

**ВПЛИВ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА  
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОТОЧНИХ ТЕПЛОНАСОСНИХ СУШАРОК  
ЗЕРНА**

*М. К. Безродний, доктор технічних наук, професор*

*В. В. Вовк, аспірант*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

*E-mail: [vovk.viktor@lil.kpi.ua](mailto:vovk.viktor@lil.kpi.ua)*

**Анотація.** Сушіння зерна є необхідним етапом післязбиральної обробки, де використання відновлювальних джерел енергії, зокрема, теплових насосів в комбінації з сонячною енергією є одним із методів підвищення енергетичної ефективності процесу. Наведено стисло інформацію щодо використання теплових насосів у комбінації з різними підходами до використання сонячної енергії. Детально розглянуто схемне рішення проточної сушарки зерна з послідовним використанням двох систем нагрівання сушильного агента: сонячного нагрівача та теплового насоса. У межах статті наведено аналітичну модель для визначення енергетичної ефективності цього схемного рішення та результати обчислень. Подано рекомендації щодо оптимального використання сонячної енергії в комбінації з тепловим насосом для проточних сушарок з рециркуляцією сушильного агента. Результати дослідження будуть корисними для подальших наукових пошуків та розробників сучасних систем сушіння зернових.

**Ключові слова:** зерносушарка, енергоефективність, рециркуляція, тепловий насос, сонячні колектори, сонячна енергія, рекуперація, проточні сушарки, вологість зерна

**Актуальність.** Сушіння зерна є одним з найенергоємніших технологічних процесів у ланцюжку доданої вартості в агропромисловому комплексі. Забезпечення належного рівня вологості зернових культур – обов'язкова умова для його довгострокового зберігання, однак на цю операцію може припадати до 60-70 % загальних енерговитрат післязбиральних робіт [1]. У сучасних умовах, коли питома вага вартості енергоносіїв у собівартості готової продукції невпинно зростає, питання підвищення енергетичної ефективності сушіння виходить на перший план. Основними передумовами для вирішення цієї задачі є впровадження прогресивних

теплотехнічних рішень, оптимізація режимів сушіння, утилізація відведеного тепла та інтеграція відновлюваних джерел енергії [2]. Рациональне використання енергії не лише знижує операційні витрати та підвищує конкурентоспроможність аграріїв, але й сприяє зменшенню вуглецевого сліду галузі [3], що робить цю тему актуальною як з економічної, так і з екологічної точки зору.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У світовій практиці підвищення енергетичної ефективності сушіння зерна досягається переважно за рахунок технологічної модернізації відомих технологічних схем та впровадження високоточних та інтелектуальних систем керування [4]. Ключові напрями включають: рекуперацію теплоти сушильного агенту та рециркуляцію продукту або сушильного агенту, що дозволяє повертати до 30-40 % теплової енергії, яка раніше викидалася в атмосферу [5]. Дедалі більшого поширення набувають конденсаційні сушарки та системи на базі теплових насосів [6], особливо для сушіння насінневого матеріалу [7], оскільки вони працюють при нижчих температурах та дозволяють максимально зберегти якість зерна. Стратегічно важливим є також перехід на відновлювані джерела енергії, зокрема, використання біомаси (соллома, тріска, лушпиння) для роботи теплогенераторів, що суттєво знижує залежність від природного газу та дизельного палива.

Вітчизняна практика переважно спирається на добре відпрацьовані схеми конвеєрного (проточного) та силосного сушіння з використанням газових і твердопаливних теплогенераторів. Проте останніми роками зростає інтерес до модернізації – впровадження складних систем керування з використанням штучного інтелекту, теплоутилізації, а також локальних проектів із застосуванням теплових насосів [8] і сонячних колекторів.

Комбінація різних досліджених схемних рішень з іншими підходами до підвищення енергетичної ефективності процесів сушіння зерна є класичним науковим та практичним пошуком. Так, технологічні особливості переробки зернових обумовлюють переважне використання проточних сушильних комплексів, що підтверджує його надійність та ефективність при обробці значних обсягів зернових масивів [9]. Теоретичні дослідження процесів тепло- та масообміну в

тонкому шарі зерна, що рухається, дозволили оптимізувати геометрію робочих органів та режимні параметри (температуру агенту сушіння, швидкість його подачі та тривалість витримки продукту в різних зонах сушарки). Науковий аналіз та практичний підхід забезпечив впровадження оптимальних зон рекуперації теплоти, розробки адаптивних систем автоматичного керування, що враховують нестационарність властивостей вхідної сировини, та мінімізації аеродинамічного опору шару. Незважаючи на доволі високу технологічну зрілість конструкцій, проточні сушарки (надалі СУ) залишаються об'єктом інтенсивних наукових досліджень, спрямованих на інтеграцію альтернативних джерел енергії та досягнення мінімальної питомої енергоємності процесу [10]. Зокрема в статті [10] описано підхід для оцінки енергетичної ефективності та визначення оптимальних режимів роботи проточної рециркуляційної теплонасосної сушарки зерна (ТНСУ).

Широко визнаною перспективною стратегією є застосування теплових насосів і їх поєднання з сонячною енергією (solar-assisted heat pump dryer) [11]. Схемні рішення теплонасосних сушарок зерна з використанням енергії сонця різноманітні та мають свою індивідуальну специфіку:

- сушарки з використанням акумульованої сонячної енергії як нижнього джерела теплоти ТН [12];
- сушарки з використанням електроенергії, що виробляється на сонячній електростанції [12];
- сушарки з використанням сонячної енергії як другої ступені нагрівання сушильного агенту (СА) [13];
- сушарки з комбінованим використанням акумульованої сонячної енергії – підігрівання СА та використання її як нижнього джерела теплоти для теплового насоса [14].

У світовій науковій практиці накопичено суттєвий об'єм оглядів і експериментальних робіт, що описують різні схемні рішення комбінованих систем з використанням сонячної енергії та теплових насосів [11-14]. Більша кількість статей спрямована на економічну сторону оцінки ефективності сушарок [15] без значного наукового ухилу в бік саме дослідження максимізації енергетичної ефективності.

Однак використання сонячної енергії в організованих технологічних процесах має ряд фізичних обмежень, особливо коли мова йде про теплову форму енергії. Ефективність роботи сонячних колекторів в схемах сушіння або акумуляції теплоти істотно залежить від географічного розташування, кліматичних умов і сезонної мінливості сонячної радіації. У регіонах із помірним кліматом, зокрема в Україні, середньорічний рівень сонячної інсоляції становить 1100–1450 кВт·год/м<sup>2</sup> [16], що забезпечує доцільність використання сонячних теплових систем переважно у період з квітня до жовтня. У цей час кут падіння сонячного випромінювання та температура навколишнього середовища сприяють підвищенню коефіцієнта корисної дії (ККД) колекторів до 45–65 % для плоских і до 70–80 % для вакуумних моделей [17]. Взимку ефективність знижується через зростання теплових втрат, низьку температуру теплоносія та скорочення тривалості світлового дня. Оптимальний нахил колекторів у межах 35–45° до горизонту забезпечує максимальне річне поглинання енергії, тоді як адаптивні (сезонно-регульовані) системи з відстеженням Сонця дозволяють підвищити ефективність на 15–20 % порівняно з фіксованими. Крім того, ефективність роботи сонячних колекторів суттєво залежить від погодних факторів – ступеня хмарності, запиленості повітря, вологості та швидкості вітру, які впливають на коефіцієнт прозорості атмосфери й теплові втрати випромінювання. Отже, використання теплових сонячних колекторів у процесах сушіння може бути лише додатковим джерелом теплоти, що може підвищити енергетичну ефективність процесу.

