УДК 66.047.3

О. Ю. Співак
В.М. Верховський
А. В. Молочнюк

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЗЕРНОСУШАРОК

[1] Вінницький національний технічний університет

Анотація
В статті розглянуті способи і заходи підвищення енергоефективності сушарок для сушіння зерна з метою оцінювання перспектив їх реконструкції для зменшення енергозатрат на сушіння зернових.
Ключові слова: конвективна сушарка, сушіння, зерносушіння, конвекція.

Abstract
The article considers methods and measures to increase the energy efficiency of grain dryers in order to assess the prospects for their reconstruction to reduce energy costs for grain drying.
Keywords: convection dryer, drying, grain drying, convection.

Вступ

Технологія сушіння зерна є основним процесом для забезпечення якості харчових продуктів, подовження терміну зберігання та покращення адаптивності обробки. Зі постійним зростанням світового попиту на продукти харчування та зростаючими вимогами до якості харчових продуктів та енергоефективності, традиційні технології сушіння стикаються з численними проблемами.

Зернові культури є одними з найважливіших продовольчих культур у світі, відіграючи вирішальну роль у забезпеченні глобальної продовольчої безпеки та сприянні сталому розвитку сільського господарства [1]. За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (ФАО), щорічне виробництво зернових становить майже половину від загального світового виробництва продуктів харчування, охоплюючи різноманітні культури, такі як пшениця, кукурудза, рис та бобові. Україна за підсумками 2024 року зміцнила свої позиції на світовому ринку пшениці, посівши дев'яту сходинку серед найбільших виробників цієї культури. За інформацією Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO), українські аграрії зібрали близько 23,4 млн тонн зерна, зберігши статус однієї з провідних країн-експортерів [2]. Зі зростанням населення світу та зростанням попиту на продукти харчування, врожайність та якість зернових стали центральними питаннями світових сільськогосподарських досліджень.

Це питання актуальне і для України. Через війну, в 2025 році Україна хоч і скоротила експорт зернових на 21%, все ж зайняла четверте місце в світі як експортер кукурудзи і шосте як експортер пшениці [3].

Основна частина

Але зерно мало виростити, його потрібно ще й зберегти. Як правило, це робиться методами його сушіння. Сушіння зерна – це критично важливий процес, який безпосередньо впливає на його стабільність при зберіганні, технологічну придатність та якість кінцевого продукту. Процес сушіння може значно підвищити термін зберігання та ефективність транспортування зерна, ефективно знижуючи його вміст вологи, пригнічуючи ріст бактерій та цвілі, а також запобігаючи гниттю та псування [4]. Це особливо важливо в регіонах з високою вологістю, де своєчасне сушіння може ефективно запобігти таким проблемам, як ріст цвілі та зараження шкідниками, спричиненим надлишком вологи. Крім того, добре розроблений процес сушіння допомагає зберегти поживні

компоненти зерна, зберігаючи його смак та текстуру. Тому дослідження та застосування ефективних, енергозберігаючих та технологій сушіння з мінімальними втратами теплоти мають важливе практичне значення для сприяння сталому виробництву зерна та забезпечення продовольчої безпеки.

Незважаючи на постійний розвиток сучасних технологій сушіння зерна, у практичному застосуванні все ще існують численні проблеми, що впливають на їхню ефективність, споживання енергії та якість кінцевого продукту [5]. Однією з найпоширеніших проблем є низька ефективність сушіння. Традиційні методи сушіння часто спираються на конвективне гаряче повітря або теплопровідність, які мають відносно повільну швидкість сушіння, що призводить до високого споживання енергії та низької ефективності.

Одним з головних шляхів підвищення ефективності використання теплоти в будь-якому харчопереробному обладнанні є вдосконалення технології, оскільки на здійснення технологічних теплових процесів витрачається приблизно 55 % теплоти. Вдосконалення технології безпосередньо пов'язане зі збільшенням продуктивності обладнання, що, в свою чергу, призводить до інтенсифікації теплообміну і зниження питомих витрат теплоти.

Значні відновлена економії ресурсів створюються при автоматизації технологічних процесів сушки зернових культур.

В техніці сушіння широке застосування знаходять теплові насоси, які дозволяють довести зерносушильні установки до високої енергетичної досконалості в відношенні використання, утилізації і рекуперації теплоти відпрацьованого сушильного агента [6]. При цьому значно знижуються витрати енергії (до 30 %), а здійснення "м'яких" режимів сушіння сушильним агентом зі зниженим вологовмістом внаслідок його осушення у випарнику дозволяє отримати висушене зерно високої якості.

Використання математичного моделювання забезпечує максимальну ступінь кінетичної, гідродинамічної і термодинамічної відповідності енергозатрат на сушіння їх оптимальним значенням.

