



УДК 664.723.047

DOI: 10.37128/2520-6168-2024-1-4

ТЕПЛОВІ НАСОСИ ЯК ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИЙ ЗАСІБ СУШІННЯ ЗЕРНА

ПАЗЮК Вадим Михайлович, д.т.н., доцент, провідний науковий співробітник
Інститут технічної теплофізики НАН України
ТОКАРЧУК Олексій Анатолійович, к.т.н., доцент
ШАПОВАЛЮК Сергій Олександрович, аспірант
Вінницький національний аграрний університет

Vadym PAZIUK, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Research Fellow
Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine
Oleksii TOKARCHUK, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Serhii SHAPOVALIUK, Postgraduate Student
Vinnytsia National Agrarian University

Великі енергетичні витрати на процес сушіння зернових культур пов'язаний із здороженням енергоносіїв ставить перед розробниками завдання із зменшення енергетичної складової. В представленій статті приділяється увага направлена на розробку заходів із зменшення енергетичних витрат на процес сушіння зерна із використання теплових насосів.

Розглянуті переваги теплових насосів вказують на можливість використання цих установок при сушінні зернових культур. Особливо заслуговує на увагу збільшення енергоефективності теплових насосів за рахунок перетворення теплоти навколишнього середовища з низьким температурним потенціалом в теплоту з високим температурним потенціалом. Таким чином, теплові насоси характеризуються коефіцієнтом перетворення теплового насосу, що вказує на їх ефективність.

Представлені схеми із тепловим насосом реалізують процес сушіння в конвективних сушарках, зокрема в камерній, тунельній, шахтній та барабанній сушарці. Різні схеми теплових насосів можуть бути застосовані для різних видів сушарок. Використання альтернативних джерел сушіння для сушіння зерна, зокрема сонячної енергії в системі теплового насосу різко підвищує ефективність даної установки.

Також представлена комплексна схема утилізації відпрацьованого теплоносія в теплообмінниках, економайзері та тепловому насосі, що комплексно підходить до питання утилізації теплоносія в камерній сушарці. В барабанній сушарці передбачено утилізація відпрацьованого теплоносія в теплообмінниках та тепловому насосі, підвищуючи температуру сушильного агента на вхід в сушарку. Для сушіння рослинної сировини в двозонній тунельній сушарці розроблена схема теплового насосу з двома температурними рівнями теплоносія, для сушіння матеріалу при різних температурах в зонах сушарки.

Ключові слова: енергоефективність, тепловий насос, сушіння, сушарка, процес, зерно.

Ф. 1. Таб. 1. Рис. 6. Літ. 10.

1. Постановка проблеми

Економічна доцільність використання теплонасосних установок (ТНУ) підтверджена світовим досвідом. Вже сьогодні у розвинутих країнах ТНУ широко використовуються в системах опалення (теплі підлоги та радіатори) та кондиціонування, налагоджено промисловий випуск ТНУ у досить широких виробничих масштабах (США – 1 млн ТНУ щороку, у Японії – 3 млн) [1].

Серед переваг ТНУ є:

- використання теплової енергії довкілля (води, ґрунту, повітря) і переведення енергії низькопотенційних джерел у придатну для використання енергію;
- в процесі роботи не викидають шкідливих викидів;
- ефективно працюють при низьких температурах навколишнього середовища;
- можна використовувати як для нагрівання, так і для охолодження, або сумісної одночасної дії системи нагрівання та охолодження;
- низькі сервісні витрати і тривалий термін служби.

Переваги теплових насосів дають можливість створення сучасних зерносушильних комплексів із тепловими насосами, що дає відчутний економічний ефект.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Основним узагальнюючим критерієм ефективності ТНУ є коефіцієнт використання первинної енергії палива. Він визначається як відношення корисної теплоти до теплотворної здатності витраченого палива [1] (табл. 1).

Таблиця 1

Коефіцієнт використання первинної енергії палива

Вид палива	Коефіцієнт використання
Електропідігрівання	0,27 – 0,35
Спалювання палива в теплогенераторі	0,75 – 0,95
Парокомпресійний тепловий насос з електроприводом	0,6 – 1,35
Парокомпресійний тепловий насос з тепловим двигуном	1,37 – 2,3

Співставлення альтернативних варіантів нагріву теплоносія за ступенем використання первинної енергії показує, що найменш енергоефективним є прямий електричний нагрів ($K_{EL} = 0,27 - 0,35$), тому що на тепловій електростанції при виробленні електричної енергії на транспортування мережами втрачається в середньому 70% первинної енергії.

