

УДК 631.365:662.997:621.577

<https://doi.org/10.18524/0367-1631.2026.64.361459>**Бошков Л. З.^{1*}, Єрохін Д. М.², Комендант С. Г.³, Волчок В. О.⁴, Воробійов Н. О.⁵***Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна***E-mail: leonidboshkov@gmail.com*ORCID iD: ¹ <https://orcid.org/0000-0002-2196-1519>² <https://orcid.org/0009-0001-7302-8245>³ <https://orcid.org/0009-0006-7554-9577>⁴ <https://orcid.org/0009-0002-9445-788X>⁵ <https://orcid.org/0009-0009-0407-5134>

Моделювання гібридної системи теплопостачання з відновлювальними джерелами енергії

Розглянуто проблему підвищення енергоефективності процесу післязбирального сушіння зерна шляхом застосування гібридної системи теплопостачання. Визначено за результатами аналізу сучасних наукових праць, що використання гібридної системи теплопостачання дозволяє зменшити споживання традиційних енергоресурсів, підвищити ефективність використання теплоти відпрацьованого повітря, стабілізувати температуру сушильного агента та забезпечити більш рівномірний перебіг процесу сушіння. Запропоновано конструктивно-технологічну схему шахтної зерносушарки з гібридною системою теплопостачання, у якій свіже атмосферне повітря змішується з частиною рециркуляційного повітря, після чого проходить через сонячний повітряний підігрівач і конденсатор теплового насоса. Запропоновано використовувати сонячний підігрівач для попереднього нагрівання повітря, а тепловий насос – для додаткового догрівання та утилізації теплоти відпрацьованого повітря. Для забезпечення рівномірного сушіння зернового шару передбачено подачу сушильного агента через систему розподільних коробів, розташованих по висоті шахти. Визначено основні енергетичні параметри гібридної системи теплопостачання зерносушарки для сушіння пшениці з витратою 1,7 т/год з початковою вологістю 20% до кінцевої вологості 14%. За результатами розрахунку встановлено, що теплова потужність сонячного повітряного підігрівача становить 61,6 кВт, потужність теплового насоса — 92 кВт, загальна теплова потужність системи — 154 кВт, частка сонячного випромінювання — 40%, а коефіцієнт перетворення теплового насоса дорівнює 3,5. Розглянуто особливості формування температурного поля та поля вологості зерна в шахтній сушарці при багаторівневому підведенні сушильного агента через короби. Запропонована схема може бути використана для створення енергоефективних зерносушарок для продовольчого та насінневого зерна.

Ключові слова: сушіння, зерно, рециркуляція повітря, енергоефективність, температурне поле, поле вологості.

Вступ. Однією з найбільш енергоємних операцій у агропромисловому виробництві є сушіння зерна, оскільки для видалення вологи необхідне значне підведення теплоти та забезпечення інтенсивного повітрообміну в зерновому шарі. Традиційні зерносушарки переважно працюють на природному газі, дизельному паливі або електроенергії, що призводить до високих експлуатаційних витрат, залежності від цін на енергоносії та збільшення викидів парникових газів. Перс-

продуктивним напрямом підвищення енергоефективності зерносушіння є використання гібридних систем теплопостачання, у яких традиційні джерела теплоти частково або повністю замінюються відновлюваними та низькопотенційними енергетичними ресурсами. Зокрема, сонячний повітряний підігрівач може забезпечувати попереднє нагрівання сушильного агента без витрат палива, а тепловий насос – стабілізувати температуру повітря та використовувати низькопотенційне тепло навколишнього середовища. Поєднання цих елементів створює передумови для зниження енергоспоживання, підвищення економічної ефективності та зменшення екологічного навантаження процесу сушіння.

