УДК 631.365.22:662.997
DOI https://doi.org/10.15589/znp2026.3(506).29

SOLAR-COLLECTOR GRAIN DRYERS: DESIGN SOLUTIONS AND DEVELOPMENT TRENDS

ГЕЛІОКОЛЕКТОРНІ ЗЕРНОСУШАРКИ: КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ ТА НАПРЯМИ РОЗВИТКУ

Mykhailo O. Polshykov
Mykhailo.Polshykov@ieee.khpi.edu.ua
ORCID: 0009-0005-8294-1609

М. О. Польшиков,
аспірант

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків

Abstract. *Purpose*. To systematize scientific studies and patent solutions in grain drying with solar collectors, determine their design features, advantages and limitations, and substantiate promising development directions for energy-efficient grain-drying systems. *Method*. System, comparative and patent-analysis methods were applied. Direct, indirect and mixed-mode solar dryers were considered together with natural- and forced-convection systems, stationary and moving product beds, auxiliary heaters, thermal storage, heat recovery and automated control. The designs were compared by heat-supply method, airflow arrangement, grain movement, operating stability and scalability. *Results*. The most operationally stable solutions are hybrid systems combining forced airflow and an auxiliary heat source. Mixed-mode heat supply produces two oppositely directed drying fronts in the grain bed and improves moisture uniformity. Biomass-assisted heating increased the thermal efficiency of an experimental grain dryer from 39.9 to 57.7 %, while forced convection reduced drying duration compared with natural circulation in a mixed-mode dryer. Patent analysis indicates a shift toward modular and mobile systems, air recirculation, evacuated-tube collectors, heat pipes, photovoltaic fan supply and sensor-based regulation. *Scientific novelty*. A generalized classification of solar-collector grain dryers is proposed based on the combination of solar-energy conversion, direction of thermal impact on the material, airflow-path structure and operating-mode stabilization. The relationship between air-distribution design, temperature and humidity non-uniformity, and aerodynamic resistance of the grain bed is identified. *Practical importance*. The results can support the selection of a mobile or stationary grain-dryer configuration, preliminary justification of forced ventilation, auxiliary heating, heat recovery and automatic control, and formulation of requirements for a prototype adapted to variable solar irradiation.
Key words: mixed-mode drying; forced convection; grain-bed resistance; heat recovery; auxiliary heating; automatic control.

Анотація. *Мета*. Систематизувати наукові дослідження та патентні рішення у сфері сушіння зерна з використанням сонячних колекторів, визначити їхні конструктивні особливості, переваги й обмеження та обґрунтувати перспективні напрями розвитку енергоефективних зерносушильних комплексів. *Методика*. Застосовано методи системного, порівняльного та патентного аналізу. Розглянуто прямі, непрямі й комбіновані сонячні сушарки, установки з природною та примусовою конвекцією, нерухомим і рухомим шаром матеріалу, резервними нагрівачами, тепловим акумулюванням, рекуперацією та автоматизованим керуванням. Конструкції зіставлено за способом підведення теплоти, організацією повітряного потоку, режимом переміщення зерна, стабільністю теплопостачання та можливістю масштабування. *Результати*. Встановлено, що найвищу функціональну стійкість мають комбіновані системи з примусовою циркуляцією повітря та резервним джерелом теплоти. Змішаний спосіб підведення енергії формує два зустрічні фронти сушіння у зерновому шарі та сприяє вирівнюванню вологості. Використання біомасового догріву підвищувало теплову ефективність дослідної зерносушарки з 39,9 до 57,7 %, а примусова конвекція в сушарці змішаного типу скорочувала тривалість процесу порівняно з природною циркуляцією. Патентний аналіз виявив тенденцію до модульності, мобільності, рециркуляції повітря, застосування вакуумних колекторів, теплових труб, фотоелектричного живлення вентиляторів і сенсорного регулювання. *Наукова новизна*. Запропоновано узагальнену класифікацію геліоколекторних зерносушарок за поєднанням способу перетворення сонячної енергії, напрямку теплового впливу на матеріал, структури повітряного тракту та засобів стабілізації режиму. Визначено взаємозв'язок між конструкцією повітророзподілення, температурно-вологісною нерівномірністю та аеродинамічним опором зернового шару. *Практична значимість*. Результати можуть бути використані для вибору структури мобільної або стаціонарної