Нагрів теплоносія в теплогенераторі шляхом прямого спалювання палива в котельні призводить до втрат в середньому біля 15% первинної енергії. Значне коливання коефіцієнту первинної енергії залежить від конструкції теплогенератора і виду палива.

Для парокомпресійних теплових насосів з електроприводом коефіцієнт використання первинної енергії (K_{TH}) дорівнює добутку коефіцієнта перетворення теплового насосу μ і коефіцієнта використання первинної енергії при виробленні електроенергії (K_{EL}):

$$K_{TH} = \mu \cdot K_{EL} \quad (1)$$

Коефіцієнт перетворення теплового насосу μ залежить від різниці необхідної температури теплоносія і температури холодного джерела, термодинамічних властивостей робочої речовини і особливостей термодинамічного циклу та технічної досконалості конструкції.

Літературні дослідження із сушіння зернових культур передбачають розроблення нових схем та установок із парокомпресійним тепловим насосом. Різні автори згідно до досліджень пропонують різні схеми сушіння зерна в різних установках із тепловим насосом.

Представлені варіанти схем на I-x діаграмах дають можливість оцінити необхідність застосування теплових насосів при сушінні насінневого зерна (рис. 1) [2].

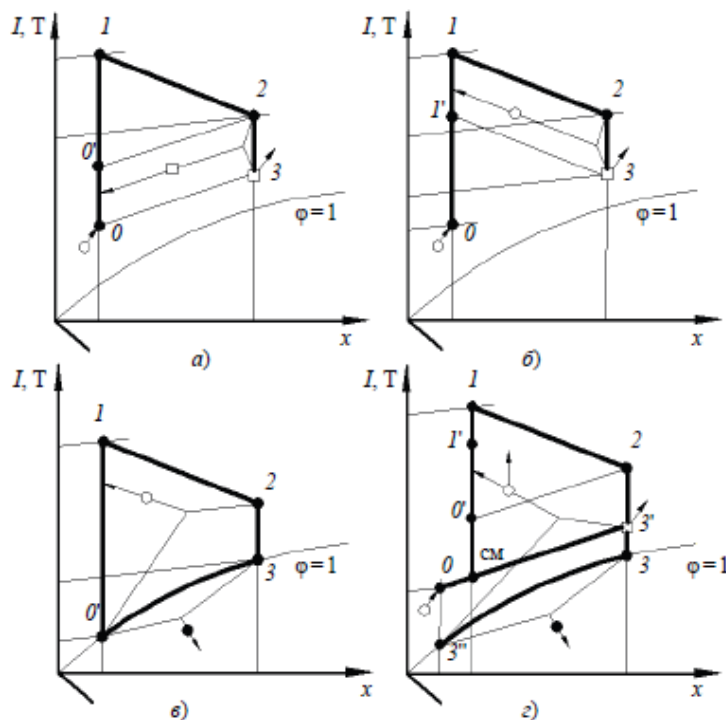


Рис. 1. Схеми сушки зерна на I-x діаграмах



На (Рис. 1.) схеми сушки зерна на I-x діаграмах:

а) без теплового насосу: 0 – 0' та 2 – 3 – теплообмін вхідного свіжого повітря з вихідним в рекуператорі; 0' – 1 – підігрів теплоносія до необхідної температури в калорифері; 1 – 2 – лінія сушіння (охолодження і зволоження повітря при віддачі теплоти на випаровування вологи).

б) тепловий насос з попереднім підігріванням повітря в калорифері (повний викид відпрацьованого теплоносія після випарника теплового насосу в атмосферу). 0 – 1' – попереднє підігрівання повітря в калорифері; 1' – 1 – догрівання в конденсаторі ТН; 1 – 2 – сушіння; 2 – 3 – відбір теплоти в випарнику ТН.

в) тепловий насос з повною рециркуляцією теплоносія (замкнутий повітряний цикл). 0' – 1 – підігрівання повітря в конденсаторі ТН; 1 – 2 – процес сушіння зерна; 2 – 3 – 0' – охолодження повітря і конденсація вологи в випарнику ТН.

