УДК 631.365.22 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.2.1.18

В. О. ЛУКАШ
аспірант кафедри механічної та електричної інженерії
Полтавський державний аграрний університет
ORCID: 0009-0003-5652-9798

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНИХ І СУЧАСНИХ СПОСОБІВ СУШІННЯ ЗЕРНА: КЛАСИФІКАЦІЯ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

У даній роботі розглядаються основні способи сушіння зерна, їхні особливості, переваги та недоліки. Обґрунтовано перспективність застосування різних способів комбінованого сушіння залежно від стану зернового шару. Використання комбінованих способів сушіння дає змогу суттєво підвищити швидкість процесу, зменшити енергоспоживання, забезпечити гнучке управління сушінням, що сприяє не лише збереженню всіх цінних якостей висушеного матеріалу, а й, у деяких випадках, їх покращенню. У промислових сушарках зерно зазвичай перебуває в стані щільного гравітаційно-рухомого, псевдозрідженого або зваженого шару. Стан шару визначає величину активної поверхні зерна, що контактує з сушильним агентом, а отже, й інтенсивність сушіння. Розглянуто основні технологічні прийоми, які сприяють підвищенню ефективності сушіння зерна, а також вимоги, яким повинні відповідати сучасні зерносушарки. Конструкція зерносушарки має забезпечувати рівномірний нагрів і сушіння зерна з надійним контролем температури та вологості під час сушіння. Сучасні зерносушарки повинні бути універсальними, тобто придатними для сушіння зерна різних культур. Окреслено шляхи розв'язання проблеми зниження енергоємності сушіння, а також пріоритетні напрями підвищення його ефективності. Підвищити ефективність сушіння зерна дозволяють такі фактори: збільшення активної поверхні зерна, що бере участь у процесах тепло- і вологообміну; підвищення температури зерна перед сушінням і його охолодження, що досягається завдяки попередньому підігріву зерна на етапах, що передують сушінню. Пріоритетними напрямами підвищення ефективності сушіння зерна є раціональне поєднання технологічних прийомів зневоднення зерна, інтенсифікація випаровування вологи з матеріалу та зниження енергетичних витрат, необхідних для здійснення цього процесу. Класифікація та аналіз наявних технологічних і конструктивних схем зерносушарок із поперечним продуванням зернового шару дали змогу визначити їхні недоліки. Це, у свою чергу, дозволяє розробити шляхи усунення недоліків та підвищити ефективність процесу сушіння зерна.

Ключові слова: *сушіння зерна, зерносушарка, зерновий шар, технологічний процес, інтенсивність сушіння.*

V. O. LUKASH
Postgraduate Student at the Department of Mechanical and Electrical Engineering
Poltava State Agrarian University
ORCID: 0009-0003-5652-9798

COMPARATIVE ANALYSIS OF TRADITIONAL AND MODERN METHODS OF GRAIN DRYING: CLASSIFICATION AND DEVELOPMENT PROSPECTS

This paper discusses the main methods of grain drying, their features, advantages and disadvantages. The feasibility of applying various combined drying techniques depending on the state of the grain layer is substantiated. The use of combined drying methods significantly increases process efficiency, reduces energy consumption, and enables flexible drying control. This not only preserves all the valuable qualities of the dried material but, in some cases, enhances them. In industrial dryers, grain typically exists in a dense gravity-flowing, fluidized, or suspended layer. The state of the layer determines the active surface area of the grain in contact with the drying agent, thereby influencing drying intensity. The study explores key technological approaches that enhance grain drying efficiency and outlines the requirements for modern grain dryers. The design of a grain dryer must ensure uniform heating and drying of the grain, with reliable temperature and humidity control throughout the drying process. Modern grain dryers should be versatile, meaning they must be suitable for drying various crop types. The study identifies solutions to reduce the energy intensity of drying and highlights priority directions for improving its efficiency. Factors that enhance grain drying efficiency include increasing the active surface area involved in heat and moisture exchange, preheating the grain before drying, and cooling it afterward. This is achieved through preliminary heating in the stages preceding the drying process. Priority directions for improving grain drying efficiency involve the rational integration of dehydration techniques, intensification of moisture evaporation, and reduction of energy expenditures required for the process. The classification and analysis of existing technological and structural grain dryer designs with cross-flow ventilation have made it possible to identify their limitations. This, in turn, allows for the development of strategies to address these shortcomings and improve the grain drying process.