Періодичність роботи сонячних колекторів обумовлює потребу у великій кількості акумуляційних ємкостей [14], що також обумовлює потребу у визначені оптимальної частки енергії, яка може бути підведена в циклі та використана з максимальною ефективністю. Це особливо важливо при комбінації більше ніж двох джерел теплоти або складних схемних рішень [12].

Іншою стороною періодичності роботи сонячних колекторів є плинність та нестабільність температури гріючого агенту, що загалом обмежує якість та швидкість процесу сушіння загалом, оскільки технологічні параметри процесу сушіння [9] є визначальними параметрами процесу. Зокрема, при

низькотемпературному сушінні зміна параметрів температури СА на 5–10 °С може взагалі зупинити процес сушіння, що може призвести до псування зерна.

Комбінація вже дослідженої схеми теплонасосної сушарки зерна [8] з використанням додаткового калорифера, що використовує сонячну енергію, є одним з методів до підвищення енергетичної ефективності процесу сушіння. За основу комбінації двох методів альтернативних джерел енергії взяте технічне рішення, яке описане в статті [12]. У межах цих статей [11-14] розглянуті різні підходи та цілі досліджень, однак схемне рішення є базовим для подальших наукових пошуків.

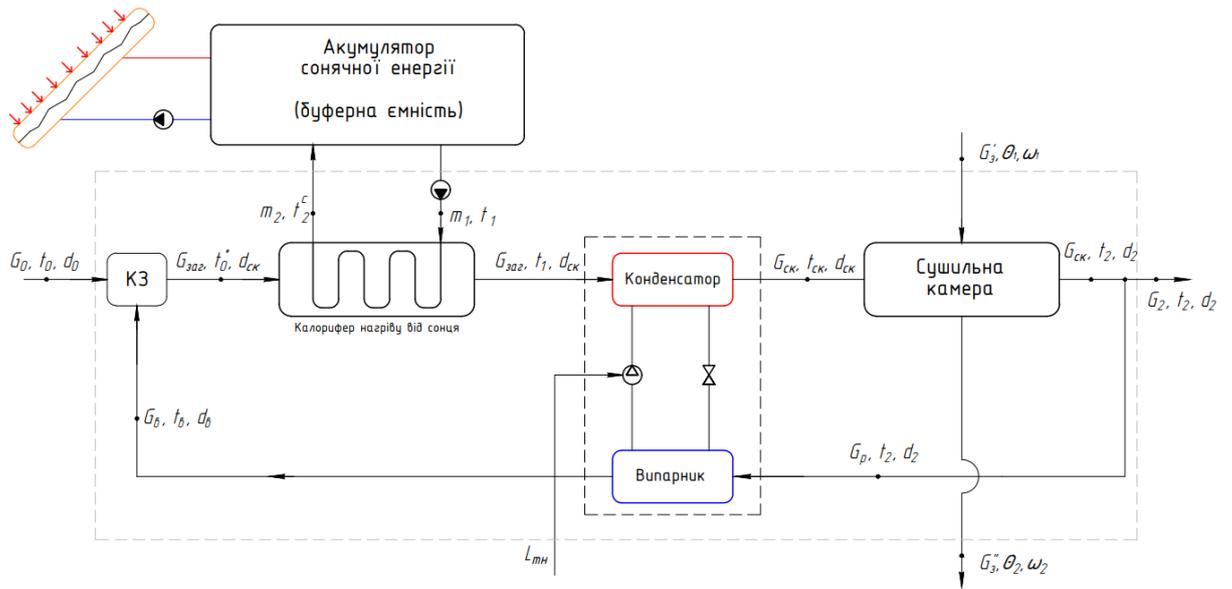
**Мета дослідження** полягає у визначенні оптимальних значень коефіцієнта використання сонячної енергії в циклі проточної теплонасосної сушарки та коефіцієнта використання зовнішньої енергії на видалення вологи з зерна.

**Матеріали та методи дослідження.** Методологія наукового дослідження полягає в формуванні системи балансових рівнянь для визначення коефіцієнта використання зовнішньої енергії в циклі ТНСУ як показника енергетичної ефективності сушарки. Основним завданням цієї роботи є оцінка впливу коефіцієнта використання сонячної енергії на технологічні параметри циклу, визначення критичних та оптимальних значень, формування практичних висновків та рекомендацій.

Об'єктом дослідження є теплонасосні сушарки проточного типу, що використовує два джерела теплоти: теплообмінник, який використовує сонячну енергію, та тепловий насос у лінії рециркуляції сушильного агенту.

#### **Результати досліджень та їх обговорення.**

Схема проточної теплонасосної сушарки зерна з калорифером використання сонячної енергії представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Схема проточної теплонасосної сушарки з частковою рециркуляцією сушильного агента (СА) та додаванням калорифера нагрівання СА за рахунок сонячної енергії**

Для дослідження енергоефективності прийнято коефіцієнт використання затраченої енергії на видалення вологи, який відображає, наскільки ефективно використовується підведена зовні енергія в технологічному циклі для забезпечення процесу сушіння зерна [8].

Загальний вигляд для коефіцієнта використання зовнішньої енергії до сонячної теплонасосної сушарки можна представити так:

$$\eta_{cy} = \frac{Q_{вип}}{L_{нiдв}}, \quad (1)$$

де  $Q_{вип}$  – тепловий потік, що витрачається безпосередньо на випаровування вологи, кВт;  $L_{нiдв}$  – сумарна зовнішня енергія, що включає енергію, підведену до СА від рекуператора (за рахунок використання енергії сонця) і енергію привода ТН. Звісно, що при цьому виникає проблема сумування різних видів енергії: теплової для рекуператора і електричної для привода ТН. Тому в формулі (1) додаткова тепла енергія, що використовується в схемі від рекуператора умовно приведена до електричної через ККД сонячної теплової електростанції.

Тепловий потік, який витрачається безпосередньо на випаровування вологи, визначається однаково для всіх типів сушарок і не залежить від їх конструктивних особливостей [8,10]

$$Q_{\text{вип}} = m_{\text{вол}} r(t_M) = G_{\text{заг}} \Delta d_{\text{СК}} r(t_M), \quad (2)$$

де  $m_{\text{вол}}$  – вихід вологи з зерна, кг<sub>вл</sub>/с;  $\Delta d_{\text{СК}}$  – приріст вологовмісту сушильного агента в сушильній камері (СК), кг<sub>вл</sub>/кг<sub>са</sub>;  $r(t_M)$  – питома теплота випаровування вологи при температурі мокрого термометра, кДж/кг<sub>вл</sub>.

Сумарну зовнішню енергію, що підведена до циклу сушарки, в еквіваленті до електричної енергії можна представити так:

$$L_{\text{підв}} = Q_c \eta_{\text{сес}} + L_{\text{тн}}, \quad (3)$$

де  $Q_c$  – теплова потужність, яка підводиться до циклу за рахунок акумульованої сонячної енергії, кВт;  $\eta_{\text{сес}}$  – ККД сонячної електростанції для приведення теплової енергії до ексергетично відповідної, що підводиться до привода теплового насоса, %;  $L_{\text{тн}}$  – потужність, що підводиться до привода теплового насоса, кВт.