г) тепловий насос з частковим змішуванням відпрацьованого теплоносія. 0' – 1' – нагрівання повітря в конденсаторі ТН; 1 – 2 – сушіння в сушарці; 2 – 3' – охолодження відпрацьованого теплоносія в рекуператорі; 3' – 3 – 3'' – охолодження повітря і конденсація вологи в випарнику ТН; 0 – см – 3' – змішування свіжого повітря і відпрацьованого теплоносія із рекуператора; см – 0' – початковий підігрів повітряної суміші в рекуператорі.

Вдосконалення схем з тепловим насосом дозволяє збільшити енергоефективність теплонасосного способу сушіння зерна використовуючи заходи із рециркуляцією теплоносія та з частковим змішуванням з відпрацьованим теплоносієм.

Схеми теплових насосів для сушіння зерна з використанням сонячної енергії та з двома температурними рівнями представлено на рис. 2 [3].

В даній схемі передбачено підігрівання повітря в підігрівачі 6 від контуру рециркуляції підігрітого теплоносія в сонячному підігрівачі 12. Теплоносій охолоджується та зневоднюється в випарнику 1 теплового насосу і направляєється в рекуперативний теплообмінник 7, де підігрівається за рахунок рекуперації теплоти викидної частини теплоносія з сушарки 8. В конденсаторі теплоносій підігрівається 2 і направляєється вентилятором 11 в сушарку 8.

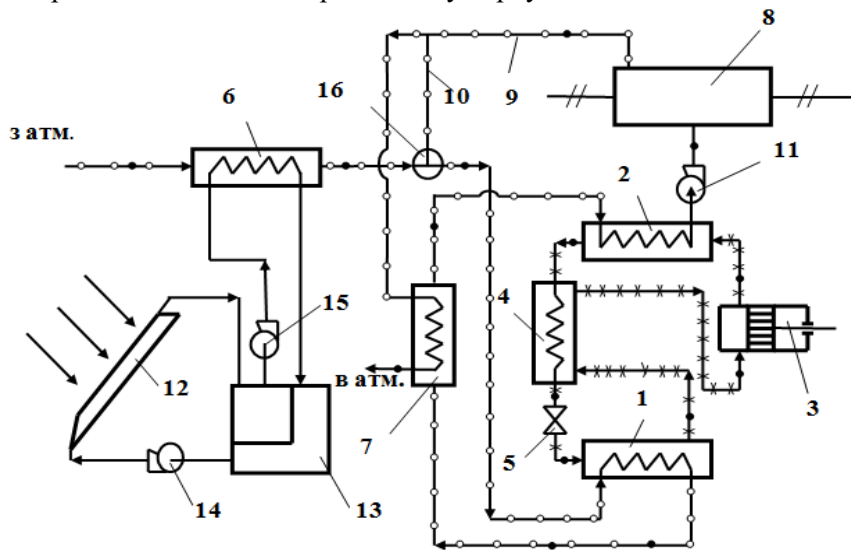


Рис. 2. Схема теплонасосної сушильної установки з сонячним підігрівачем: 1 – випарник; 2 – конденсатор; 3 – компресор; 4 – регенеративний теплообмінник; 5 – регулюючий вентиль; 6 – підігрівач; 7 – рекуперативний теплообмінник; 8 – сушарка; 9 – лінія відведення відпрацьованого сушильного агента; 10 – лінія відведення рециркуляційного потоку сушильного агента; 11 – вентилятор; 12 – сонячний підігрівач; 13 – бак – акумулятор; 14, 15 – насоси; 16 – вузол змішування.

—○—○— сушильний агент; *—*—*— робоча речовина;
— — — проміжний теплоносій; // // — продукт, що сушиться.

Підвищення енергоефективності сушіння зерна при утилізації теплоти відпрацьованого теплоносія в теплообмінниках з шахтної прямооточної зерносушарки, дозволяє економити 10% палива [4, 5]. В даній схемі передбачено підігрівання в топці відпрацьованого теплоносія та введення в схему рециркуляції свіжого зовнішнього повітря. При температурі відпрацьованого теплоносія на виході з



зони нагрівання $t = 120^{\circ}\text{C}$, теплообмінник дозволяє нагріти зовнішнє повітря до температури $80\text{...}90^{\circ}\text{C}$ перед надходженням його в топку.

Схема комплексної утилізації відпрацьованого теплоносія в теплообмінниках, економайзері та тепловому насосі представлені на рис. 3 [6].