Постановка проблеми. Практична реалізація зерносушарки з гібридною системою теплопостачання потребує розв'язання низки науково-технічних задач, до яких належить вибір раціональної схеми підведення та розподілу сушильного агента, забезпечення рівномірного проходження повітря крізь шар зерна з урахуванням його гідравлічного опору, узгодження роботи сонячного повітряного підігрівача, теплового насоса, вентилятора та сушильної шахти, що має дозволити забезпечити енергоефективне видалення вологи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Застосування гібридних систем теплопостачання дозволяє суттєво підвищити енергетичну та економічну ефективність процесу сушіння зерна [1]. Однією з ключових переваг є значне зниження енергоспоживання за рахунок використання поновлюваних джерел енергії. Сонячні колектори забезпечують попереднє нагрівання повітря без витрат палива, а тепловий насос використовує низькопотенційне тепло навколишнього середовища. Завдяки цьому досягається високий коефіцієнт перетворення енергії. При значеннях COP від 3 на 1 кВт споживаної електроенергії виробляється 3 – 4 кВт теплової енергії [2]. Комбінування сонячної енергії та теплового насоса дозволяє суттєво знизити витрати на енергоресурси [3]. Гібридна сушарка характеризується низьким рівнем впливу на довкілля, оскільки відсутні викиди продуктів згоряння. Це особливо актуально в умовах посилення екологічних вимог та переходу до сталого розвитку. В роботі [4] виконана розробка гібридної сушарки з тепловим насосом на сонячній енергії для сушіння рису.

Сушіння традиційно використовується для збереження сільськогосподарської продукції та, головним чином, для зниження вмісту вологи до певного ступеня, щоб продовжити термін її зберігання [4, 5]. Сушіння є енергоємним процесом, який вимагає великих витрат енергії через високу приховану теплоту випаровування води; приблизно 12% від загальної кількості енергії, що використовується у всіх галузях промисловості розвинених країн, споживається на процеси сушіння [6, 7].

Щоб подолати обмеження методів сонячного сушіння або сучасних методів сушіння, а також зменшити споживання енергії, необхідно вибрати ефективну систему теплопостачання. Поєднання системи теплового насоса із сонячною сушаркою забезпечує рішення для сучасних методів сушіння [4]. Системи теплових насосів є енергоефективними пристроями, а також є екологічно чистими технологіями [8]. Поєднання системи теплового насоса із сонячною сушаркою відоме як сонячна тепла насосна сушарка (СТНС). На продуктивність СТНС впливає продуктивність теплового насоса, тоді як на продуктивність теплового

насоса впливає здатність випарника видаляти вологу з повітря та здатність конденсатора нагрівати осушуване повітря [9]. СТНС пропонує деякі переваги: процес сушіння може проходити безперервно, потребує менше часу, споживає мало енергії та забезпечує хорошу якість продукції [8]. У кількох дослідженнях зазначається, що СТНС використовувалися для сушіння сільськогосподарських або біологічно активних продуктів, включаючи продовольчі зернові [2, 10].

Автори [11] виявили, що коефіцієнт перетворення теплоти в тепловому насосі (COP) системи та коефіцієнт вологості (SMER) становили 2,1–3,1 та 0,26–0,92 кг/кВт·год відповідно. Автор [12] повідомив, що коефіцієнт перетворення (COP) сушарки становив 2,31–2,77 із середнім значенням 2,54, тоді як середній коефіцієнт вологості становив до 0,79 кг/кВт·год. Сушарка знизилася вміст вологи (МС) копри з 52% до 9,2% протягом 40 годин при середній температурі 43,2°C.

В [13] чисельно оцінили продуктивність термодинамічного насоса з використанням ідентичної сушильної камери для бананів і виявили, що середні значення COP та SMER теплових насосів становили 2,72 та 0,6 кг/кВт·год відповідно. Вологовміст банана знизився з 74% до 19% протягом 21 години при 54,8 °C. Автори [5] експериментально дослідили СТНС та визначили, що коефіцієнт перетворення енергії (COP), коефіцієнт споживання енергії (SMER) та ексергетична ефективність теплового насоса становили 2,04, 1,45 кг/кВт·год та 45,08% відповідно. Термін окупності системи склав 46 місяців. Однак, СТНС має недолік: низька температура повітря для сушіння в хмарний та дощовий день може зробити операцію сушіння неповною через обмежену потужність конденсатора теплового насоса для вироблення теплової енергії та обмежену здатність сонячного колектора збирати сонячну енергію. Щоб подолати ці проблеми, СТНС можна інтегрувати з біомасовою піччю, яка використовує біомасу як джерело теплової енергії. В роботі [14] досліджувалась продуктивність насоса, інтегрованого з піччю на біомасі, з використанням сушильної камери лоткового типу для червоного перцю чилі. Автор повідомив, що середній показник SMER становив 0,14 кг/кВт·год, а тепловий ККД сушарки – 9,03%. Крім того, коефіцієнт перетворення тепла (COP), ККД сонячного колектора та ККД печі на біомасі зросли до 3,84%, 35,1% та 30,7% відповідно. Тим часом піч та сонячний колектор витрачали приблизно 37,8% та 14,7% енергії відповідно на сушарку.