зерносушарки, попереднього визначення необхідності примусової вентиляції, резервного нагрівання, рекуперації та автоматичного регулювання, а також для формування вихідних вимог до дослідного зразка, адаптованого до змінної сонячної радіації.
Ключові слова: змішане сушіння; примусова конвекція; опір зернового шару; рекуперація теплоти; резервне нагрівання; автоматичне регулювання.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сушіння зерна є одним із найбільш енергоємних етапів післязбиральної обробки. Його результат визначає можливість тривалого зберігання, стабільність технологічних властивостей і зменшення ризику мікробіологічного пошкодження. Відкрите сонячне сушіння не потребує витрат палива, однак залежить від опадів, температури, вологості та швидкості зовнішнього повітря, займає значну площу і не захищає продукцію від пилу, комах, птахів та інших джерел забруднення. Механізовані сушарки забезпечують керований процес, проте їхня експлуатація пов'язана зі споживанням палива або електричної енергії.

Сонячна сушарка відрізняється від відкритого сушіння тим, що сонячна енергія перетворюється і підводиться до матеріалу в організованому апараті. Залежно від конструкції випромінювання може безпосередньо нагрівати зерно, попередньо нагрівати повітря в окремому колекторі або одночасно реалізовувати обидва механізми. Таке поєднання дає змогу зменшити витрати традиційних енергоносіїв, але не усуває залежності від добових і погодних коливань сонячної радіації.

Проєктування геліоколекторної зерносушарки не може обмежуватися лише вибором площі сонячного колектора. Необхідно узгодити продуктивність колектора з масою та початковою вологістю зерна, допустимою температурою нагрівання, тривалістю процесу, витратою повітря і перепадом тиску в зерновому шарі. За недостатнього повітрообміну нагрітий агент швидко насичується вологою, а надмірне збільшення витрати повітря підвищує електричне навантаження вентилятора та може знижувати температуру сушильного агента. Тому енергоефективність визначається не окремим елементом, а узгодженою роботою колектора, повітряного тракту, сушильної камери, системи видалення вологи й засобів керування.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

За способом підведення сонячної теплоти сушильні установки поділяють на прямі, непрямі та змішані. У прямій сушарці випромінювання проходить крізь прозоре огородження і поглинається продуктом та внутрішніми поверхнями камери. У непрямій системі зовнішнє повітря нагрівається в окремому сонячному повітряному колекторі, після чого проходить крізь шар зерна. Змішана схема поєднує пряме опромінення верхньої поверхні продукту та конвективне підведення теплоти нагрітим повітрям [1; 2].

Forson та співавтори розробили методику проєктування сушарки змішаного типу з природною конвекцією, що складається з повітряного колектора, сушильної камери та димаря. Для повітронагрівача рекомендовано співвідношення довжини до ширини у межах 1–2, а площу сушильної поверхні доцільно узгоджувати з площею колектора. Під час повномасштабного випробування 162 кг касави тривалість сушіння становила 35,5 год, а оцінена ефективність – 12,3 %, що було близьким до розрахункового значення 12,5 % [1].

Математична модель Simate описує змішане сонячне сушіння кукурудзи в глибокому шарі. У моделі враховано конвективний тепло- і масообмін, поглинання випромінювання верхньою поверхнею та теплопровідність усередині зернової маси. Розрахунки й експеримент показали, що температура верхньої та нижньої частин шару перевищує температуру середньої зони. Унаслідок цього формуються два фронти сушіння, які рухаються назустріч один одному та створюють рівномірніший кінцевий розподіл вологості, ніж у непрямій сушарці [2].