Якщо величину сонячної енергії  $Q_c$  оцінити через долю від загальної енергії, що підводиться до СА в рекуператорі і конденсаторі ТН

$$C = \frac{Q_c}{Q_c + Q_{\text{тн}}^{\text{к}}}, \quad (4)$$

де  $C$  – доля сонячної енергії, то для величини  $Q_c$  отримуємо вираз:

$$Q_c = \frac{C}{1-C} Q_{\text{тн}}^{\text{к}}, \quad (5)$$

де  $Q_{\text{тн}}^{\text{к}} = L_{\text{тн}} \varepsilon_{\text{тн}}$  – теплова потужність, яка підводиться до сушильного агента у конденсаторі теплового насоса, кВт.

З урахуванням відомих співвідношень для  $Q_{\text{тн}}^{\text{к}}$  та  $L_{\text{тн}}$ ,

$$Q_{\text{тн}}^{\text{к}} = L_{\text{тн}} \varepsilon_{\text{тн}}, \quad (6)$$

$$L_{\text{тн}} = \frac{Q_{\text{тн}}^{\text{вип}}}{\varepsilon_{\text{тн}} - 1}, \quad (7)$$

а також рівнянь (4) і (5), вираз (3) приймає вигляд

$$L_{\text{підв}} = \frac{Q_{\text{тн}}^{\text{вип}}}{\varepsilon_{\text{тн}} - 1} \left( \frac{C}{1-C} \varepsilon_{\text{тн}} \eta_{\text{сес}} + 1 \right), \quad (8)$$

де  $Q_{\text{ТН}}^{\text{ВІП}}$  – теплове навантаження випарника теплового насоса, кВт;  $C$  – коефіцієнт використання сонячної енергії в циклі сонячної теплонасосної сушарки;  $\varepsilon_{\text{ТН}}$  – коефіцієнт трансформації теплоти теплового насоса;  $\eta_{\text{сес}}$  – ККД сонячної електростанції.

Теплове навантаження випарника теплового насоса, що встановлений на лінії рециркуляції СА, описується за відомим виразом [8]

$$Q_{\text{ТН}}^{\text{ВІП}} = G_{\text{рец}}(h_2 - h_b), \quad (9)$$

де  $h_2$  – ентальпія відпрацьованого сушильного агенту на вході до випарника теплового насоса, кДж/кг<sub>са</sub>;  $h_b$  – ентальпія цього ж сушильного агенту на виході з випарника теплового насоса, кДж/кг<sub>са</sub>.

Ентальпія сушильного агенту на виході з сушильної камери проточних СУ визначається з теплового балансу камери змішуванням (КС), а відповідний вираз для  $h_2$  отримано в роботі [10] і має вигляд

$$h_2 = h_{\text{ск}} - \frac{\Delta d_{\text{ск}}}{\Delta \omega} c_s (\theta_2 - \theta_1), \quad (10)$$

де  $h_{\text{ск}}$  – ентальпія сушильного агенту на вході в сушильну камеру, яка визначається регламентованими параметрами технологічного процесу сушіння, кДж/кг;  $\Delta \omega$  – зміна вологості зерна в процесі сушіння, в долях одиниці;  $\theta_1$  і  $\theta_2$  – температури зерна на вході та виході з сушильної камери відповідно, °С.

Ентальпію сушильного агенту на виході з випарника теплового насоса можна визначити з теплового балансу ТН:

$$h_g = h_2 - \frac{(h_{\text{мн}} - h_{\text{са}}^c)}{(1 + \frac{1}{\varepsilon_{\text{мн}} - 1})K}, \quad (11)$$

де  $h_{\text{мн}}$  – ентальпія сушильного агенту на виході з конденсатора теплового насоса, кДж/кг;  $h_{\text{са}}^c$  – ентальпія сушильного агенту на виході з калорифера нагрівання сушильного агенту за рахунок енергії сонця, кДж/кг;  $\varepsilon_{\text{мн}}$  – коефіцієнт трансформації теплового насоса;  $K$  – коефіцієнт рециркуляції сушильного агенту  $K = G_{\text{рец}} / G_{\text{заг}}$ , який можна визначити з теплового балансу сушарки. Підхід до визначення  $\varepsilon_{\text{мн}}$  широко описаний в працях [6,8,10] і не потребує уточнення в межах цієї роботи,

використовується базовий підхід до визначення температур  $t_g$  та  $t_{mn} = t_{ck}$ , описаний в попередніх напрацюваннях [8,10]. Так, температура  $t_g$  визначається з ітераційного процесу розрахунку параметрів процесу з визначенням відповідного значення коефіцієнта рециркуляції, а  $t_{mn} = t_{ck}$  є параметром, що визначається технологічними умовами процесу.

Коефіцієнт використання сонячної енергії в циклі сонячної теплонасосної сушарки, введений до розгляду раніше, являє собою частку від загальної теплової енергії, що підводиться до СА, і може бути розписаний як

$$C = \frac{Q^c}{Q^c + Q_{mn}^k} = \frac{G_{заг} (h_{CA}^c - h_0^*)}{G_{заг} (h_{mn} - h_0^*)} = \frac{(h_{CA}^c - h_0^*)}{(h_{mn} - h_0^*)}, \quad (12)$$

де  $h_{ck} = h_{mn}$  – ентальпія сушильного агента на вході в СК, кДж/кг;  $h_0^*$  – ентальпія сушильного агента після камери змішування, кДж/кг. При прийнятому значенні коефіцієнта  $C$  із формули (12) може бути визначена ентальпія СА після рекуператора  $h_{CA}^c$ .

З виразу (12) визначається ентальпія СА на вході в конденсатор теплового насоса, тобто після теплообмінника нагрівання за рахунок сонячної енергії:

$$h_{CA}^c = h_0^* + C(h_{mn} - h_0^*). \quad (13)$$

З теплового та масового балансів камери змішування схемного рішення на рис.1 можна отримати вирази, що є визначальними в чисельному аналізі. Так, вираз для вологовмісту на виході з випарника теплового насоса визначається як

$$d_g = \frac{d_{ck} - (1 - K)d_0}{K}, \quad (14)$$

де значення вологовмісту  $d_{ck} = d_{тн}$  є заданим за технологічною картою процесу сушіння,  $d_0$  – функція від параметрів оточуючого середовища.

Ентальпія сушильного агента після камери змішування визначається з її теплового балансу:

$$h_0^* = Kh_g + (1 - K)h_0. \quad (15)$$

У виразах (11), (14) та (15) присутній коефіцієнт рециркуляції, який являє собою відношення  $K = G_{pec} / G_{заг}$  і може бути визначений із теплового балансу

сушарки. Згідно з технологічною схемою проточної сушарки на рис. 1 та раніше описаних виразів маємо

$$K = \frac{(h_2 - h_0) + \frac{\Delta d_{ск} c_3 (\theta_2 - \theta_1) - (h_{CA}^c - h_0^*)}{\Delta \omega}}{(h_2 - h_0) + \frac{(h_2 - h_g)}{(\varepsilon - 1)}}. \quad (16)$$

У наведених рівняннях алгоритму для визначення параметрів сушильного агенту в вузлових точках схеми СУ і коефіцієнта рециркуляції фігурує зміна вологовмісту  $\Delta d_{ск}$  сушильного агенту в межах СК. Ця зміна вологовмісту визначає кінцеву в реальному (неізоентальпійному) процесі сушіння температуру СА на виході з СК, яка пов'язана з параметрами сушильного агенту на виході з СК і має бути визначена в додатковому ітераційному процесі із системи рівнянь, що вже описано в роботі [10] щодо оцінки енергетичної ефективності проточних теплонасосних сушарок.