Key words: *grain drying, grain dryer, grain layer, technological process, drying intensity.*

Постановка проблеми

Сушіння зернових культур є складним технологічним процесом, який повинен не лише зберігати якість зерна, а й покращувати його характеристики. Тому розробка ефективних конструкцій сушарок, а також правильний підбір способів і режимів сушіння залишаються одними з головних завдань сільського господарства [1]. Незважаючи на наявність багатьох сучасних зерносушарок як вітчизняного, так і закордонного виробництва, ця проблема досі актуальна. Класифікація та аналіз сушильного обладнання і технологій дозволяють визначити переваги й недоліки існуючих способів сушіння зерна та розробити шляхи для інтенсифікації даного процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасна теорія сушіння вологих матеріалів ґрунтується на дослідженнях, викладених у працях Станкевича Г. М. [2], Гапонюка О. І. [3], Дідуха В. Ф. [4] та інших учених. Вагоме значення для розвитку технологій і вдосконалення обладнання мають роботи Котова Б. І. [5], Бурдо О. Г. [6], Степаненка С. П. [7] та інших фахівців. У працях Снєжкіна Ю. Ф. [8], Кірчука Р. В. [9], Ящука А. А. [10], Петрової Ж. О. [11] запропоновано різні способи сушіння, які сприяють більш рівномірному випаровуванню вологи та підвищенню інтенсивності процесу сушіння зерна.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є аналіз основних способів сушіння зерна; виявити особливості, переваги, недоліки та перспективи підвищення продуктивності процесу сушіння зерна.

Викладення основного матеріалу дослідження

Головним класифікаційним критерієм, що визначає конструктивно-технологічну схему сушильних установок, є сам процес сушіння. У сільськогосподарських підприємствах найбільш поширені зерносушарки, що працюють за конвективним способом сушіння. Це означає, що теплоносієм виступає або суміш топкових газів з атмосферним повітрям, або підігріте чисте повітря [12]. Даний спосіб застосовується у найпопулярніших видах зерносушарок, зокрема шахтних, барабанних, а також у сушарках періодичної та безперервно-періодичної дії (камерних, бункерних, а також у бункерах з активною вентиляцією), а також у системах з псевдозрідженим шаром [13]. У деяких із таких установок, крім основного конвективного сушіння, частково відбувається кондуктивний теплообмін. Це спостерігається, наприклад, при нагріванні зерна від гарячих поверхонь повітроводів у шахтних сушарках або при передачі тепла від рециркуляційного нагрітого зерна до холодного в рециркуляційних сушарках. Крім того, в деяких випадках спостерігається нетеплове сорбційне сушіння [14].

Найбільш ефективним є конвективний спосіб сушіння за умови примусового продування нагрітого повітря через шар зерна [15]. Від конструктивних особливостей сушильної установки, режимних параметрів процесу, а також співвідношення між характеристиками агента сушіння та зернового матеріалу залежить стан шару зерна, що відіграє ключову роль у процесі конвективного сушіння. Саме від цього параметра залежать інтенсивність тепло- і масообміну, а також інші характеристики зернового матеріалу, зокрема пористість, активна площа поверхні, опір шару, коефіцієнти теплопровідності та вологопровідності, а також процеси тепло- і вологообміну.