Практичну роль резервного нагрівання показано у зерносушарці Tonui та співавторів. Установка містила сонячний колектор, сушильну камеру, біомасовий нагрівач і систему руху повітря. Для сушіння партії 100 кг кукурудзи від 21 до 13 % вологості за шість годин розрахункова площа колектора становила 3,77 м^2. Ефективність режиму лише із сонячним колектором дорівнювала 39,9 %, а за одночасної роботи колектора і біомасового нагрівача – 57,7 % [3].

Конструкція автоматично регульованої сушарки для насіннєвого матеріалу передбачає тепловий колектор, акумулятор теплоти, сонячні відбивачі, фотоелектричні панелі, вентилятори гарячого та холодного повітря і цифровий регулятор. Швидкість вентилятора змінюється відповідно до температури теплового акумулятора, а холодне повітря використовується для обмеження перегріву без різкого зменшення загальної витрати повітря [4].

Порівняння природної та примусової конвекції проведено у змішаній наметовій сушарці з плоским колектором площею 1,12 м^2. Під час сушіння картопляних скибок примусова конвекція за швидкості повітря 1,1 м/с зменшила вологість від 85,90 до 14,10 % за 8 год, тоді як природна конвекція забезпечила кінцеву вологість 14,75 % за 14 год. Максимальна ефективність становила 32,95 % у примусовому режимі та 26,62 % у природному [5].

Природна конвекція визначається балансом термічного напору та опору зернового шару. Jindal і Gunasekaran запропонували метод оцінювання витрати повітря та швидкості сушіння рису за товщиною шару, висотою нагрітого повітряного стовпа і різницею температур між сушаркою та довкіллям [6]. Подальші моделі розглядають розподіл тиску і швидкості як просторову задачу, що особливо важливо для великих бункерів та радіального повітророзподілення [7].

Окремою проблемою є температурна і вологісна нерівномірність багатоярусних камер. У п'ятиярусній непрямій сушарці Al-Neama і Farkas максимальні температури послідовно знижувалися від 29,4 °C на першому ярусі до 25,5 °C на п'ятому. Мінімальна відносна вологість відповідно змінювалася від 12 до 28 % [8]. Ця робота є дозволеним англомовним аналогом досліджень температурної стратифікації в сонячних сушильних установках.

Аеродинамічний опір зернової маси залежить від виду культури, швидкості повітря, товщини й пористості шару, способу засипання, вологості, домішок і напрямку потоку. Огляд Górnicki та Kaleta систематизує рівняння опору зернових насипів [9]. Дослідження самоущільнення пшениці засвідчило зменшення порового об'єму зі збільшенням висоти шару та тривалості зберігання [10]. За результатами новішого експерименту, залежно від умов досліду, перепад тиску за вертикального руху повітря був на 10–117 % більшим, ніж за горизонтального, а наявність дрібних домішок додатково підвищувала аеродинамічний опір зернового шару приблизно на 30–50 % [11].

Патентні розробки демонструють розширення функціональності сонячних сушарок. У CN 206005742 U використано вакуумний трубчастий колектор, рециркуляційний контур, електричний догрів та спіральний робочий орган для перемішування зерна [12]. У CN 223345855 U запропоновано безперервну модульну систему з конвеєром, послідовними теплообмінними камерами, тепловими трубами і рекуперацією теплоти [13]. Патент CN 104126659 A передбачає обертовий циліндр із перфорованими плитами, напрямними елементами та окремим сонячним повітряним колектором [14]. Патент US 2011/0296708 A1 описує сушіння зерна в силосі з використанням сонячно нагрітого проміжного теплоносія, фотоелектричних панелей і резервного живлення від мережі [15]. Мобільна складна система US 2018/0231308 A1 поєднує багатоярусні поглинальні панелі, фотоелектричне живлення вентиляторів, сенсори температури й вологості та змінний об'єм камери [16].

Водночас частина патентів не містить експериментального підтвердження продуктивності, енергетичного балансу чи рівномірності кінцевої вологості. Патентна новизна часто зосереджується на компонуванні, мобільності або автоматизації, тоді як наукові роботи детальніше розкривають тепло- і масообмін, але випробовують установки переважно у малому масштабі.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Проведений огляд показує, що сонячне сушіння зерна розвивається у двох відносно відокремлених напрямах. Перший охоплює теплотехнічні та кінетичні дослідження невеликих експериментальних установок. Другий представлений патентами, в яких пропонуються модульні, мобільні, безперервні або автоматизовані конструкції. Між цими напрямами залишається недостатньо опрацьованим перехід від лабораторної схеми до установки продуктивністю, придатною для господарського застосування.