Автори [16] виявили, що коефіцієнт перетворення теплового насоса, ККД сонячного колектора та ККД печі на біомасі становили 3.7%, 50.5% та 77.5% відповідно.

Метою роботи є розробка конструктивно-технологічної схеми зерносушарки з гібридною системою теплопостачання на основі сонячного повітряного підігрівача та теплового насоса, яка забезпечує зниження витрат традиційних енергоресурсів, рівномірне сушіння зернового шару та підвищення загальної енергоефективності процесу сушіння.

Результати дослідження. Робота запропонованої авторами гібридної системи теплопостачання зерносушарки базується на поєднанні трьох основних елементів: сонячного повітрянагрівача, теплового насоса та системи рециркуляції повітря. Така схема забезпечує ефективне використання енергії та мінімізацію

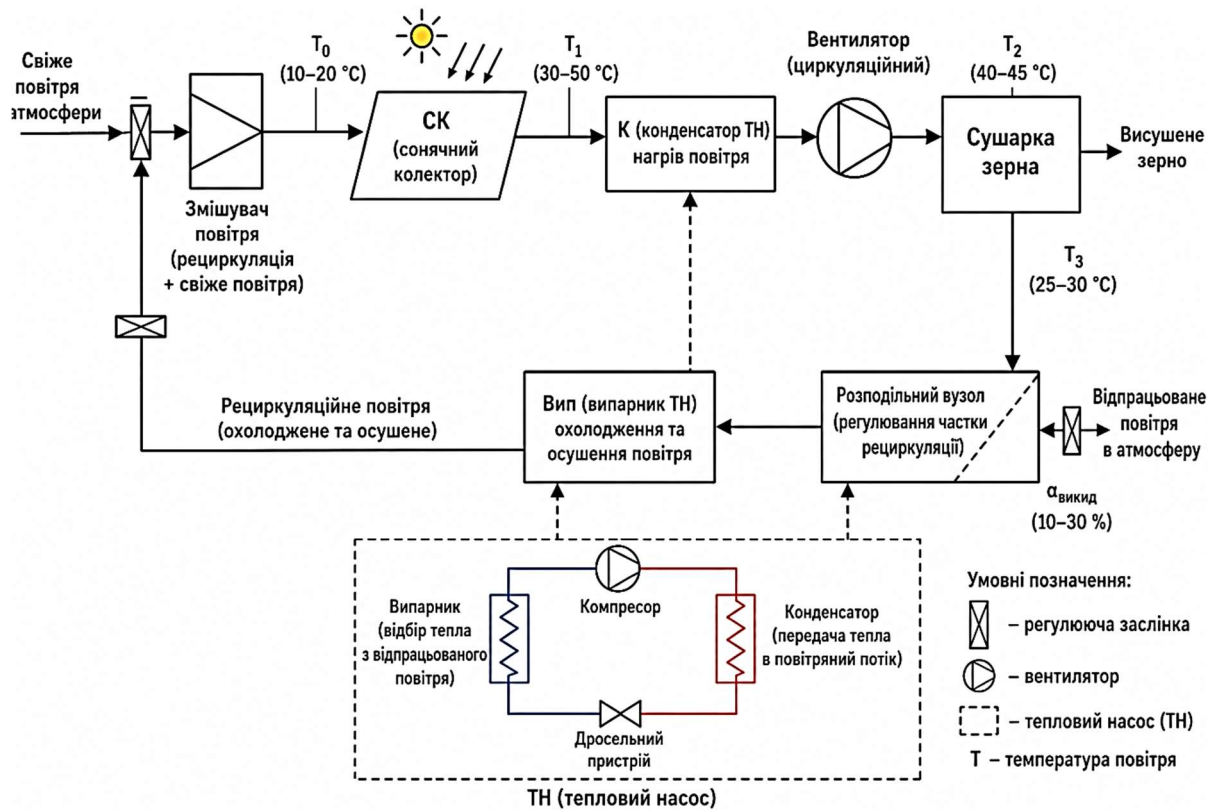


Рис. 1. Схема зерносушарки з гібридною системою теплопостачання с рециркуляцією повітря

витрат. На рис. 1 наведена схема зерносушарки з гібридною системою теплопостачання з рециркуляцією повітря. Зерносушарка з рециркуляцією повітря є енергетично ефективнішою, оскільки частина теплоти відпрацьованого повітря повторно використовується в процесі сушіння. Це дозволяє знизити теплові втрати та зменшити навантаження на тепловий насос.