Зерно сушиться в сушарці 1, звідки відпрацьований теплоносій направляєється на теплообмінник 2. В теплообміннику відбувається теплопередача від відпрацьованого теплоносія до сушильного агента, який направляєється для подальшого нагрівання в конденсаторі теплового насосу 6 та в паровому підігрівачі 9 і подається в сушильну камеру сушарки 1.

В схемі передбачено контур циркуляції теплоносія 18, 22, 23, 14 та контур циркуляції підігрітої води 19, 20, 21. Випарник 5 відбирає тепло і через компресор 8 надходить на конденсатор 6, де робоча речовина конденсується виділяє теплоту.

В економайзері 3 відбувається відбір теплоти на нагрівання води і направлення на випарник теплового насосу.

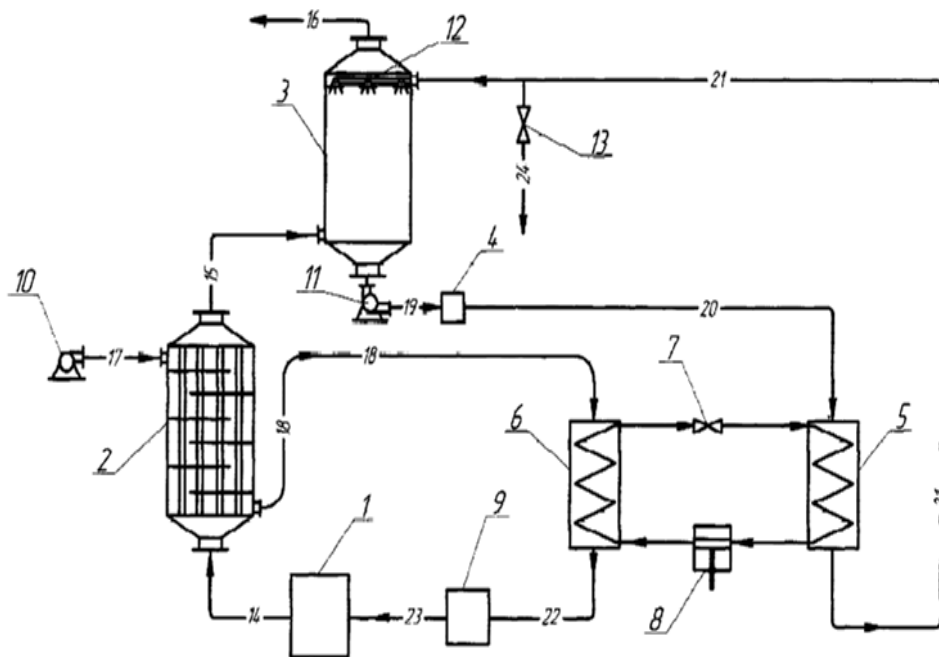


Рис. 3. Комплексна схема утилізації відпрацьованого теплоносія в теплообмінниках, економайзері та тепловому насосі: 1 – сушарка; 2 – теплообмінник; 3 – економайзер; 4 – фільтр; 5 – випарник; 6 – конденсатор; 7 – дросель; 8 – компресор; 9 – калорифер; 10 – вентилятор; 11 – насос; 12 – розпилювальний пристрій; 13 – вентиль; 14, 15, 16, 18, 22, 23 – повітропровід; 19, 20, 21, 24 – трубопровід.

3. Мета та завдання дослідження

Метою роботи є розробка сучасного енергоефективного способу сушіння зернових культур із тепловими насосами.

Для досягнення мети були поставлені завдання:

- провести обґрунтування використання теплових насосів в процесі сушіння;
- розглянути схеми роботи теплового насосу;
- розробити схему підвищення енергоефективності сушіння зерна.

4. Виклад основного матеріалу

Таким чином в схемі передбачено 4-х кратне використання теплоти відпрацьованого теплоносія для нагрівання сушильного агента і води.

Для утилізації та рекуперації теплоти в барабанній сушарці розроблена схема із використанням теплового насосу та теплообмінника (рис. 4) [7]

Представлена схема рекуперації теплоти відрізняється від попередньої на встановленням циклону 2 на виході із барабанної сушарки 1. В ній використовується теплота відпрацьованого теплоносія після очищення в циклоні 2.