Залежно від швидкості руху потоку сушильного агента та зернового шару, сушіння може відбуватися у таких потоках: щільному нерухомому, щільному рухомому, псевдозрідженому («киплячому»), віброкиплячому, висхідному або низхідному. Найменш ефективним є сушіння в щільному нерухомому шарі зерна, прикладом якого є сушіння в бункерах або металевих ємностях із перфорованим дном. Такий спосіб відзначається значною нерівномірністю прогріву та видалення вологи. Ділянки зернового шару, що безпосередньо контактують із сушильним агентом, часто перегріваються та пересушуються, тоді як більш віддалені зони залишаються недосушеними. Товщина шару при такому способі зазвичай становить 600–1500 мм, а в рідкісних випадках зменшується до 350 мм [16]. Для уникнення перегріву зерна температура сушильного агента знижується, однак це призводить до збільшення тривалості сушіння, а також зростання витрат палива та електроенергії.

У сучасних зерносушарках найчастіше використовується щільний малорухомий шар зернової маси. Під дією сил гравітації цей шар поступово спускається вниз у шахті, колонці або сушильній камері. Товщина зернового шару, що безпосередньо взаємодіє із сушильним агентом, постійно змінюється в межах 0–150–300 мм, що забезпечує рівномірні умови для нагрівання та випаровування вологи. У цьому способі застосовується сушильний агент, температура якого значно перевищує допустиме нагрівання зерна у 120–160 °С. Об'ємна подача сушильного агента складає приблизно 3500 м^3 на годину на кожну тонну зерна, а сам процес нагрівання триває близько 15–20 хвилин. Такий підхід активно використовується в шахтних зерносушарках із системами підведення та відведення повітря, а також у камерних установках безперервного функціонування.

Сушіння в умовах псевдозрідженого шару відзначається високою інтенсивністю теплообміну між зерном і сушильним агентом. Зі збільшенням температури агента відбувається значне прискорення процесу. Наприклад, якщо температура підвищується з 60 до 140 °С, швидкість сушіння зростає у 2,5 раза, а час нагрівання зерна скорочується у 4 рази. Цей спосіб забезпечує рівномірне прогрівання зернової маси та ефективне використання теплоносія. Проте надмірно тривалий вплив високої температури може спричинити перегрівання зерна. Тому, незважаючи на високу інтенсивність процесу, широке промислове застосування такого способу ускладнене через брак надійних механізмів управління.

Спосіб сушіння у падаючому шарі зерна стає дедалі популярнішим. Найбільш поширеним є протиточний посіб, за якого зерно рухається вниз, а потік сушильного агента спрямовується у зворотному напрямку – знизу догори. Оскільки контакт зерна з агентом триває недовго, процес випаровування вологи відбувається мінімально. Саме тому такі сушарки здебільшого застосовують для оперативного нагрівання зерна перед його подальшим охолодженням та остаточним висушуванням у сушарках із щільним малорухомим шаром.

Таким чином, головною особливістю конструкції сушильних камер зерносушарок, що працюють за конвективним принципом, є варіативний стан зернового шару. Хоча сам тип шару залишається незмінним, коригування конструктивних характеристик (товщина шару, розташування та форма повітропроводів, наявність полиць, змішувачів, вібраційних елементів та інверторів, що визначають траєкторію руху зерна і сушильного агента) разом із регулюванням параметрів режиму (температурний рівень, швидкість подачі агента, вміст вологи, швидкість пересування зерна) дають можливість керувати станом зернового шару в заданих межах. Це дозволяє підвищувати інтенсивність перемішування, покращувати розпушення зерна, збільшувати активну поверхню, що бере участь у процесах тепло- та масообміну, а також змінювати тривалість перебування зерна в зоні сушіння – подовжувати її у разі псевдозрідженого шару або скорочувати для щільних шарів, залежно від необхідної експозиції.

На сьогодні не існує загальноприйнятої класифікації сушильних установок, тому багато науковців відмовилися від ідеї створення універсальної систематизації та розглядають окремі категорії сушарок відповідно до їх ключових характеристик [17].