У систему надходить свіже атмосферне повітря, яке змішується з частиною рециркуляційного повітря, що повертається після сушіння. Цей процес відбувається в змішувачі повітря, де формується потік із заданими параметрами температури та вологості. Після змішування повітря надходить у сонячний колектор (СК), де нагрівається за рахунок сонячної енергії. Температура повітря підвищується до $T_1 \approx 30-45$ °C. На цьому етапі забезпечується часткове покриття теплового навантаження за рахунок відновлюваного джерела енергії. Після сонячного колектора повітря проходить через конденсатор теплового насоса, де додатково нагрівається до необхідної температури сушіння: $T_2 \approx 45-52$ °C. Тепловий насос використовує низькопотенційну теплоту відпрацьованого повітря, яку відбирає у випарнику, що дозволяє значно підвищити енергоефективність системи. Нагріте повітря подається в сушарку за допомогою вентилятора, який забезпечує необхідний витратний режим і рівномірний розподіл повітря через шар зерна. У сушарці відбувається процес сушіння: повітря передає тепло зерну, волога випаровується, повітря насичується водяною паром. Після сушарки повітря має нижчу температуру $T_3 \approx 25-30$ °C і підвищену вологість. Цей потік направляється до

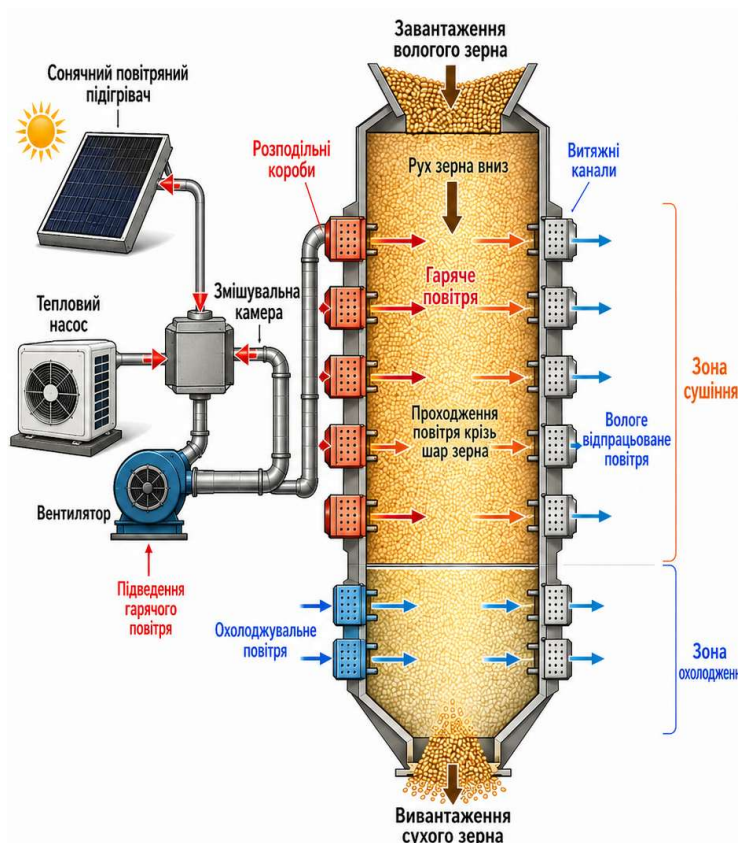


Рис. 2. Схема шахтної зерносушарки з гібридною системою теплопостачання

розподільного вузла, де він розділяється на дві частини: частина (20–30%) викидається в атмосферу; інша частина повертається в систему. Рециркуляційне повітря проходить через випарник теплового насоса, де віддає теплоту холодоагенту; охолоджується та частково осушується. Таким чином, теплота відпрацьованого повітря не втрачається, а використовується повторно. Після випарника повітря повертається у змішувач, де знову змішується зі свіжим повітрям і цикл повторюється. Система працює в різних режимах: денний режим - сонячний колектор функціонує, що зменшує навантаження на тепловий насос, нічний режим - працює тільки тепловий насос, за рахунок чого підтримується необхідна температура сушіння.