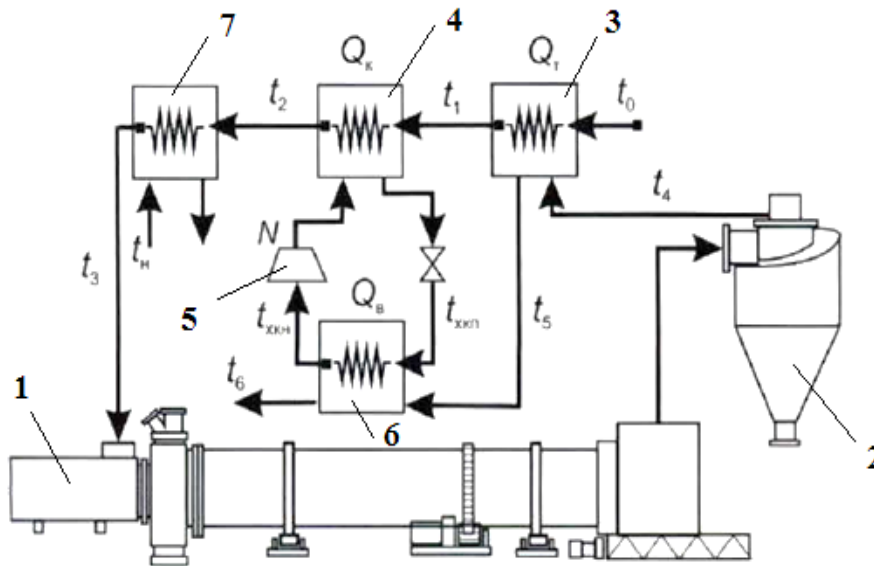


Рис. 4. Схема рекуператії теплоносія в барабанній зерносушарці: 1 – барабанна зерносушарка; 2 – циклон; 3, 7 – трубчастий підігрівач; 4 – конденсатор; 5 – компресор; 6 – випарник

Для зневоднення продуктів, сушіння яких у відповідності з технологічним регламентом повинен проводитись в декількох секціях сушарок при різних температурах теплоносія, розроблена схема теплонасосної сушарки з двосекційним конденсатором (рис. 5) [6].

Теплоносій більш високого температурного потенціалу (для сушарки 11) підігрівается послідовно в секціях 2 і 3 конденсатора і направляється на сушарку 11, де зволожується і охолоджується. Відпрацьований теплоносій, змішується з свіжою порцією повітря, осушується.

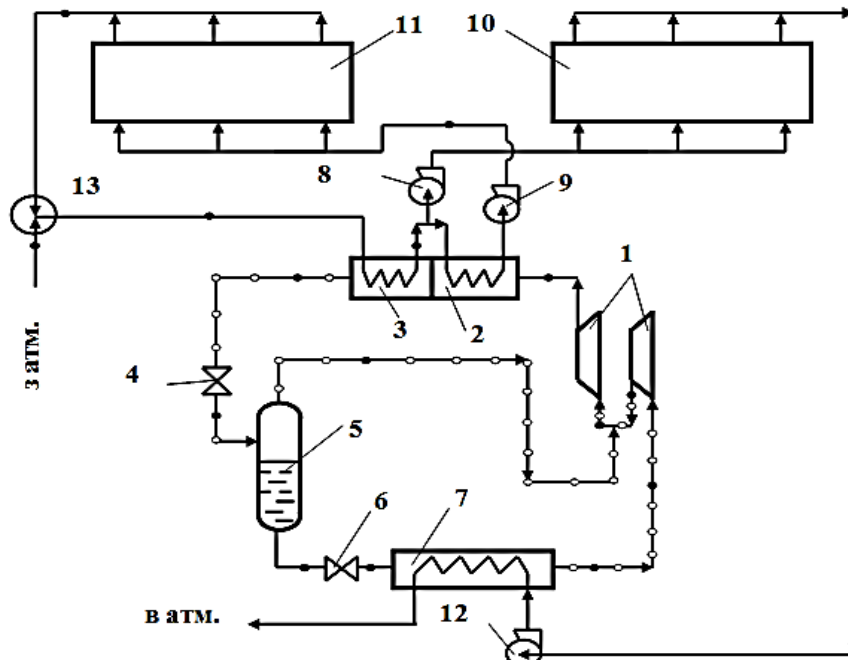


Рис. 5. Теплонасосна сушарка з двома температурними рівнями теплоносія : 1 – двоступеневий компресор; 2, 3 – двосекційний конденсатор; 4, 6 – регулюючий вентиль; 5 – проміжна ємність; 7 – випарник; 8, 9, 12 – вентилятор; 10, 11 – сушарка; 13 – вузол змішування.
————— теплоносій; - - - - - робоча речовина.