Невирішеною залишається проблема одночасного забезпечення чотирьох вимог: рівномірної кінцевої вологості зерна; стабільності температури за змінної сонячної радіації; прийнятних витрат електроенергії на вентиляцію; мобільності або модульного масштабування.

У більшості розглянутих конструкцій не наведено спільного аналізу теплового балансу, аеродинамічного опору, добової мінливості сонячного надходження і якості кінцевого продукту. Недостатньо досліджено також вплив напрямку фільтрації на опір та рівномірність сушіння в радіальних або комбінованих схемах.

МЕТА ДОСЛІДЖ1ЕННЯ

Метою дослідження є систематизація наукових і патентних рішень у сфері геліоколекторного сушіння зерна, визначення взаємозв'язку між способом підведення теплоти, організацією руху повітря та зернового матеріалу, засобами стабілізації режиму і показниками процесу, а також формування рекомендацій щодо перспективної структури енергоефективної зерносушарки.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процеси сушіння зерна з використанням сонячної теплової та фотоелектричної енергії. Предметом дослідження є конструктивні схеми сонячних колекторів і сушильних камер, способи організації повітряного потоку, переміщення зерна, акумулювання і рекуперації теплоти, резервного нагрівання та автоматизованого керування.

Джерельну базу сформовано з наукових статей, експериментальних досліджень і патентних документів, наданих для підготовки огляду. Російськомовні праці та матеріали, опубліковані на території Росії або Білорусі, до цитування й бібліографічних списків не включено. Для заміни їхньої тематичної функції використано англомовні дослідження температурної стратифікації, опору зернового шару, напрямку

фільтрації та математичного моделювання повітророзподілення.

Порівняння виконано за такими критеріями: тип підведення сонячної теплоти; режим конвекції; вид колектора; структура сушильної камери; стан зернового шару; наявність перемішування або безперервного переміщення; резервне джерело теплоти; рекуперація; акумулювання; автоматичне регулювання; дослідна продуктивність; початкова та кінцева вологість; температура, швидкість повітря, тривалість і теплова ефективність.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Класифікація геліоколекторних зерносушарок

За способом перетворення і підведення сонячної енергії доцільно виділити чотири групи: прямі теплові сушарки; непрямі сушарки з повітряним геліоколектором; змішані сушарки; фотоелектричнотермічні системи. В останній групі сонячне випромінювання одночасно використовується для нагрівання сушильного агента та живлення вентиляторів, приводів і системи керування.

За способом стабілізації режиму установки поділяються на системи без резервування; сушарки з акумулюванням теплоти; гібридні сушарки з біомасовим, електричним або іншим догрівом; системи з рекуперацією теплоти; комбіновані системи, що поєднують декілька засобів.

За станом матеріалу можна розрізняти лоткові тонкошарові, бункерні глибокошарові, барабанні, конвеєрні та установки з періодичним перемішуванням. Тонкий шар полегшує вирівнювання вологості, проте обмежує завантаження. Глибокий шар підвищує продуктивність на одиницю площі, але вимагає точнішого розрахунку аеродинамічного опору і розподілу повітря.

Наукові конструкції та результати випробувань

Сушарка Forson належить до змішаного пасивного типу. Її перевагами є відсутність електричного вентилятора та використання прямого і конвективного нагрівання. Обмеженням є низький доступний напір природної тяги, через що зростання товщини шару або довжини повітряного тракту швидко зменшує витрату агента.

Модель Simate пояснює одну з основних переваг змішаного сушіння зерна. Верхня поверхня шару отримує випромінювання, а нижня – тепло від повітряного колектора. Нагрівання з двох боків зменшує довжину шляху, який повинен пройти фронт випаровування.