З урахуванням наведених виразів (9)-(16) та з урахуванням напрацювань [8] можна визначити всі параметри системи і перейти до визначення коефіцієнта використання зовнішньої енергії на видалення вологи з зерна, що характеризує енергетичну ефективність сушарок досліджуваного типу. При цьому з рівнянь (1) – (8) маємо

$$\eta_{cy} = \frac{r(t_m) \Delta d_{ск}}{\left(\frac{C}{1-C} \varepsilon_{mn} \eta_{сес} + 1\right) \cdot K (h_2 - h_g)} (\varepsilon_{mn} - 1). \quad (17)$$

Із рівняння (17) можна зробити висновок, що коефіцієнт використання зовнішньої енергії сушарки повністю визначається технологічними параметрами процесу сушіння, заданим значенням коефіцієнта використання сонячної енергії, робочими характеристиками ТН і не залежить від продуктивності та величини завантаження сушарки.

У межах визначення впливу використання сонячної енергії в циклі сонячної теплонасосної сушарки проточного типу виконано чисельні розрахунки за описаним алгоритмом, що засновано на методі балансових рівнянь. Технологічні параметри сушильного агенту в сушильній камері регламентуються вимогами сушіння до певного виду зерна та його призначення: вологість та температура сушильного

агенту, зміна вологості зерна в процесі сушіння, приріст відносної вологості СА в СК.

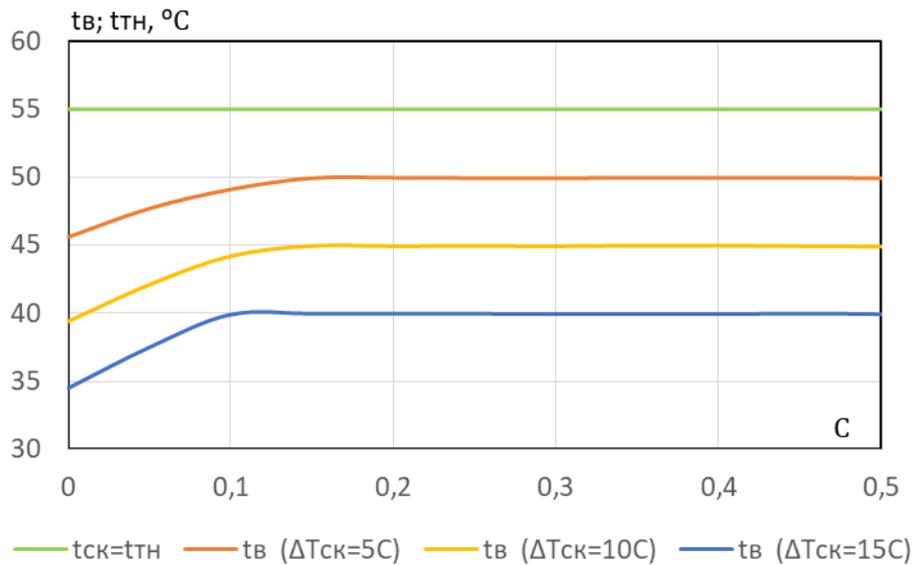
У межах наукової роботи та систематизації результатів прийняті однакові вихідні параметри для чисельного розрахунку за запропонованим алгоритмом при технологічних параметрах, що характерні для процесу сушіння насінневого зерна, описаному в статті [8]:

- температура сушильного агента на вході в сушильну камеру  $t_{ск} = 45 - 65 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- відносна вологість СА на вході в сушильну камеру  $\varphi_{ск} = 10 - 40 \text{ \%}$ ;
- перепад температури СА між входом і виходом з сушильної камери  $\Delta t_{ск} = 5 - 15 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- зміна/зниження вологості зерна в процесі сушіння за прохід через СК  $\Delta \omega = 6 - 12 \text{ \%}$ ;
- параметри оточуючого середовища:  $t_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  та  $\varphi_0 = 70\%$ ;
- процес сушіння стаціонарний.

Коефіцієнт використання сонячної енергії в цьому дослідженні приймається як задана величина з метою пошуку оптимального його значення, що забезпечує максимальну енергетичну ефективність даної схеми сушарки. Цілком очевидно, що збільшення цього коефіцієнта в деяких межах призводить до витіснення ТН з теплової обробки СА, а це приводить до зменшення багаторазового використання в сушильному циклі теплоти випаровування вологи, що забезпечується роботою саме теплового насоса. Тому числове дослідження проведено при зміні коефіцієнта С в діапазоні 0...0,5.

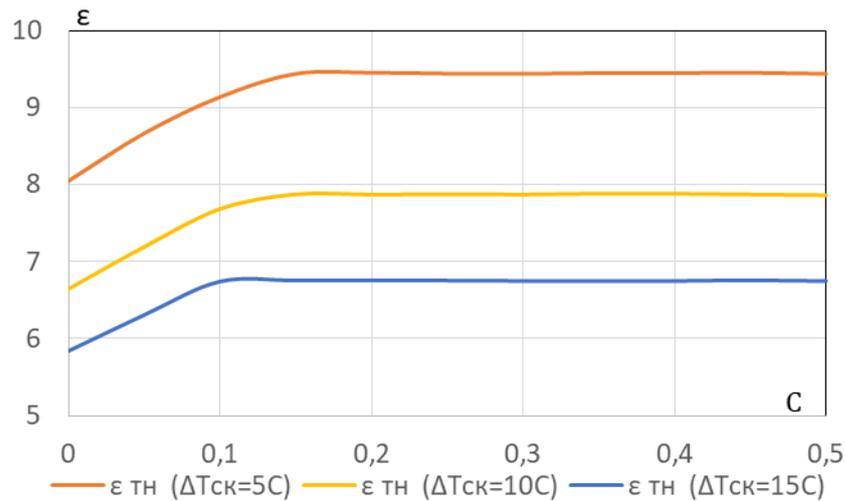
У виразі (17) присутній ККД сонячної теплової електростанції для приведення теплової енергії нагрівання сушильного агента до відповідної електричної енергії, яка використовується як рушійна сила привода теплового насоса. Ефективність сонячної теплової електростанції коливається в діапазоні від 16 до 40 % [18, 19]. У виконаних чисельних розрахунках прийнято ККД 35 % [18], що орієнтовно відповідає ККД теплових електростанцій.

Для теплонасосної установки одним з основних показників, який впливає на ефективність системи загалом відповідно до виразу (17), є коефіцієнт трансформації теплового насоса, для якого значення температур  $t_e$  та  $t_{mn} = t_{ck}$  є визначальним. Відповідні результати обчислень наведено на рис. 2 у вигляді залежності температурного режиму теплового насоса відносно коефіцієнта використання сонячної енергії в циклі сушарки.



**Рис. 2. Температурний режим роботи теплового насоса сонячної теплонасосної сушарки в залежності від коефіцієнта використання сонячної енергії при  $\Delta\omega=9\%$  та температурі СА  $55^\circ C$  для різних перепадів температур СА в сушильній камер**

Із графіків (рис. 2) видно, що різниця температур СА між конденсатором і випарником ТН в певних межах зміни коефіцієнта  $C$  зменшується, що покращує умови роботи ТН. Наслідком цього є деяке збільшення коефіцієнта трансформації ТН, що ілюструє графік на рис. 3.