Теплоносій більш низького температурного потенціалу вентилятором 8 направляється в сушарку 10, а потім у випарник 7 для рекуперації теплоти, що дозволяє проводити процес кипіння робочої речовини при більш високій температурі.

Розроблена схема на рис. 6 показує застосування ТНУ в процесі сушіння зерна через:

- використанням низькопотенційної теплоти альтернативних джерел енергії (сонячна, навколишнє середовище, геотермальні джерела) та сушіння зерна при постійній температурі сушильного агента 40 – 60°C;
- зниження втрат теплоти на сушіння зерна через заходи направлені на рециркуляцію, утилізацію та рекуперацію теплоти відпрацьованого теплоносія в сушарках;
- комплекс заходів направлених на підвищення енергоефективності та інтенсивності сушіння із отриманням високої температури сушильного агента 80 - 90°C, а також виконання одночасно декількох технологічних операцій;
- заходи із енергозбереження залежать від типу робочої речовини в системі теплового насосу (ТН), а також розробці та керуванні більш сучасних теплонасосних сушильних установок (ТНСУ) із коефіцієнтом перетворення 3 і вище.

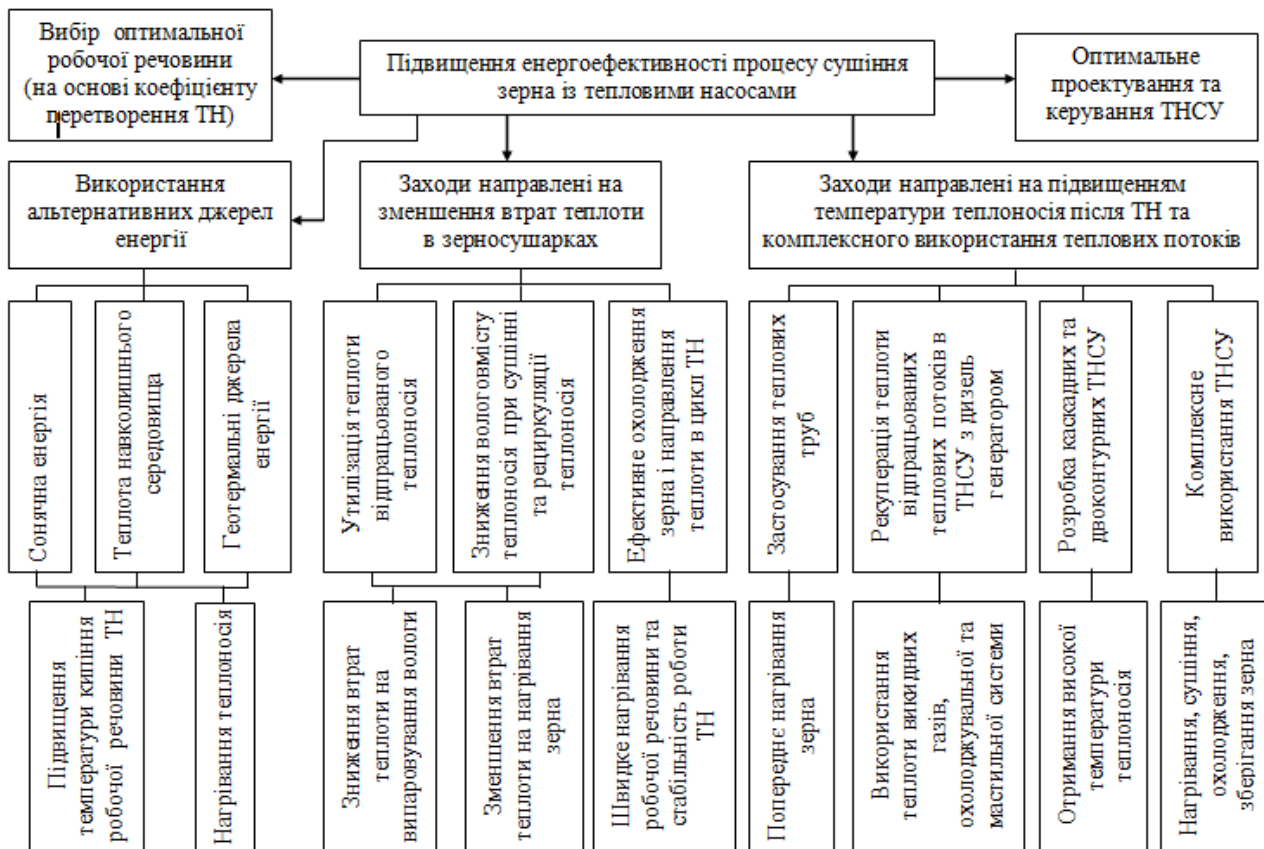


Рис. 6. Підвищення енергоефективності процесу сушіння зерна із тепловими насосами

5. Висновки

Представлений літературний огляд сушарок із тепловим насосом дає можливість розробити схему із підвищення енергоефективності процесу сушіння зерна із тепловими насосами. Розроблені заходи дають можливість більш раціонально використовувати теплові насоси.

Підвищення енергоефективності процесу сушіння зерна із тепловим насосом враховує комплекс заходів направлених на удосконалення процесу. Серед них можна виділити використання альтернативних джерел енергії, зменшення втрат теплоти в зерносушарках, підвищення температури теплоносія та комплексного використання теплових потоків, вибір оптимальної робочої речовини, оптимальне проектування та керування теплонасосної сушильної установки