Будь-яке вдосконалення сушильного обладнання спрямоване на підвищення його продуктивності, зокрема шляхом інтенсифікації процесу сушіння, певною мірою сприяє зменшенню витрат пального. Це підтверджується як результатами теоретичних досліджень, так і практикою використання сушильних агрегатів. Основою для підвищення ефективності сушильного процесу є підхід, що враховує закономірності внутрішнього вологообміну, а також механізми тепло- та масообміну. Оптимальне поєднання технологічних способів, які застосовуються у сучасних і перспективних зерносушарках, дозволяє досягти комплексного впливу як на випаровування вологи з поверхні зерна, так і на її переміщення всередині зернової маси.

Прискорення процесу внутрішнього переміщення вологи можливе за рахунок збільшення температури зернової маси та зменшення впливу термовологостійкості, що стає реальним завдяки впровадженню сучасних технологій сушіння. У свою чергу, збільшення швидкості зовнішнього вологообміну досягається шляхом підвищення швидкості руху та температури сушильного агента, а також за рахунок розширення зовнішньої поверхні зерна, що приймає участь у тепло- та масообмінних процесах із сушильним агентом.

Дослідження літературних джерел дало змогу класифікувати способи підвищення ефективності сушіння зерна (рис. 1). Цю класифікацію доцільно враховувати як при модернізації існуючих зерносушарок, так і під час розробки нових конструкцій.

Рис. 1. Класифікація способів підвищення продуктивності процесу сушіння зерна

Аналіз способів підвищення продуктивності процесу сушіння зерна (рис. 1) показав, що покращення зовнішнього тепло- та вологообміну, тобто процесів нагрівання зерна та, як наслідок, випаровування вологи з його поверхні, відбувається за рахунок зміни стану шару зерна, що сприятиме збільшенню активної зовнішньої поверхні.

Удосконалення технологічного процесу сушіння зерна повинна орієнтуватись, насамперед, на впровадження способів, що забезпечують рівномірний розподіл тепла та вологи. Однією з основних проблем сушіння у щільному

нерухомому або малорухомому шарі є неоднорідний прогрів і перегрівання окремих прошарків зерна. Рівень перегріву значною мірою залежить від таких факторів, як товщина шару зернової маси, температура сушильного агента, початкові та поточні температурні показники зерна і швидкість його руху. Останній параметр можна оцінити через тривалість часу інтенсивного продування товщі зерна сушильним агентом або повітряним потоком.

Дослідження показали, що через недосконалість конструкції сушильної камери або шахти, температура нагрівання зерна в горизонтальному перерізі може варіюватися в межах 30–60 °С. Найвищі температурні показники спостерігаються у пристінних ділянках, що спричиняє пересушування зерна, а в окремих випадках – навіть займання дрібних частинок лушпиння та зерна. У вказаних зонах вологість зерна знижується на 2–5 % більше, ніж у середній частині шару.

Висновки

Підсумовуючи викладене, можна зробити висновки, що аналіз існуючих технологічних і конструктивних схем зерносушарок із поперечним продуванням зернового шару виявив основний недолік – нерівномірність сушіння зерна по товщині шару. Крім того, проблемою та перспективою подальших досліджень є дослідження порушення технологічного процесу через засмічення отворів у стінках камер, що спричинене невідповідністю конструктивно-технологічних параметрів вимогам процесу сушіння.

Список використаної літератури

1. Kumar C., Karim M., Joardder M. Intermittent drying of food products: a critical review. *Journal of Food Engineering*. 2014, 121, P. 48–57. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014.

2. Станкевич Г. М., Страхова Т. В., Атаназевіч В. І. Сушіння зерна. К. : *Либідь*, 1997. 352 с.

3. Гапонюк О. І., Остапчук М. В., Станкевич Г. М. Активне вентилювання та сушіння зерна. Монографія. Одеса : *Поліграф*. 2014. 324 с.

4. Дідух В. Ф. Підвищення ефективності сушіння сільськогосподарських рослинних матеріалів. Монографія. Луцьк : *ЛДТУ*. 2002. 165 с.