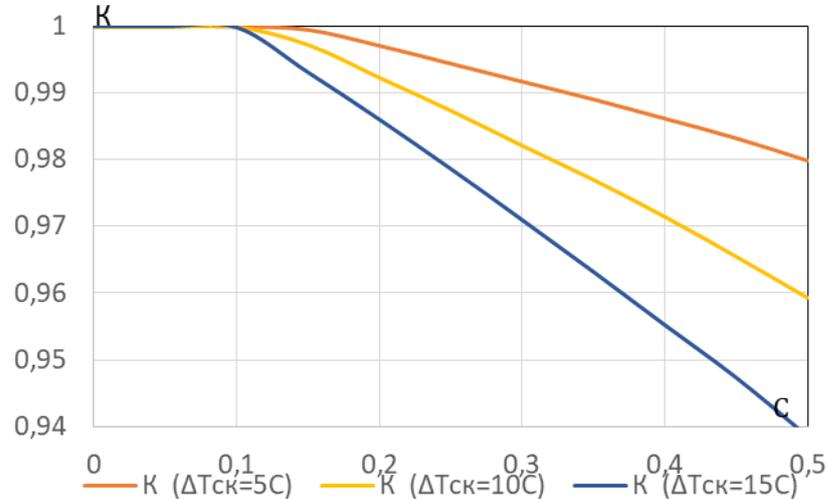
**Рис. 3. Коефіцієнт трансформації ТНСУ в залежності від коефіцієнта використання сонячної енергії в циклі сушарки при  $\Delta\omega=9\%$  та температурі СА  $55\text{ }^\circ\text{C}$  для різних перепадів температур СА в СК СУ**

Іншим визначальним параметром, що характеризує ефективність роботи сушарок рециркуляційного типу є коефіцієнт рециркуляції сушильного агента. Цей коефіцієнт загалом визначає режим роботи системи [8, 10]. Так, чим більше коефіцієнт рециркуляції, тим менша частка відпрацьованого СА скидається в атмосферу і тим менше втрати теплоти. З виразів (9) – (16) можна зазначити, що коефіцієнт рециркуляції впливає на систему загалом за рахунок:

- залежності від необхідної вологості СА на вході в СК;
- впливу на роботу теплового насоса за рахунок вологості СА на виході з випарника теплового насоса;
- теплоті, що вноситься в цикл за рахунок підігрівання СА в калорифері, що працює за рахунок акумульованої сонячної енергії;
- кількості теплоти, що витрачається на підігрівання зерна.

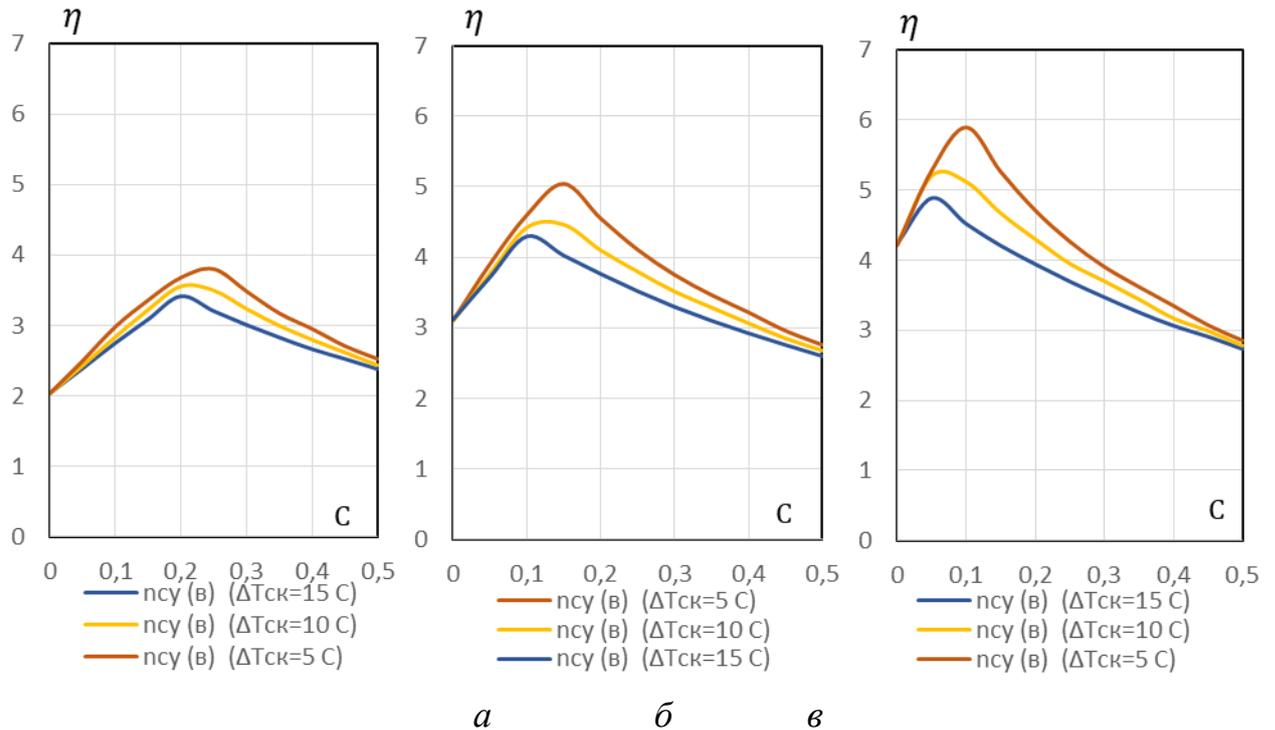
На рис. 4 представлено результат розрахунку для коефіцієнта рециркуляції в залежності від коефіцієнта використання сонячної енергії та незмінних інших параметрах:  $\varphi$ ,  $t_{ск}$  і  $\Delta\omega$ . Із графіка видно, що при невеликих значеннях коефіцієнта  $C$  установка працює з повною рециркуляцією ( $K=1$ ), а при подальшому збільшенні коефіцієнта  $C$  коефіцієнт рециркуляції зменшується. Це свідчить про те, що при невеликих значеннях коефіцієнта  $C$  надлишкова енергія, яка підводиться в

сушильний цикл (сонячна + енергія привода ТН) повністю виводиться з циклу з теплою нагріву зерна. При більших значеннях  $C$  надлишкова енергія має виводитись з сушильного циклу в атмосферу тільки з відпрацьованим СА, що приводить до зменшення коефіцієнта рециркуляції.