**Список використаних джерел**

1. Снежкін Ю. Ф., Чалаєв Д. М., Шаврин В. С., Дабіжа Н. О. Теплові насоси в системах теплохолодопостачання. Київ: «Поліграф-Сервіс», 2009. 104 с.
2. Снежкін Ю. Ф., Пазюк В. М., Петрова Ж. О., Чалаєв Д. М. Теплонасосна зерносушарка для насінневого зерна : монографія. Київ: видавництво ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2012. 154 с.
3. Paziuk V.M., Liubin M.V., Yaropud V.M., Tokarchuk O.A., Tokarchuk D.M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 56 (3). P. 39–48.
4. Зерносушарки фірми Mathews Company. URL: www.mathewscompany.com
5. Paziuk V.M., Petrova Zh.O., Tokarchuk O.A., Yaropud V.M. Research of rational modes of drying rape seed. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 58 (2). P. 303–310.
6. Snezhkin Y.F., Paziuk V.M., Petrova Z.O., Tokarchuk O.A. Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2020. Vol. 61 (2). P. 183–192.
7. Paziuk V., Snezhkin Y., Dmytrenko N., Ivanov S., Tokarchuk O., Kupchuk I. Thermal and physical properties and heat-mass transfer processes of drying pumpkin seeds. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2022. Vol. 98 (7). P. 154–157. DOI: 10.15199/48.2022.07.25 URL: http://pe.org.pl/abstract_pl.php?nid=13087
8. Сорочинський В. Зневоднення зерна за різних схем утилізації сушильного агента й охолоджуючого повітря може бути доволі ефективно. *Зерно і хліб*. 2011. № 3. С. 40–41.
9. Калетнік Г. М. Перспективи підвищення енергетичної автономії підприємств АПК в рамках виконання енергетичної стратегії України. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2019. Вип. 4. С. 90–98. [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2019-4\(104\)-10](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2019-4(104)-10)