Загальне теплове навантаження формується за рахунок теплоти випаровування вологи, нагріву матеріалу та теплових втрат. Для побудови математичної моделі гібридної зерносушарки доцільно використовувати підхід, що поєднує рівняння теплового балансу сушильної камери, масопереносу в зерні, енергетичного балансу сонячного повітрянагрівача та рівняння ефективності теплового насоса. Такий підхід відповідає сучасним дослідженням сонячно-теплонасосних сушильних систем, у яких оцінюються COP (Coefficient of Performance, коефіцієнт перетворення теплового насоса), MER (Moisture Extraction Rate, швидкість видалення вологи) і SMER (Specific Moisture Extraction Rate, питомий показник ефективності сушіння), ефективність сонячного колектора та кінетика зменшення вологості зерна. Алгоритм розрахунку складається з комплексу моделей:

Таблиця. Технічні характеристики гібридної системи теплопостачання зерносушарки

Джерело енергії	Потужність
Сонячний повітрянагрівач	61.6 кВт
Навколишнє середовище (через ТН)	66 кВт
Електровитрати в компресорі ТН	26.4 кВт
Потужність теплового насоса	92 кВт
Загальна потужність	154 кВт
Доля сонячного випромінювання	40 %
Коефіцієнт перетворення	3.5

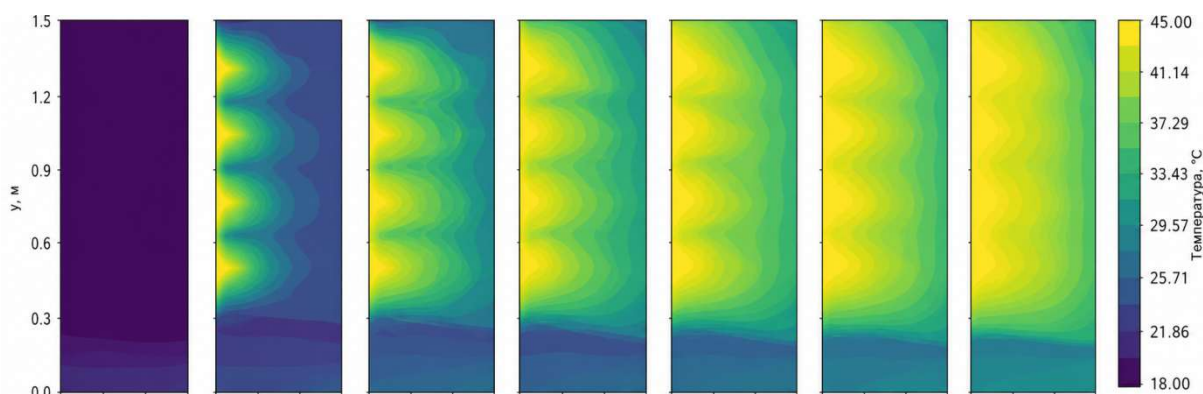


Рис. 3. Зміна температурного поля в шахтній зерносушарці в період виходу на режим.

сушіння, сонячного колектора та теплового насоса з показниками ефективності. Виконаний розрахунок гібридної зерносушарки, вихідні дані для розрахунку наступні. Матеріал – зерно пшениці, витрата зерна: $G = 1,7$ т/год, початкова вологість: $W_1 = 20\%$, кінцева вологість: $W_2 = 14\%$, температура навколишнього середовища: $t_0 = 15^\circ\text{C}$, температура сушильного агенту: $t_1 = 60^\circ\text{C}$, питома теплоємність повітря: $c_p = 1.005$ кДж/(кг·°C).

За результатами розрахунку встановлено, що теплова потужність сонячного повітряного підігрівача становить 62 кВт, потужність теплового насоса – 92 кВт, загальна теплова потужність системи – 154 кВт, частка сонячного випромінювання – 40%, а коефіцієнт перетворення теплового насоса дорівнює 3,5.

При моделюванні процесу розповсюдження теплоти в щільному шарі зерна в зерносушарці, що продувається нагрітим повітрям, з використанням програмного середовища Python отримані зображення температурного поля та поля вологості. Зміна температурного поля в шахтній зерносушарці в період виходу на режим показана на рис. 3. У моделі прийнято щадний режим для насінневої пшениці: температура повітря біля підвідного короба близько 45°C , швидкість повітря в шарі близько $0,25$ м/с, температура зерна обмежена до 45°C .