Результати Tonui демонструють, що резервний нагрівач доцільно розглядати як регулятор дефіциту сонячної теплоти. За комбінованого режиму підвищується не лише температура, а й стабільність процесу.

Автоматично регульована система Nwosu поєднує нагрівальні та охолоджувальні канали. Це особливо важливо для насіннєвого зерна, де надмірна температура може знижувати схожість.

Дослідження Kumar підтверджує, що примусова конвекція найсильніше впливає на початковий період, коли інтенсивність видалення вологи висока. Для зернової сушарки це означає доцільність змінного режиму вентилятора.

Патентні напрями розвитку

Патент CN 210718417 U описує розкладну багатоярусну сушильну платформу. Фотоелектрична панель заряджає акумулятор, який живить електричні нагрівальні трубки під сушильними поверхнями [17]. Конструкція вирішує проблему недостатньої площі для відкритого сушіння та є мобільною, однак сонячна енергія проходить подвійне перетворення.

CN 206005742 U реалізує непряму схему з вакуумним колектором, рециркуляцією та електричним догрівом. Спіральний робочий орган зменшує ризик локального пересушування і застійних зон.

CN 223345855 U орієнтований на безперервне модульне сушіння. Послідовне додавання однакових камер дає можливість змінювати продуктивність, а конвеєр забезпечує контрольований час перебування матеріалу.

CN 104126659 A використовує обертовий циліндр, внутрішні перфоровані лопаті та подавання нагрітого сонячним колектором повітря. Обертання сприяє перемішуванню зерна і вирівнюванню контакту із сушильним агентом, однак механічний привід збільшує енергоспоживання та складність мобільної конструкції [14].

US 2018/0231308 A1 демонструє напрям мобільних багатофункціональних систем. Сходинкові поглинальні панелі утворюють декілька каналів, а вентилятори можуть працювати як на нагнітання нагрітого повітря, так і на охолодження камери.

US 2011/0296708 A1 переносить сонячне теплопостачання до традиційної силосної технології. Сонячна енергія нагріває проміжний теплоносій, який передає теплоту повітрю, що подається в зерновий насип.

Температурна нерівномірність і опір зернового шару

Температурна стратифікація виникає внаслідок одночасної дії плавучості, тепловтрат через огородження, поглинання теплоти матеріалом і випаровування вологи. У послідовно продуваній багатоярусній камері повітря передає частину ентальпії на кожному ярусі, тому температура знижується в напрямку руху.

Для глибокого зернового шару критичним є не лише середній перепад тиску, а й його просторовий розподіл. Самоущільнення зменшує пористість нижніх зон, дрібні домішки перекривають міжзернові канали, а орієнтація зернин формує анізотропію.

Експериментальна система горизонтального сушіння в бункері показала, що фронт сушіння може

рівномірно рухатися від центрального каналу до стінки, якщо довжина активної зони відповідає радіусу бункера. За збільшення розрахункової довжини до діаметра виникала нерівномірність за висотою [18].

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Порівняння показує, що конструктивна перевага сонячної сушарки не визначається лише типом колектора. Плоский повітряний колектор простіший, дешевший і безпосередньо нагріває агент, але його вихідна температура сильніше реагує на хмарність. Вакуумний колектор забезпечує вищий температурний потенціал, однак потребує теплообмінного контуру.

З погляду рівномірності сушіння найбільш перспективним є поєднання двобічного теплового впливу, організованого повітророзподілення і переміщення зерна. Для невеликої партії це може бути періодичне перемішування або реверс потоку. Для більшої продуктивності – конвеєр, барабан чи радіальний бункер.

Результати досліджень аеродинамічного опору мають безпосередньо враховуватися під час вибору вентилятора. Розрахунок за середньою пористістю без урахування ущільнення, домішок і напрямку потоку може занижувати потрібний напір.

Для кліматичних умов України перспективною є гібридна схема, у якій основний тепловий потік забезпечує плоский або вакуумний геліоколектор, вентилятори живляться від фотоелектричних модулів, а резервний нагрівач автоматично компенсує лише дефіцит температури.