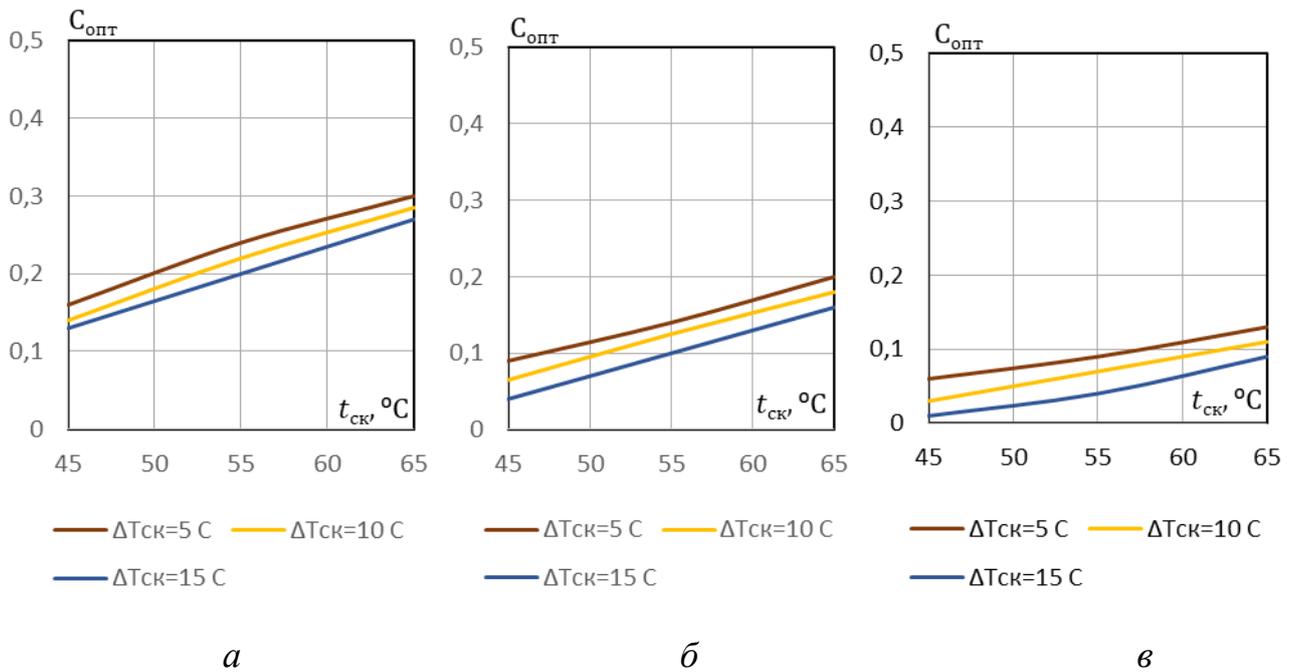
**Рис. 4. Коефіцієнт рециркуляції ТНСУ в залежності від коефіцієнта використання сонячної енергії в циклі сушарки при  $\Delta\omega=9\%$  та температурі СА  $55^\circ\text{C}$  для різних перепадів температур СА в СК СУ**

Проведений розрахунковий аналіз параметрів СА в сушильному циклі дозволяє визначити за рівнянням (17) коефіцієнт використання зовнішньої енергії на випаровування вологи, що характеризує енергетичну ефективність сонячних теплонасосних сушарок зерна проточного типу і установити залежність цієї характеристики від коефіцієнта використання сонячної енергії при незмінних інших параметрах:  $\varphi$ ,  $t_{СК}$  і  $\Delta\omega$ . Як видно з графіку (рис. 5), коефіцієнт використання теплоти демонструє зростання енергетичної ефективності до певного оптимального значення  $C_{opt}$ , після якого є низпадаючий тренд кривої. Цьому оптимальному значенню коефіцієнта використання сонячної енергії відповідають максимальні значення енергетичної ефективності сушарки. Подальше збільшення коефіцієнта  $C$  збільшує надлишкову енергію в сушильному циклі, що потребує збільшення викиду сушильного агенту в атмосферу і, таким чином, приводить до збільшення енергетичних втрат.



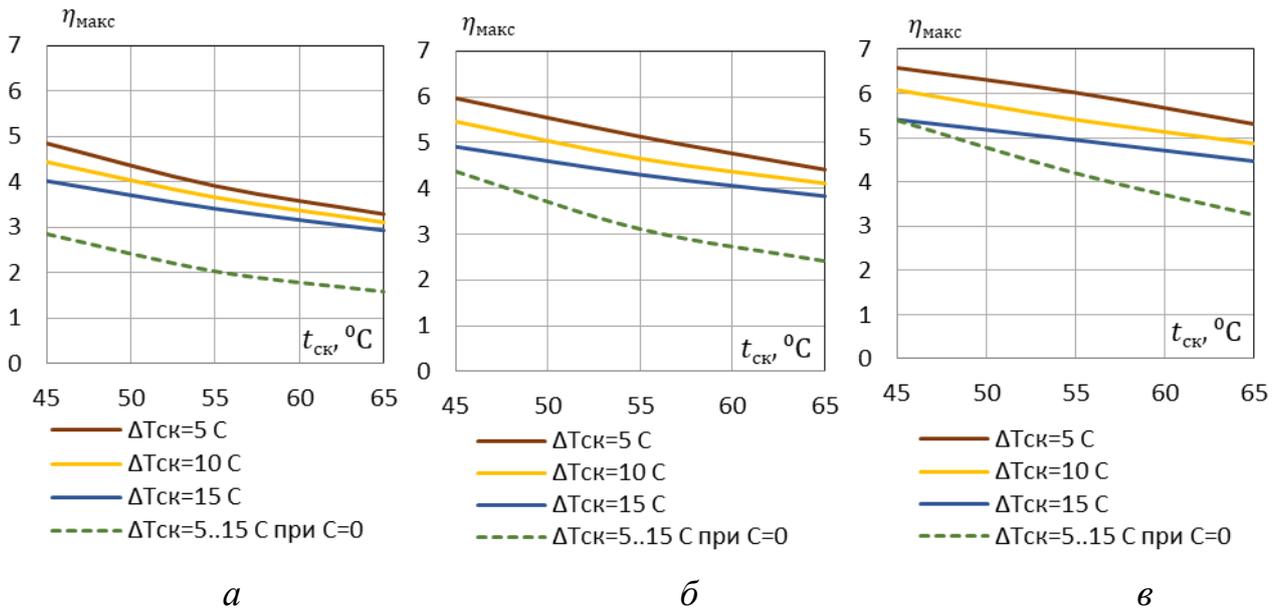
**Рис. 5. Коефіцієнт використання енергії для сонячної ТНСУ в залежності від коефіцієнта використання сонячної енергії при температурі СА 55 °С та різних значень температур СА в сушильній камері та  $\Delta\omega$ :  
а – 6%; б – 9%; в – 12%**

Графіки на рис. 2-5 наведені для технологічних параметрів процесу сушіння насіннєвого зерна при  $\Delta\omega=9\%$ , температурі СА 55 °С, відносній вологості СА  $\varphi=30\%$ . Аналогічні розрахунки були проведені для процесів сушіння для різних значень  $\Delta\omega=6, 9, 12\%$  та температурі СА 45, 55, 65 °С. Результати цих розрахунків для оптимального коефіцієнта використання сонячної енергії  $C_{opt}$  наведено на рис. 6. Цей графік побудовано в залежності від основного режимного параметру процесу сушіння – температури СА на вході в СК.



**Рис. 6. Графіки залежності оптимального коефіцієнта використання сонячної енергії в циклі сонячної ТНСУ в залежності від температури СА при різному температурному перепаді СА в СК сушарки для різних значень  $\Delta\omega$ :  
 а –  $\Delta\omega=6\%$ ; б –  $\Delta\omega=9\%$ ; в –  $\Delta\omega=12\%$**

Графіки (рис. 6) демонструють значення оптимального коефіцієнта використання сонячної енергії  $C_{\text{опт}}$  та його залежність від режимних параметрів процесу сушіння, що може слугувати основою для вибору потужності сонячного джерела енергії для максимізації енергетичної ефективності сушарки зерна. При цьому можна говорити про більш ефективне використання сонячної енергії при більш високих температурних режимах та низьких значеннях зняття вологості зерна за один прохід, що якраз відповідає класичним режимам роботи проточних сушарок. Кожному значенню  $C_{\text{опт}}$  відповідає максимальне значення коефіцієнта використання зовнішньої енергії на видалення вологості зерна (рис. 7).