На початку сушіння прогрівається лише вхідна зона сушильної камери. Далі тепловий фронт поступово поширюється по шару зерна. Максимальні температури формуються поблизу розподільних коробів у сушильній зоні, тоді як у напрямку до витяжних каналів і в зоні охолодження температура зменшується. На

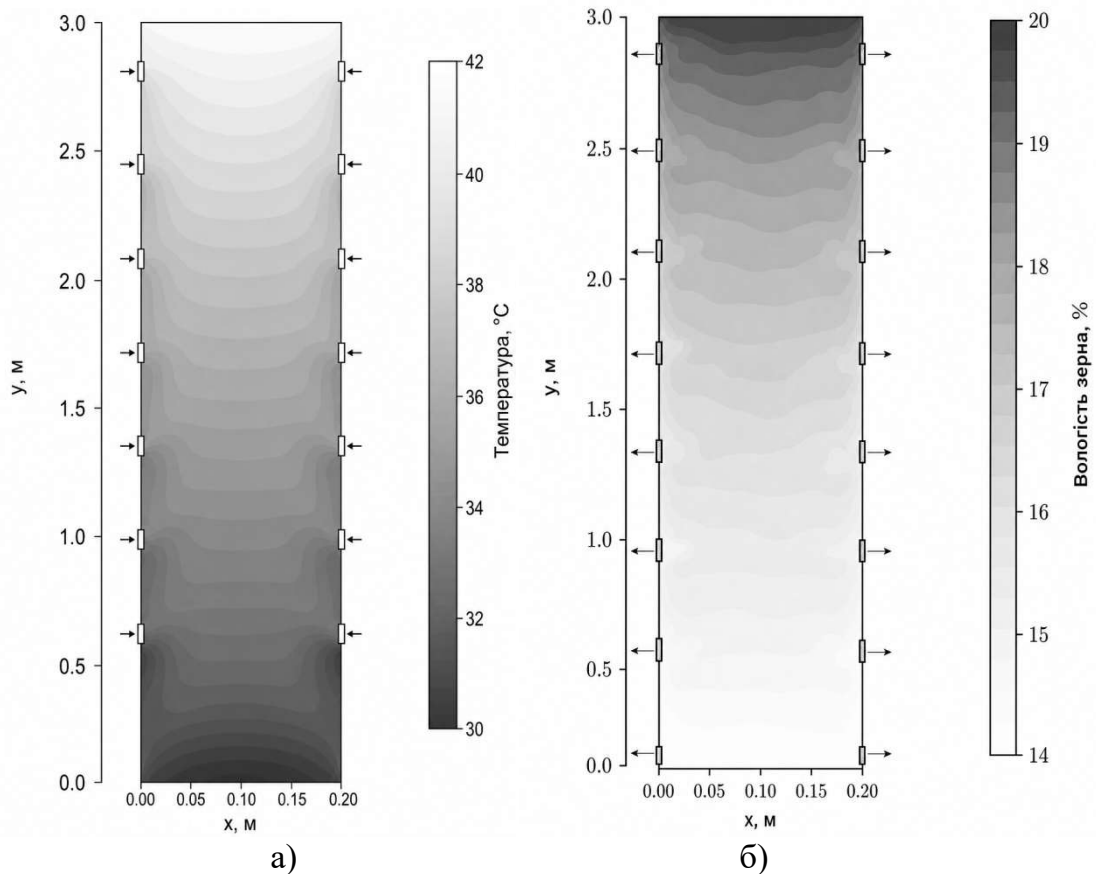


Рис. 4. Поле температур (а) та вологості (б) зерна в зерносушарці у квазістаціонарному режимі.

рис. 4 наведені графіки зміни температури та вологості зерна по висоті зерносушарки в квазістаціонарному режимі. Зернова маса розглядається не як суцільне тіло, а як дисперсний шар окремих зернівок, між якими існує поровий простір для проходження сушильного агента – потоку повітря, нагрітого в системі гібридного теплопостачання. Передача теплоти до зерна відбувається переважно шляхом конвективного теплообміну між нагрітим повітрям і поверхнею зернівок, а також подальшою теплопровідністю всередині зерна, що забезпечує прогрів його внутрішніх шарів і створює умови для випаровування вологи.