Перспективними є також комбіновані способи енергопідведення: конвективно-кондуктивний, СВЧ-конвективний, радіаційно-конвективний тощо. Інтенсифікація процесу сушіння і відповідне підвищення продуктивності зерносушарок досягають 50-70% при сушінні зерна колосових культур і олійного насіння внаслідок застосування комбінованого способу сушіння. Наприклад, на зерні кукурудзи з вихідною вологістю понад 27% продуктивність зерносушарок збільшується в 2 рази і більше [7]. Настільки значний вплив на інтенсивність процесу сушіння внесених в технологію змін пояснюється різкою степеневою залежністю коефіцієнтів, що визначають внутрішнє і зовнішнє вологоперенесення в зерні, від його температури. Цим пояснюється і більш повне використання підведеної теплоти на видалення вологи з зерна, що знижує енергетичні втрати.

Використання нових температурних режимів і заміни контролю температури теплоносія з вхідного на вихідний по зонах, випробуваннями підтверджено зниження питомих витрат палива на сушіння на 15-25% (залежно від параметрів зерна і атмосферного повітря). При використанні інших чинників енергозбереження, перш за все відпрацьованих теплоносіїв, економія палива складає 35-40%, що дає істотне підвищення теплового ККД зерносушарки [5].

Реконструкція окремих вузлів, зерносушарок, зокрема часткова заміна коробів в шахтах на напівкороби збільшує відстань від стінки сушарки, що сприяє більш рівномірному висушуванню, переобладнання завантажувальних пристроїв на багатоструменеві, що запобігає самосортуванню зерна.

Висновки

Перспективними заходами підвищенні енергоефективності шахтних зерносушарок є:

- застосування комбінованих способів для інтенсифікації процесу сушіння;
- підвищення теплового ККД зерносушарки за рахунок нових температурних режимів і заміни контролю температури теплоносія з вхідного на вихідний по зонах;
- застосування спрощених схем енергопідведення, які дають зниження питомих витрат електроенергії пропорційно підвищенню продуктивності зерносушарки, оскільки при спрощених схемах енергопідведення немає додаткових енерговитрат при збільшеній продуктивності;
- збільшення швидкості руху зерна в сушарках;
- утилізація теплоти відпрацьованого сушильного агента з використанням теплообмінників-рекуператорів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Jayas, D.S. Storing Grains for Food Security and Sustainability. Agric Res 1, 21–24 (2018). https://doi.org/10.1007/s40003-011-0004-4.
2. Україна увійшла до десятки найбільших виробників пшениці у світі. AGROWEEK. URL : https://agroweek.com/agrobiznes/ukrayina-uvijshla-desyatky-najbilshyh-vyrobnykiv/ (дата звернення 20.03.2026).
3. Аграрний експорт з України зазнав суттєвих змін: чим торгували у 2025 році. УНІАН. URL : https://www.unian.ua/economics/agro/eksport-ukrajini-chim-naybilshe-torguvali-u-2025-roci-13287618.html (дата звернення 21.03.2026).
4. Li, Y.; Chandio, F. A.; Ma, Z.; Lakhiar, I. A.; Sahito, A. R.; Ahmed, F.; Mari, I. A.; Farooq, U.; Suleman, M. Mechanical Strength of Wheat Grain Varieties Influenced by Moisture Content and Loading Rate. Int J Agric & Biol Eng 2018, 11, 52-57.
5. Jimoh, K.A., Hashim, N., Shamsudin, R. et al. Recent Advances in the Drying Process of Grains. Food Eng Rev 15, 548–576 (2023). https://doi.org/10.1007/s12393-023-09333-7 .
6. Зиков О. В. Удосконалення теплотехнологій харчових виробництв на основі систем термотрансформації, теплоутилізації та принципів адресної доставки енергії: дис. д-ра техн. наук : 05.18.12. Одеса, 2018. 395 с.
7. Інноваційні технології в АПК: збірник тез доповідей IX Міжнародної науково-практичної конференції, 7-8 червня 2023 р., м. Луцьк [Електронний ресурс] Луцьк: ЛНТУ, 2023. 220 с.
8. Серьогін О.О. Ресурсоощадні технології у харчовій промисловості [Електронний ресурс]: підручник. О.О. Серьогін, О.О. Осьмак, Д.В. Риндюк. Київ: НУХТ, 2018. 414 с.

Рекомендована до опублікування кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Олександр Юрійович Співак – канд. техн. наук, доцент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Вадим Михайлович Верховський – студент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: vayt.fresh@gmail.com.

Артем Вікторович Молочнюк – студент кафедри теплоенергетики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: amolochnuk200537@gmail.com.

Oleksandr Spivak – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Thermal Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: spivak@vntu.edu.ua.

Vadym Verkhovsky – student of the Department of Thermal Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: vayt.fresh@gmail.com.

Artem Molochnyuk – student of the Department of Thermal Power Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: amolochnuk200537@gmail.com