5. Котов Б. І., Калініченко Р. А., Степаненко С. П., Швидя В. О., Лісецький В. О. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилювання, охолодження). Ніжин : Видавець ПП Лисенко М. М. 2017. 552 с.

6. Burdo O., Bezbakh I., Shyshov S., Zykov A., Yarovyi I., Gavrilov A., Bandura V., Mazurenko I. Research of Wheat Drying in a Microwave and Combined Filter-microwave Dryer. *Eureka: Life Sciences*. 2019, (5), P. 70–78.

7. Степаненко С. П., Швидя В. О., Коновал О. О., Попадюк І. С. Результати виробничих випробувань дослідного зразка вакуумної барабанної сушарки СВБ-10. *Механіка та автоматика агропромислового виробництва*. 2023, Вип. 3, С. 55–64.

8. Снєжкін Ю. Ф., Пазюк В. М., Петрова Ж. О., Чалаєв Д. М. Теплонасосна зерносушарка для насіннєвого зерна. Київ : Поліграф-Сервіс. 2018. 154 с.

9. Кірчук Р.В. Теоретичні передумови моделювання процесу сушіння дисперсних рослинних матеріалів. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк. 2017, Вип. 37, С. 47–56.

10. Ящук А. А. Дослідження сушіння вороху насіння льону олійного на сушарці зі спіралеподібними активаторами. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. 2013, Вип. 97(2), С. 489–495.

11. Petrova Zh. Investigation of drying process kinetics of composite granules. *Energy Engineering and Control Systems*. 2022, Vol. 8, No. 1, pp. 20–27. https://doi.org/10.23939/jeecs2022.01.020

12. Kaletnik G., Tsurkan O., Rimar T., Stanislavchuk O. Determination of the kinetics of the process of pumpkin seeds vibrational convective drying. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, 1, P. 50–57. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.195203

13. Paziuk V. M., Petrova Zh. O., Tokarchuk O. A., Yaropud V. M. Research of rational modes of drying rape seed. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019, 58, nr. 2, P. 303–310. DOI: 10.35633/INMATEH-58-33

14. Hashim N., Daniel O. Rahaman E. A preliminary study: kinetic model of drying process of pumpkins (Cucurbita Moschata) in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2014, 2, P. 345–352.

15. Kotov B. I., Spirin A. V., Kalinichenko R. A., Bandura V. M., Polievoda Yu. A., Tverdokhlib I. V. Determination the parameters and modes of new heliocollectors constructions work for drying grain and vegetable raw material by active ventilation. *Research in Agricultural Engineering*. 2019, 65, P. 20–24. DOI:10.17221/73/2017-RAE

16. Bandura V., Kalinichenko R., Kotov B., Spirin A. Teoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018, 4, nr. 8(94), P. 50–58. DOI:10.15587/1729-4061.2018.139314

17. Snezhkin J., Paziuk V., Petrova Zh., Tokarchuk O. Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH – Agricultural Engineering, Romania*. 2020, 61, nr. 2, P. 183–193.

References

1. Kumar, C., Karim, M., & Joardder, M. (2014). Intermittent drying of food products: a critical review. *Journal of Food Engineering*, 121, pp. 48–57. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.08.014

2. Stankevych, H. M., Strakhova, T. V., & Atanazevich, V. I. (1997). Sushinnia zerna [Grain drying]. K. : Lybid. [in Ukrainian].

3. Haponiuk, O. I., Ostapchuk, M. V., & Stankevych, H. M. (2014). Aktyvne ventyliuvannia ta sushinnia zerna. Monohrafiia. [Active ventilation and drying of grain. Monograph.]. Odesa : Polihraf. [in Ukrainian].

4. Didukh, V. F. (2002). Pidvyshchennia efektyvnosti sushinnia silskohospodarskykh roslynnykh materialiv. Monohrafiia. [Improving the efficiency of drying agricultural plant materials. Monograph]. Lutsk. LDTU. [in Ukrainian].