Отримані графіки відповідають фізиці процесу сушіння. Найвні локальні хвилеподібні відхилення температури (рис. 4а) по висоті пов'язані з розташуванням коробів. У місцях підведення повітря формуються локальні зони підвищеної інтенсивності теплообміну. Однак ці зони не створюють різких перегрівів, що вказує на доцільність багаторівневого розташування коробів по висоті сушарки. Завдяки такій схемі подачі теплоносія забезпечується більш рівномірне надходження теплоти до зернового шару. Невелике збільшення вологості (рис. 4б) в напрямку до відповідного короба є фізично обґрунтованим, оскільки повітря в процесі руху через зерновий шар поступово насичується водяною парою, його сушильна здатність зменшується, і тому інтенсивність видалення вологи на виході дещо нижча.

Представлена схема гібридної системи теплопостачання може бути використана для термообробки та сушіння щільних шарів дисперсних матеріалів при помірних температурних рівнях, проте слід враховувати аеродинамічний опір шару по його товщині. Товщину шару слід обирати з урахуванням втрат енергії потоку. Так, для зернівки пшениці з довжиною 4 – 11 мм товщину шару доцільно приймати на рівні 0,2 м [16]. Найкращу відповідність експериментальним даним за втратами тиску при продуванні потоку газу крізь щільний шар дисперсного матеріалу забезпечує рівняння Ергуна. Формулу Ергуна (Ергана) [17, 18] на практиці для щільного шару, традиційно використовують ту, яка вимагає врахування інерційних сил в потоці, що рухається (другий доданок у правій частині рівняння).

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150\mu_c w (1-\varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} + \frac{1,75\rho_c w^2 (1-\varepsilon)}{d \varepsilon^3} = 392$$

де ε – порізність шару, μ - коефіцієнт динамічної в'язкості, ρ – густина рідини (газу), w - швидкість потоку, H – товщина шару по ходу повітря.

При товщині шару $H=0,2$ втрати тиску складають $\Delta P=78,4$ Па. Розрахунки аеродинамічного опору шару дозволяють визначити його оптимальний розмір та обрати технічне обладнання, а також дозволяють зробити висновки щодо рівномірності процесу розповсюдження теплоти

Висновки. Запропонована конструктивно-технологічна схема гібридної системи теплопостачання для шахтної зерносушарки, яка поєднує сонячний повітряний підігрівач, тепловий насос і часткову рециркуляцію відпрацьованого повітря, забезпечує попереднє нагрівання повітря за рахунок сонячної енергії, додаткове догрівання в конденсаторі теплового насоса та повторне використання теплоти відпрацьованого повітря.

Визначено основні енергетичні параметри гібридної системи для сушіння пшениці продуктивністю 1,7 т/год із початковою вологістю 20% до кінцевої вологості 14%. Теплова потужність сонячного повітрянагрівача становить 61,6 кВт, потужність теплового насоса — 92 кВт, загальна теплова потужність системи — 154 кВт, коефіцієнт перетворення теплового насоса — 3,5.

Моделювання температурного поля та поля вологості підтвердило наявність локальних відхилень поблизу коробів, однак ці відхилення не створюють різких зон перегріву або недосушування.

Представлена схема гібридної системи теплопостачання може бути використана для термообробки та сушіння щільних шарів дисперсних матеріалів при помірних температурних рівнях, проте слід враховувати аеродинамічний опір шару при визначенні його товщини, що дозволить підібрати оптимальне технічне обладнання та забезпечити задовільну рівномірність процесу розповсюдження теплоти.