**Рис. 7. Графіки залежності (суцільні лінії) максимального коефіцієнта використання зовнішньої енергії на видалення вологи з зерна для проточної сонячної ТНСУ в залежності від температури СА при різному температурному перепаді СА в СК сушарки для різних значень  $\Delta\omega$ :  
 а –  $\Delta\omega=6 \%$ ; б –  $\Delta\omega=9\%$ ; в –  $\Delta\omega=12 \%$ . Пунктирні лінії – значення коефіцієнта використання енергії для ТНСУ без використання сонячної енергії**

Результати розрахунків щодо максимальних значень коефіцієнта використання зовнішньої енергії на видалення вологи з зерна, що відповідають оптимальним коефіцієнтам використання сонячної енергії  $C_{\text{опт}}$ , наведені на рис. 7. Для співставлення штриховими лініями показані відповідні залежності коефіцієнтів  $\eta$  для базових ТНСУ без використання енергії сонця. З графіків (рис. 7) можна констатувати, що максимальні значення коефіцієнта використання зовнішньої енергії на видалення вологи з зерна для сонячних ТНСУ на 30-70 % вище, ніж для схемних рішень без використання сонячної енергії (відповідає  $C=0$ ). Видно також, що вигреш в енергетичній ефективності за рахунок використання енергії сонця зростає зі зменшенням перепаду температури в СК і з підвищенням температури сушіння.

**Висновки і перспективи.** Використання сонячної енергії як додаткового джерела теплоти в конвективних теплонасосних сушарках проточного типу для сушіння зерна є ефективним засобом підвищення їх енергетичної ефективності. У

практичній реалізації таких установок слід врахувати результати вище описаних результатів:

1. Сонячна енергія, що підводиться в циклі, не замінює тепловий насос, а може лише слугувати як додаткове джерело енергії, що позитивно впливає на загальну енергетичну ефективність.

2. Кожному режиму роботи відповідає оптимальний коефіцієнт використання сонячної енергії  $C_{opt}$ , який гарантує максимальну енергетичну ефективність цієї схеми сушарки.

3. Коефіцієнт рециркуляції для проточних установок близький до 1, але зменшується при зростанні коефіцієнта використання сонячної енергії, що обумовлено обмеженням технологічних параметрів процесу сушіння.

4. Максимальне значення енергетичної ефективності сонячних ТНСУ, що відповідає  $C_{opt}$  відповідно проведеного чисельного аналізу на 20-70 % вище, ніж для звичайних проточних теплонасосних сушарок. При цьому можна говорити про більш ефективне використання сонячної енергії при більш високих температурах сушіння та низьких значеннях зняття вологості зерна за один прохід.

5. Використання сонячної енергії в циклі сонячних ТНСУ має відповідати значенням, близьким до  $C_{opt}$ , оскільки при збільшенні  $C$  зменшується енергетична ефективність сушарки за рахунок значного зниження значень коефіцієнту рециркуляції та теплонасосної складової представленого схемного рішення.

#### Список використаних джерел

1. Kabiru Ayobami Jimoh, Norhashila Hashim, Rosnah Shamsudin, Hasfalina Che Man, Mahirah Jahari, Daniel I. Onwude. (2023) Recent Advances in the Drying Process of Grains. *Food Engineering Reviews*, Vol. 2023. Article 15:548–576. DOI: doi.org/10.1007/s12393-023-09333-7.

2. Jiyou An, Huanxiong Xie, Jianchun Yan, Hai Wei, Yanghua Wu, Xuan Liao. (2024) A review of applications of energy analysis. Grain, fruit and vegetable drying technology. *Energy Reports*, Vol. 12, December. Pages 5482-5506. DOI: doi.org/10.1016/j.egyr.2024.11.037.

3. Abaubakry M'Baye (2022) A case study of heat recovery: a heat pump in an industrial site. *Journal of Renewable Energy and Sustainable Development (RES D)*, Volume 8, Issue 1, June 2022. Pages 20-29. DOI: dx.doi.org/10.21622/RES D.2022.08.1.020.

4. Azmirul Hoque, Suranjit Roy, Mrutyunjay Padhiary, Gajendra Prasad, Bhagaban Swain, Pranjal Saikia, Debarpan Saha (2025) Integrating remote sensing and AI in smart greenhouse solar dryers: Enhancing efficiency, traceability, and sustainability in the drying of fruits and spices. *Journal of Agriculture and Food Research*, Vol. 23 (2025) 102310. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102310>.
5. Снежкін Ю.Ф., Пазюк В. М., Петрова Ж. О., Чалаєв Д. М. Теплонасосна зерносушарка для насінневого зерна. Київ : ТОВ Поліграф-Сервіс, 2012. 154 с.
6. Безродний М.К., Кутра Д.С., Вовк В.В. Термодинамічний аналіз теплонасосних сушильних установок для сушіння зерна. 2012. Випуск 4. Дніпропетровськ: Нова ідеологія. С. 27-40. Режим доступу: [https://nmetau.edu.ua/file/ttpt\\_2012\\_full.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/ttpt_2012_full.pdf)
7. Пазюк В. М., Петрова Ж.О., Дуб В.В. (2018) Сучасний стан проблеми підвищення енергоефективності процесу сушіння насіння зернових культур. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі.* - Вип. 1. - С. 231-243. Доступ: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt\\_2018\\_1\\_21](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2018_1_21).
8. Безродний М.К., Притула Н.О., Вовк В.В. (2025) Теплонасосні установки сушіння зерна. Базові методи підвищення ефективності процесів сушіння зернових. *Енерготехнології та ресурсозбереження.* - №2 – С.42-54. DOI: 10.33070/etars.2.2025.04.
9. Станкевич Г. М., Страхова Т.В., Борта А.В. Сушіння зерна: Підручник. Видання друге. Перероблене і доповнене - *Одеса, КП ОМД*, 2021 – 248 с.
10. Безродний М.К., Вовк В.В. Енергетична ефективність проточних теплонасосних сушарок зерна. *Енергетика і автоматика.* 2025. №3. С.125-142. DOI: 10.31548/energiya3(79).2025.125.
11. Muhammad Yahya, Hendriwan Fahmi, Rosdanelli Hasibuan, Ahmad Fudholi (2023) Development of hybrid solar-assisted heat pump dryer for drying paddy. *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 45 (2023) 102936. DOI: [doi.org/10.1016/j.csite.2023.102936](https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102936).
12. Lingeng Zou, Ye Liu, Mengqi Yu, Jianlin Yu (2023) A review of solar assisted heat pump technology for drying applications. *Energy*, 283 (2023) 129215. DOI: [doi.org/10.1016/j.energy.2023.129215](https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129215).
13. N. Sai Prasanna, B. Manjula (2018) Review on drying of agricultural produce using solar assisted heat pump drying. *International Journal of Agricultural Engineering*, Volume 11, Issue 2. Pages 409-420. DOI: 10.15740/HAS/IJAE/11.2/409-420.
14. Zude Zhang, Ming Li, Yunfeng Wang, Guoliang Li, Tianyu Xing, Muchi Yao, Reda Hassanien Emam Hassanien (2024) Study on the performance of heat pump drying system under the synergistic effect of humidity enthalpy enhancement and solar heat storage under low temperature working conditions. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 244 (2024) 122626. DOI: [doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122626](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122626).
15. Tomi Thomasson, Jyrki Raitila, Eemeli Tsupari (2024) Experimental and techno-economic analysis of solar-assisted heat pump drying of biomass. *Energy Reports*, Vol. 11 (2024) Pages: 316–326. DOI: [doi.org/10.1016/j.egyr.2023.11.062](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.11.062).