Узагальнення дозволяє сформувати рекомендовану структуру перспективної установки: секційний повітряний геліоколектор; вентилятор із регульованою частотою обертання; резервний нагрівач; розподільна камера з можливістю осьового чи радіального підведення; датчики температури та відносної вологості; засоби перемішування або реверсу потоку; блок рекуперації.

ВИСНОВКИ

1. Сонячні зерносушарки доцільно класифікувати не лише як прямі, непрямі та змішані, а й за способом стабілізації режиму, структурою повітряного тракту, станом зернового шару та видом використання фотоелектричної енергії.

2. Змішане підведення теплоти формує верхній і нижній фронти сушіння та може забезпечувати рівномірніший розподіл вологості.

3. Примусова конвекція скорочує тривалість процесу порівняно з природною тягою, але її енергетичний ефект залежить від правильного вибору вентилятора з урахуванням ущільнення, домішок та анізотропії опору зернової маси.

4. Резервне нагрівання є найбільш ефективним у режимі автоматичної компенсації дефіциту сонячної теплоти. У дослідженій зерносушарці біомасовий догрів підвищив теплову ефективність з 39,9 до 57,7 %.

5. Сучасні патенти орієнтуються на модульність, мобільність, рециркуляцію, теплові труби, фотоелектричне живлення вентиляторів та сенсорне керування, але для більшості рішень відсутні відкриті експериментальні дані.

6. Перспективна конструкція для змінних погодних умов повинна поєднувати геліоколектор, регульовану примусову вентиляцію, дозований резервний нагрів, рекуперацію теплоти та організований розподіл повітря в зерновому шарі.

Під час підготовки статті автор використовував генеративний штучний інтелект ChatGPT (OpenAI) як допоміжний інструмент для структурування

Таблиця 1. Порівняння основних наукових і патентних рішень

Джерело та тип	Ключовий результат або конструктивне рішення	Основне обмеження
Forson et al. [1] – змішана пасивна	Природна тяга, нерухомий шар. Методика проєктування; 162 кг касави; 35,5 год; ефективність 12,3 %	Малий доступний напір природної тяги
Simate [2] – змішана пасивна	Потік нагрітого повітря знизу та пряме опромінення зверху. Формуються два зустрічні фронти сушіння	Лабораторний масштаб і модельне дослідження
Tonui et al. [3] – непряма гібридна	Лотки, природна або примусова конвекція. Партія 100 кг; теплова ефективність 39,9–57,7 %	Для стабілізації потрібне резервне паливо
Nwosu et al. [4] – автоматично регульована	Гарячий і холодний вентилятори, тепловий акумулятор, датчики та цифрове регулювання температури насіння	Результати переважно розрахункові
Kumar et al. [5] – змішана наметова	Природна або примусова конвекція. Тривалість 8 год проти 14 год; ефективність 32,95 % проти 26,62 %	Досліджено картоплю; мале завантаження
CN 206005742 U [12] – вакуумний колектор	Рециркуляція повітря, електричний догрів і спіральне перемішування зерна	Немає опублікованих результатів випробувань
CN 223345855 U [13] – модульна безперервна	Конвеєр, послідовні камери, теплові труби та рекуперація теплоти	Не наведено кількісних показників для зерна
US 2018/0231308 A1 [16] – мобільна складна	Фотоелектричні вентилятори, лотки, датчики, змінний об'єм камери й автономне керування	Відсутня кількісна оцінка сушіння зерна
US 2011/0296708 A1 [15] – силосна непряма	Вентиляція насипу із сонячним нагріванням проміжного теплоносія та резервним живленням	Кілька ступенів теплообміну ускладнюють систему

матеріалу, систематизації та узагальнення інформації, мовно-стилістичного редагування тексту й перевірки його оформлення. Наведені у статті наукові дані та бібліографічні джерела перевірено за першоджерелами. Остаточне рішення щодо змісту, наукових положень і висновків статті прийнято автором. Автор несе повну відповідальність за зміст роботи.