Література

1. A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology / J. An et al. *Energy Reports*. 2024. Vol. 12. P. 5482–5506. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.11.037>.
2. A solar assisted heat pump drying system for grain in-store drying / H. Li et al. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*. 2009. Vol. 4, no. 3. P. 386–391. URL: <https://doi.org/10.1007/s11708-010-0003-3>.
3. Patel K. K., Kar A. Heat pump assisted drying of agricultural produce—an overview. *Journal of Food Science and Technology*. 2011. Vol. 49, no. 2. P. 142–160. URL: <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0334-z>.
4. Development of hybrid solar-assisted heat pump dryer for drying paddy / M. Yahya et al. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023. Vol. 45. P. 102936. URL: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102936>.
5. Singh A., Sarkar J., Sahoo R. R. Experimental energy, exergy, economic and exergoeconomic analyses of batch-type solar-assisted heat pump dryer. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 156. P. 1107–1116. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.100>.
6. Comparison of solar dryer and solar-assisted heat pump dryer for cassava / M. Yahya et al. *Solar Energy*. 2016. Vol. 136. P. 606–613. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.07.049>.
7. Compression heat pump-assisted thermal desalination systems: a comprehensive review / M. Mohanraj et al. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024. URL: <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13712-5>.
8. Research and developments on solar assisted compression heat pump systems – A comprehensive review (Part A: Modeling and modifications) / M. Mohanraj et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 83. P. 90–123. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.08.022>.
9. Experimental investigation of effect of refrigerant gases, compressor lubricant and operating conditions on performance of a heat pump / F. Afshari et al. *Journal of Central South University*. 2021. Vol. 28, no. 11. P. 3556–3568. URL: <https://doi.org/10.1007/s11771-021-4875-7>.
10. Hasan Ismaeel H., Yumrutaş R. Investigation of a solar assisted heat pump wheat drying system with underground thermal energy storage tank. *Solar Energy*. 2020. Vol. 199. P. 538–551. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.022>.
11. Mushroom drying with solar assisted heat pump system / S. Şevik et al. *Energy Conversion and Management*. 2013. Vol. 72. P. 171–178. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.09.035>.
12. Mohanraj M. Performance of a solar-ambient hybrid source heat pump drier for copra drying under hot-humid weather conditions. *Energy for Sustainable Development*. 2014. Vol. 23. P. 165–169. URL: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.09.001>.
13. Numerical simulation of a heat pump assisted solar dryer for continental climates / M. Kuan et al. *Renewable Energy*. 2019. Vol. 143. P. 214–225. URL: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.119>.

14. Yahya M. Design and Performance Evaluation of a Solar Assisted Heat Pump Dryer Integrated with Biomass Furnace for Red Chilli. *International Journal of Photoenergy*. 2016. Vol. 2016. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1155/2016/8763947>.
15. Performance and economic analyses on solar-assisted heat pump fluidised bed dryer integrated with biomass furnace for rice drying / M. Yahya et al. *Solar Energy*. 2018. Vol. 174. P. 1058–1067. URL: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.002>
16. Sadaka S., Jayas D. S. Cereal grain drying systems. *Storage of Cereal Grains and Their Products*. 2022. P. 293–329. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812758-2.00008-8>.
17. Akgiray Ö., Saatçı A.M. A new look at filter backwash hydraulics. *Water supply*. 2001. Vol.1, no.2. P.65–72. URL: <https://doi.org/10.2166/ws.2001.0022>.
18. Установка для сушки щільного рухомого шару посівного зерна при мікрохвильово-конвективному сушінні / І. Л. Бошкова та ін. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2024. Т. 60, № 2. URL: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i2.2822>.

Дата надходження: 12.03.2026

Дата прийняття до друку: 27.04.2026

Дата публікації: 28.05.2026

L. Z. Boshkov, D. M. Yerokhin, S. H. Komendant, V. O. Volchok, N. O. Vorobjov

Modeling of a hybrid heat supply system with renewable energy sources

Summary

The paper considers the problem of improving the energy efficiency of post-harvest grain drying through the application of a hybrid heat supply system. Based on the analysis of modern scientific studies, it has been determined that the use of a hybrid heat supply system makes it possible to reduce the consumption of conventional energy resources, increase the efficiency of waste-air heat recovery, stabilize the temperature of the drying agent, and ensure a more uniform drying process. A structural and technological scheme of a shaft grain dryer with a hybrid heat supply system is proposed. In this system, fresh atmospheric air is mixed with a portion of recirculated air and then passes through a solar air heater and the condenser of a heat pump. It is proposed to use the solar heater for preliminary air heating, while the heat pump is used for additional heating and recovery of heat from the exhaust air. To ensure uniform drying of the grain layer, the drying agent is supplied through a system of distribution ducts arranged along the height of the dryer shaft. The main energy parameters of the hybrid heat supply system for drying wheat at a mass flow rate of 1.7 t/h from an initial moisture content of 20% to a final moisture content of 14% have been determined. According to the calculation results, the thermal capacity of the solar air heater is 61.6 kW, the heat pump capacity is 92 kW, the total thermal capacity of the system is 154 kW, the share of solar radiation is 40%, and the coefficient of performance of the heat pump is 3.5. The features of the formation of the grain temperature field and moisture field in the shaft dryer under multi-level supply of the drying agent through the distribution ducts are considered. The proposed scheme can be used for the development of energy-efficient grain dryers for both food and seed grain.

Keywords: drying, grain, air recirculation, energy efficiency, temperature field, moisture field.