16. Rybchenko L.S., Savchuk S.V. (2023) Components of the radiation regime of solar radiation during droughts for 1991-2020 in Ukraine. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 2023. № 2 (68). DOI: doi.org/10.17721/2306-5680.2023.2.7.
17. Sorabh A., Raj K., Daeho Lee, Sushil K., Tej S. (2023) A comprehensive review of techniques for increasing the efficiency of evacuated tube solar collectors. *Heliyon*, Vol. 9, Issue 4. DOI: doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15185.
18. Ho, C. K. and Iverson, B. D. (2014) Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp. 835-846. DOI: doi:10.1016/j.ser.2013.08.099.
19. Mario Cascetta, Fabio Licheri, Rosa P. Merchan, Mario Petrollese (2023) Operating performance of a Joule-Brayton pumped thermal energy storage system integrated with a concentrated solar power plant. *Journal of Energy Storage*, Vol. 73. DOI: doi.org/10.1016/j.est.2023.108865.

### References

1. Jimoh, K. A., Hashim, N., Shamsudin, R., Che Man, H., Jahari, M., Onwude, D. I. (2023). Recent advances in the drying process of grains. *Food Engineering Reviews*, 15, 548–576. <https://doi.org/10.1007/s12393-023-09333-7>
2. An, J., Xie, H., Yan, J., Wei, H., Wu, Y., Liao, X. (2024). A review of applications of energy analysis: Grain, fruit and vegetable drying technology. *Energy Reports*, 12, 5482–5506. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.11.037>
3. M'Baye, A. (2022). A case study of heat recovery: A heat pump in an industrial site. *Journal of Renewable Energy and Sustainable Development (RES D)*, 8(1), 20–29. <https://dx.doi.org/10.21622/RES D.2022.08.1.020>
4. Hoque, A., Roy, S., Padhiary, M., Prasad, G., Swain, B., Saikia, P., Saha, D. (2025). Integrating remote sensing and AI in smart greenhouse solar dryers: Enhancing efficiency, traceability, and sustainability in the drying of fruits and spices. *Journal of Agriculture and Food Research*, 23, 102310. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102310>
5. Snezhkin Yu. F., Paziuk V. M., Petrova Zh. O., Chalayev D. M. (2012). *Heat Pump Grain Dryer for Seed Grain*. – Kyiv: TOV Polygraph-Service, 154. (In Ukrainian)
6. Bezrodnyi M. K., Kutra D. S., Vovk V. V. (2012) Thermodynamic analysis of heat pump drying units for grain drying. *Technical Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering: Collection of Scientific Papers*. Dnipropetrovsk: Nova Ideolohiya, 4, 27–40. Access: [https://nmetau.edu.ua/file/ttpt\\_2012\\_full.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/ttpt_2012_full.pdf) (In Ukrainian)
7. Paziuk V. M., Petrova Zh. O., Dub V. V. (2018) Current state of the problem of improving the energy efficiency of the grain seed drying process. *Progressive Equipment and Technologies of Food Production, Restaurant Industry and Trade* 1, 231–243. Access: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt\\_2018\\_1\\_21](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pt_2018_1_21) (In Ukrainian)
8. Bezrodnyi, M. K., Prytula, N. O., Vovk, V. V. (2025). Heat pump grain drying units. Basic methods for improving the efficiency of grain drying processes. *Energy Technologies & Resource, Saving* 2, 42–54. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.04> (In Ukrainian)
9. Stankevych H. M., Strakhova T. V., Borta A. V. (2021). *Grain Drying: Textbook*. Second edition, revised and expanded. Odesa, KP OMD, 248. (In Ukrainian)

10. Bezrodnyi, M. K., Vovk, V. V. (2025). Energy efficiency of through-flow heat pump grain dryers. *Energy and Automation*, 3(79), 125–142. [https://doi.org/10.31548/energiya3\(79\).2025.125](https://doi.org/10.31548/energiya3(79).2025.125) (In Ukrainian)
11. Yahya, M., Fahmi, H., Hasibuan, R., Fudholi, A. (2023). Development of hybrid solar-assisted heat pump dryer for drying paddy. *Case Studies in Thermal Engineering*, 45, 102936. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2023.102936>
12. Zou, L., Liu, Y., Yu, M., Yu, J. (2023). A review of solar assisted heat pump technology for drying applications. *Energy*, 283, 129215. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.129215>
13. Prasanna, N. S., Manjula, B. (2018). Review on drying of agricultural produce using solar assisted heat pump drying. *International Journal of Agricultural Engineering*, 11(2), 409–420. <https://doi.org/10.15740/HAS/IJAE/11.2/409-420>
14. Zhang, Z., Li, M., Wang, Y., Li, G., Xing, T., Yao, M., Hassanien, R. H. E. (2024). Study on the performance of heat pump drying system under the synergistic effect of humidity enthalpy enhancement and solar heat storage under low temperature working conditions. *Applied Thermal Engineering*, 244, 122626. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122626>
15. Thomasson, T., Raitila, J., Tsupari, E. (2024). Experimental and techno-economic analysis of solar-assisted heat pump drying of biomass. *Energy Reports*, 11, 316–326. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.11.062>
16. Rybchenko, L. S., Savchuk, S. V. (2023). Components of the radiation regime of solar radiation during droughts for 1991-2020 in Ukraine. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*, 2(68). <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2023.2.7>
17. Sorabh, A., Raj, K., Lee, D., Sushil, K., Tej, S. (2023). A comprehensive review of techniques for increasing the efficiency of evacuated tube solar collectors. *Heliyon*, 9(4), e15185. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15185>
18. Ho, C. K., Iverson, B. D. (2014). Review of high-temperature central receiver designs for concentrating solar power. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 835–846. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.099>
19. Cascetta, M., Licheri, F., Merchan, R. P., Petrollese, M. (2023). Operating performance of a Joule-Brayton pumped thermal energy storage system integrated with a concentrated solar power plant. *Journal of Energy Storage*, 73. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108865>

## **IMPACT OF SOLAR ENERGY APPLICATION ON IMPROVING THE ENERGY PERFORMANCE OF CONTINUOUS-FLOW HEAT PUMP GRAIN DRYERS**

***M. Bezrodny, V. Vovk***

**Abstract.** Grain drying is an essential stage of post-harvest processing. Utilizing renewable energy sources, particularly heat pumps combined with solar energy, is one of the methods for improving the process's energy efficiency. Brief information is provided on the use of heat pumps in combination with various approaches to solar energy utilization. A detailed schematic diagram of a continuous-flow grain dryer is considered, which involves the sequential use of two drying agent heating systems: a solar air heater

*and a heat pump. Within the scope of this article, an analytical model for determining the energy efficiency of this schematic solution is presented along with the calculation results. Recommendations are provided for the optimal use of the heat pump in combination with the solar heater in continuous-flow dryers with drying agent recirculation. The research findings will be useful for further scientific research and for developers of modern grain drying systems.*

**Key words:** *grain dryer, energy efficiency, recirculation, heat pump, solar collectors, solar heat pump, solar energy, recuperation, flow dryers, grain moisture*