REFERENCES

[1] Forson, F. K., Nazha, M. A. A., Akuffo, F. O., & Rajakaruna, H. (2007). Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb. *Renewable Energy, 32*(14), 2306–2319. https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.003

[2] Simate, I. N. (2001). Simulation of the mixed-mode natural-convection solar drying of maize. *Drying Technology, 19*(6), 1137–1155. https://doi.org/10.1081/DRT-100104810

[3] Tonui, K. S., Mutai, E. B. K., Mutuli, D. A., Mbuge, D. O., & Too, K. V. (2014). Design and evaluation of solar grain dryer with a back-up heater. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 7*(15), 3036–3043. https://doi.org/10.19026/rjaset.7.639

[4] Nwosu, A. W., Chukwu, P. U., & Amonye, M. C. (2023). Consideration and calculations in the design of an auto-regulating solar dryer for variety seedlings production. *International Journal of Novel Research in Electrical and Mechanical Engineering, 10*(1), 54–62. https://doi.org/10.5281/zenodo.7552010

[5] Kumar, S., Dewangan, N., Verma, G., Ghritlahre, H. K., Verma, M., Kumar, Y., Agrawal, S., & Shekhar, S. (2023). Performance analysis of natural and forced convection mixed mode UV tent house solar dryer for potato drying. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 45*(4), 11482–11504. https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2259839

[6] Jindal, V. K., & Gunasekaran, S. (1982). Estimating air flow and drying rate due to natural convection in solar rice dryers. *Renewable Energy Review Journal, 4*(2), 1–9.

[7] Pitchai, G., & Jayas, D. S. (2007). Mathematical modeling of airflow distribution in grain bulks – A review. *2007 ASAE Annual Meeting*, Paper 076226. https://doi.org/10.13031/2013.23532

[8] Al-Neama, M., & Farkas, I. (2018). Evaluation of temperature and relative humidity stratifications in a solar drying chamber. *Journal of Scientific and Engineering Research, 5*(10), 59–65.

[9] Górnicki, K., & Kaleta, A. (2015). Resistance of bulk grain to airflow – A review. Part I: Equations for airflow resistance. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture, 65*, 31–41.

[10] Ramaj, I., Schock, S., Karaj, S., & Müller, J. (2022). Influence of self-compaction on the airflow resistance of aerated wheat bulks (Triticum aestivum L., cv. 'Pionier'). *Applied Sciences, 12*(17), 8909. https://doi.org/10.3390/app12178909

[11] Sadeghizadeh, A., Jian, F., & Jayas, D. S. (2025). Characterisation of airflow resistance of different moisture content wheat bulks mixed with different percentages and sizes of dockage. *Biosystems Engineering, 258*, 104261. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104261

[12] Pan, Z. (2017). *Solar hot-air grain drying device* (CN Patent No. 206005742 U). China National Intellectual Property Administration.

[13] Yue, M., Zheng, X., & He, L. (2025). *Continuous modular solar drying system* (CN Patent No. 223345855 U). China National Intellectual Property Administration.

[14] Zhang, L., & Zhu, J. (2014). *Solar grain dryer* (CN Patent Application No. 104126659 A). China National Intellectual Property Administration.

[15] Thompson, B. R. (2011). *Solar grain drying system and method* (US Patent Application Publication No. 2011/0296708 A1). United States Patent and Trademark Office.

[16] Ileleji, K. E., Lumi, J. A., & Gutierrez, D. M. R. (2018). *Modular collapsible solar dryer for multipurpose drying* (US Patent Application Publication No. 2018/0231308 A1). United States Patent and Trademark Office.

[17] Zhong, J. (2020). *Extendable energy-saving grain drying device* (CN Patent No. 210718417 U). China National Intellectual Property Administration.