5. Kotov, B. I., Kalinichenko, R. A., Stepanenko, S. P., Shvydia, V. O., & Lisetskyi, V. O. (2017). Modeliuvannia tekhnolohichnykh protsesiv v typovykh obiektakh pisliazbyralnoi obrobky i zberihannia zerna (separatsiia, sushinnia, aktyvne ventyliuvannia, okholodzhennia). [Modeling of technological processes in typical facilities for post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation, cooling)]. Nizhyn : Vydavets PP Lysenko M. M. [in Ukrainian].

6. Burdo, O., Bezbakh, I., Shyshov, S., Zykov, A., Yarovyi, I., Gavrilov, A., Bandura, V., & Mazurenko, I. (2019). Research of wheat drying in a microwave and combined filter-microwave dryer. *Eureka: Life Sciences*, (5), pp. 70–78.

7. Stepanenko, S. P., Shvydia, V. O., Konoval, O. O., & Popadiuk, I. S. (2023). Rezultaty vyrobnychykh vyprobuvan doslidnoho zrazka vakuumnoi barabannoi susharky SVB-10. [Results of production tests of the prototype vacuum drum dryer SVB-10]. *Mekhanika ta avtomatyka ahropromyslovoho vyrobnytstva*, Vyp. 3, pp. 55–64. [in Ukrainian].

8. Sniezhkin, Yu. F., Paziuk, V. M., Petrova, Zh. O., & Chalaiev, D. M. (2018). Teplonasosna zernosusharka dlia nasinnievoho zerna. [Heat pump grain dryer for seed grain]. Kyiv : Polihraf-Servis. [in Ukrainian].

9. Kirchuk, R.V. (2017). Teoretychni peredumovy modeliuvannia protsesu sushinnia dyspersnykh roslynnykh materialiv. [Theoretical prerequisites for modeling the drying process of dispersed plant materials]. *Silskohospodarski mashyny*, Vyp. 37, pp. 47–56. [in Ukrainian].

10. Yashchuk, A. A. (2013). Doslidzhennia sushinnia vorokhu nasinnia lonu oliinoho na sushartsi zi spiralepodibnymy aktyvatoramy. [Study of drying of oilseed flax heap on a dryer with spiral activators]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva*, Vyp. 97(2), pp. 489–495. [in Ukrainian].

11. Petrova, Zh. (2022). Investigation of drying process kinetics of composite granules. *Energy Engineering and Control Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 20–27. https://doi.org/10.23939/jeecs2022.01.020

12. Kaletnik, G., Tsurkan, O., Rimar, T., & Stanislavchuk, O. (2020). Determination of the kinetics of the process of pumpkin seeds vibrational convective drying. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1, pp. 50–57. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.195203

13. Paziuk, V. M., Petrova, Zh. O., Tokarchuk, O. A., & Yaropud, V. M. (2019). Research of rational modes of drying rape seed. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 58, nr. 2, pp. 303–310. DOI: 10.35633/INMATEH-58-33

14. Hashim, N., Daniel, O., & Rahaman, E. (2014). A preliminary study: kinetic model of drying process of pumpkins (Cucurbita Moschata) in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 2, pp. 345–352.

15. Kotov, B. I., Spirin, A. V., Kalinichenko, R. A., Bandura, V. M., Polievoda, Yu. A., & Tverdokhlib, I. V. (2019). Determination the parameters and modes of new heliocollectors constructions work for drying grain and vegetable raw material by active ventilation. *Research in Agricultural Engineering*, 65, pp. 20–24. DOI:10.17221/73/2017-RAE

16. Bandura, V., Kalinichenko, R., Kotov, B., & Spirin, A. (2018). Teoretical rationale and identification of heat and mass transfer processes in vibration dryers with IR-energy supply. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 nr. 8(94), pp. 50–58. DOI:10.15587/1729-4061.2018.139314

17. Snezhkin, J., Paziuk, V., Petrova, Zh., & Tokarchuk, O. (2020). Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH – Agricultural Engineering*, Romania, 61 nr. 2, pp. 183–193.