References

- [1] Sniezhkin, Yu.F., Chalaiev, D.M., Shavryn, V.S., Dabizha, N.O. (2009). *Teplovi nasosy v systemakh teplokhodopostachannia*. Kyiv: «Polihraf-Servis». [in Ukrainian].
- [2] Sniezhkin, Yu.F., Paziuk, V.M., Petrova, Zh.O., Chalaiev, D.M. (2012). *Teplonasosna zernosusharka dlia nasinnievoho zerna : monohrafiia*. Kyiv: vydavnytstvo TOV «Polihraf-Servis». [in Ukrainian].
- [3] Paziuk, V.M., Liubin, M.V., Yaropud, V.M., Tokarchuk, O.A., Tokarchuk, D.M. (2018). Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 56 (3), 39–48. [in English].
- [4] *Zernosusharky firmy Mathews Company. [Grain dryers of Mathews Company]*. URL: www.mathewscompany.com [in Ukrainian].
- [5] Paziuk, V.M., Petrova, Zh.O., Tokarchuk, O.A., Yaropud, V.M. (2019). Research of rational modes of drying rape seed. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 58 (2), 303–310. [in English].
- [6] Snezhkin, Y.F., Paziuk, V.M., Petrova, Z.O., Tokarchuk, O.A. (2020). Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 61 (2), 183–192. [in English].
- [7] Paziuk, V., Snezhkin, Y., Dmytrenko, N., Ivanov, S., Tokarchuk, O., Kupchuk, I. (2022). Thermal and physical properties and heat-mass transfer processes of drying pumpkin seeds. *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (7), 154–157. DOI: 10.15199/48.2022.07.25 URL: http://pe.org.pl/abstract_pl.php?nid=13087. [in English].
- [8] Sorochynskyy, V. (2011). Znevodnennya zerna za riznykh skhem utylizatsiyi sushyl'noho ahenta y okholodzhuyuchoho povitrya mozhe buty dovoli efektyvno. [Dehydration of grain under various schemes of utilization of drying agent and cooling air can be quite effective]. *Zerno i khlib*, 3, 40–41. [in Ukrainian].
- [9] Kaletnik, G.M. (2019). Perspektyvy pidvyshchennya enerhetychnoyi avtonomiyi pidpryyemstv APK v ramkakh vykonannya enerhetychnoyi stratehiyi Ukrayiny [Prospects for increasing the energy autonomy of agricultural enterprises in the framework of the energy strategy of Ukraine]. *Bulletin of Agrarian Science of the Black Sea Region*, 4, 90–98. [https://doi.org/10.31521/2313-092X/2019-4\(104\)-10](https://doi.org/10.31521/2313-092X/2019-4(104)-10) [in Ukrainian].

HEAT PUMPS AS AN ENERGY-EFFICIENT MEANS OF GRAIN DRYING

Large energy costs for the process of drying grain crops associated with the increase in the price of energy carriers pose the task of reducing the energy component to the developers. The presented article focuses on the development of measures to reduce energy costs for the grain drying process using heat pumps.

The considered advantages of heat pumps indicate the possibility of using these units for drying grain crops. Especially noteworthy is the increase in energy efficiency of heat pumps due to the conversion of



ambient heat with a low temperature potential into heat with a high temperature potential. Thus, heat pumps are characterized by the heat pump conversion factor, which indicates their efficiency.

The presented schemes with a heat pump implement the drying process in convective dryers, in particular in chamber, tunnel, shaft and drum dryers. Different schemes of heat pumps can be used for different types of dryers. The use of alternative drying sources for grain drying, in particular solar energy in the heat pump system, dramatically increases the efficiency of this installation.

Also presented is a comprehensive scheme for the utilization of spent coolant in heat exchangers, an economizer, and a heat pump, which comprehensively addresses the issue of coolant utilization in a chamber dryer. In the drum dryer, the utilization of the spent coolant in heat exchangers and a heat pump is provided, increasing the temperature of the drying agent at the entrance to the dryer. For drying plant raw materials in a two-zone tunnel dryer, a heat pump scheme with two temperature levels of the heat carrier was developed for drying the material at different temperatures in the dryer zones.

Key words: energy efficiency, heat pump, drying, dryer, process, grain.

Eq. 1. Table. 1. Fig. 6. Ref. 10.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

ПАЗЮК Вадим Михайлович – доктор технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України (вул. Булаховського, 2, корп. 2, м. Київ., 03164, Україна, e-mail: vadim_pazuk@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4955-1941>).

ТОКАРЧУК Олексій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологічних процесів та обладнання переробних і харчових виробництв Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: tokarchuk@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8036-1743>).

ШАПОВАЛЮК Сергій Олександрович – аспірант кафедри Машин та обладнання сільськогосподарського виробництва Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: shapovaliuk sergii@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0009-0007-0128-012X>).

Vadym PAZIUK – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Research Fellow of the Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine (2 Bulakhovsky St., Building 2, Kyiv, 03164, Ukraine, e-mail: vadim_pazuk@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-4955-1941>).

Oleksii TOKARCHUK – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Processes and Equipment of Processing and Food Productions of the Vinnytsia National Agrarian University (3, Solnyshchaya St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: tokarchuk@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8036-1743>).

Serhii SHAPOVALIUK – Postgraduate Student of the department of machines and equipment of agricultural production of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: shapovaliuk_sergii@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0009-0007-0128-012X>).