[18] Chelladurai, V., Parker, V. R., Jayas, D. S., & White, N. D. G. (2015). Evaluation of a horizontal air flow in-bin grain drying system. *Applied Engineering in Agriculture, 31*(5), 793–797. https://doi.org/10.13031/aea.31.11195

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

[1] Forson, F. K., Nazha, M. A. A., Akuffo, F. O., & Rajakaruna, H. (2007). Design of mixed-mode natural convection solar crop dryers: Application of principles and rules of thumb. *Renewable Energy, 32*(14), 2306–2319. https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.12.003

[2] Simate, I. N. (2001). Simulation of the mixed-mode natural-convection solar drying of maize. *Drying Technology, 19*(6), 1137–1155. https://doi.org/10.1081/DRT-100104810

[3] Tonui, K. S., Mutai, E. B. K., Mutuli, D. A., Mbuge, D. O., & Too, K. V. (2014). Design and evaluation of solar grain dryer with a back-up heater. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 7*(15), 3036–3043. https://doi.org/10.19026/rjaset.7.639

[4] Nwosu, A. W., Chukwu, P. U., & Amonye, M. C. (2023). Consideration and calculations in the design of an auto-regulating solar dryer for variety seedlings production. *International Journal of Novel Research in Electrical and Mechanical Engineering, 10*(1), 54–62. https://doi.org/10.5281/zenodo.7552010

[5] Kumar, S., Dewangan, N., Verma, G., Ghritlahre, H. K., Verma, M., Kumar, Y., Agrawal, S., & Shekhar, S. (2023). Performance analysis of natural and forced convection mixed mode UV tent house solar dryer for potato drying. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 45*(4), 11482–11504. https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2259839

[6] Jindal, V. K., & Gunasekaran, S. (1982). Estimating air flow and drying rate due to natural convection in solar rice dryers. *Renewable Energy Review Journal, 4*(2), 1–9.

[7] Pitchai, G., & Jayas, D. S. (2007). Mathematical modeling of airflow distribution in grain bulks – A review. *2007 ASAE Annual Meeting*, Paper 076226. https://doi.org/10.13031/2013.23532

[8] Al-Neama, M., & Farkas, I. (2018). Evaluation of temperature and relative humidity stratifications in a solar drying chamber. *Journal of Scientific and Engineering Research, 5*(10), 59–65.

[9] Górnicki, K., & Kaleta, A. (2015). Resistance of bulk grain to airflow – A review. Part I: Equations for airflow resistance. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Agriculture, 65*, 31–41.

[10] Ramaj, I., Schock, S., Karaj, S., & Müller, J. (2022). Influence of self-compaction on the airflow resistance of aerated wheat bulks (Triticum aestivum L., cv. 'Pionier'). *Applied Sciences, 12*(17), 8909. https://doi.org/10.3390/app12178909

[11] Sadeghizadeh, A., Jian, F., & Jayas, D. S. (2025). Characterisation of airflow resistance of different moisture content wheat bulks mixed with different percentages and sizes of dockage. *Biosystems Engineering, 258*, 104261. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2025.104261

[12] 潘振发. (2017). 一种太阳能热风粮食干燥装置 (CN 206005742 U). 国家知识产权局.

[13] 岳淼, 郑雪枫, & 何立凡. (2025). 一种连续推进的模块化太阳烘干系统 (CN 223345855 U). 国家知识产权局.

[14] 张丽丽, & 朱金辉. (2014). 一种太阳能粮食干燥器 (CN 104126659 A). 国家知识产权局.

[15] Thompson, B. R. (2011). *Solar grain drying system and method* (US Patent Application Publication No. 2011/0296708 A1). United States Patent and Trademark Office.

[16] Ileleji, K. E., Lumi, J. A., & Gutierrez, D. M. R. (2018). *Modular collapsible solar dryer for multipurpose drying* (US Patent Application Publication No. 2018/0231308 A1). United States Patent and Trademark Office.

[17] 钟吉明. (2020). 一种可延展的节能型谷物烘干装置 (CN 210718417 U). 国家知识产权局.

[18] Chelladurai, V., Parker, V. R., Jayas, D. S., & White, N. D. G. (2015). Evaluation of a horizontal air flow in-bin grain drying system. *Applied Engineering in Agriculture, 31*(5), 793–797. https://doi.org/10.13031/aea.31.11195

© Польшиков М. О.
Дата першого надходження статті до видання: 06.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 31.08.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 02.11.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)