. *Інноваційні аспекти системи безпеки праці, захисту інтелектуальної власності* : матеріали VII всеукр. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Полтава, 24–25 берез. 2022 р.). Полтава : ПДАУ, 2022. С. 160–163.

Стаття надійшла до редакції 21.03.2025 р.



V. Lukash
Poltava State Agrarian University

HEAT TREATMENT OF AGRICULTURAL MATERIALS AND WAYS TO INCREASE ITS EFFICIENCY

Summary

This article discusses some important aspects of the heat treatment of agricultural materials, in particular grain drying processes, which are extremely important for maintaining the quality of the crop and ensuring its long-term storage. The topic of this paper is of particular relevance in the context of modern technological requirements that set the agricultural sector the task of reducing energy consumption, increasing efficiency and ensuring minimal environmental impact. The purpose of the article is to comprehensively study the key aspects of heat treatment of agricultural materials, to analyze in depth the existing problems that arise in the process of grain drying, and to determine the basic requirements for the design of modern grain dryers that provide optimal conditions for maintaining product quality.

A number of problems that arise during the grain drying process are discussed in detail. In particular, such components as uneven drying, high energy costs, and possible deterioration of grain quality due to improper regulation of temperature and moisture conditions are analyzed. The author emphasizes the importance of compliance of modern grain drying plants with the requirements of energy efficiency, environmental friendliness and innovative technologies. It is emphasized that in order to achieve the most effective results, it is necessary not only to properly adjust the temperature conditions, but also to improve the design of drying plants, taking into account the latest developments in the field of materials science and processing technologies.

Various technological approaches aimed at improving the efficiency of heat treatment of agricultural materials are also considered. This includes both the improvement of existing technologies and the development of new methods that reduce energy costs, improve drying uniformity and maintain high product quality. The article highlights the prospects for the development of modern grain drying systems based on the principles of innovation and adaptation to changing climatic conditions.

Keywords: agricultural production, heat treatment, agricultural materials, grain drying, grain dryers, grain moisture.