

УДК 621.574.013-932

DOI [https://doi.org/10.15589/znpp2026.1\(503\).1.19](https://doi.org/10.15589/znpp2026.1(503).1.19)

ENSURING THE OPERATIONAL STABILITY OF THERMAL POWER PLANT UNITS UNDER VARIABLE LOADS IN THE CONTEXT OF INSTABILITY OF UKRAINE'S POWER SYSTEM

ВИКОРИСТАННЯ АБСОРБЦІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВОК В СИСТЕМАХ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЧНИХ АГРЕГАТІВ

Oleksandr V. Koshelnik¹
Oleksandr.Koshelnik@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0001-6521-4403

Mykola P. Kundenko¹
Mykola.Kundenko@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0002-5841-4367

Tetiana M. Pugachova¹
Tatiana.Pugachova@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0002-4786-8988

Olga V. Krugliakova¹
Olha.Kruhliakova@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0003-1113-826X

Olga Yu. Yegorova¹
Olha.Yehorova@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0001-8593-1557

Oleksandr O. Tarasenko¹
Oleksandr.Tarasenko@khpi.edu.ua
ORCID: 0000-0002-7480-2917

Andrii Yu. Rudenko²
rudenkoau@mnaeu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-5103-6412

О. В. Кошельник¹,
канд. техн. наук, доцент

М. П. Кунденко¹,
докт. техн. наук, професор

Т. М. Пугачова¹,
канд. техн. наук, доцент

О. В. Круглякова¹,
канд. техн. наук, доцент

О. Ю. Єгорова¹,
канд. техн. наук, доцент

О. М. Тарасенко¹,
канд. техн. наук, доцент

А. Ю. Руденко²,
асистент

¹*National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv*

²*Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv*

¹*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків*

²*Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв*

Abstract. The issue of improving energy efficiency in glass-melting production within heat recovery systems of high-temperature thermal units has been considered. It is proposed to complement the evaporative cooling systems of glass-melting furnaces with lithium bromide absorption refrigeration machines, which provide cold production utilizing the thermal energy of low-potential steam.

Purpose. Development of a scheme for the utilization of the energy potential of low-grade steam from evaporative cooling systems of high-temperature thermal process units in glass-melting production, employing absorption refrigeration installations and followed by an assessment of their efficiency.

Method. The study employs the method of system analysis, which makes it possible to consider the object as a single thermodynamic system: «glass-melting furnace–evaporative cooling system–absorption refrigeration machine–cold consumer».

Results. The selection of a specific heat-recovery scheme must take into account the technological requirements of the enterprise and be determined by the criterion of maximum economic effect. The application of absorption refrigeration units contributes to reducing product cost and improving the overall economic efficiency of glass-melting technological processes. For evaluating the effectiveness of the proposed scheme, it is advisable to apply methods of exergy analysis, with the exergy utilization coefficient adopted as the efficiency criterion.

Scientific novelty. The feasibility of applying two-stage absorption refrigeration machines in waste heat recovery systems of glass-melting furnaces has been substantiated, which makes it possible to produce cooling with minimal electricity consumption by using low-temperature steam from evaporative cooling systems as the energy source.

Practical importance. The application of two-stage lithium bromide absorption refrigeration machines in heat recovery systems of glass-melting furnaces makes it possible to reduce cooling water consumption, increase the thermal coefficient, and avoid the need for additional steam parameter enhancement. This lowers the cost of the recovery system and provides a significant economic benefit.

Key words: Heat recovery system; absorption refrigeration unit; cold production; thermodynamic analysis; efficiency improvement.

Анотація. Розглянуто питання підвищення енергоефективності скловарного виробництва в системах утилізації теплоти високотемпературних теплотехнологічних агрегатів. Запропоновано доповнювати системи випарного охолодження скловарних печей бромістолієвими абсорбційними холодильними машинами, які забезпечують вироблення холоду за рахунок теплової енергії низькопотенційної пари.

Мета. Розробка схеми утилізації енергетичного потенціалу низькопотенційної пари систем випарного охолодження високотемпературних теплотехнологічних агрегатів скловарного виробництва із застосуванням абсорбційних холодильних установок та подальшою оцінкою її ефективності.

Методика. У дослідженні використано метод системного аналізу, який дозволяє розглядати об'єкт як єдину термодинамічну систему «скловарна піч–система випарного охолодження–абсорбційна холодильна машина–споживач холоду».

Результати. Вибір конкретної утилізаційної схеми має враховувати технологічні потреби підприємства та визначатися за критерієм максимального економічного ефекту. Використання абсорбційних холодильних установок сприяє зниженню собівартості продукції та підвищенню загальної економічності технологічних процесів виробництва скламаси. Для оцінки ефективності запропонованої схеми доцільно застосовувати методи ексергетичних аналізу, а в якості критерію ефективності – ексергетичний коефіцієнт утилізації.

Наукова новизна. Обґрунтовано доцільність застосування двоступеневих абсорбційних холодильних машин в системах утилізації теплоти скловарних печей, що дозволяє отримувати холод при мінімальних витратах електроенергії, використовуючи як джерело енергії низькотемпературну пару систем випарного охолодження.

Практична значимість. Застосування двоступеневих абсорбційних бромістолієвих холодильних машин у системах утилізації теплоти скловарних печей дозволяє знизити витрати охолоджуючої води, підвищити тепловий коефіцієнт та уникнути необхідності додаткового підвищення параметрів пари. Це зменшує вартість утилізаційної системи та забезпечує значний економічний ефект.

Ключові слова: система утилізації теплоти; абсорбційна холодильна установка; отримання холоду; термодинамічний аналіз; підвищення ефективності.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для зменшення теплового навантаження на елементи конструкції високотемпературних теплотехнологічних агрегатів та подовження строку роботи вогнетривких матеріалів у найбільш термічно-напружених місцях скловарних печей наряду з традиційними системами повітряного та водяного охолодження використовуються також системи випарного охолодження (СВПО) [1-3].

Питання повноцінного використання енергетичного потенціалу водяної пари систем випарного охолодження високотемпературних теплотехнологічних агрегатів протягом усього року пов'язана з низкою суттєвих труднощів. Основними з них є доволі низькі параметри пари (тиск у межах 0,2-0,8 МПа) та її підвищена вологість (до 12 %) [4-6]. Використання пари СВПО тільки для підігріву води обумовлено насамперед простотою даних схем та незначною вартістю необхідного теплотехнічного обладнання, незважаючи на обмежену кількість її споживачів. Тому виникає

проблема розробки теплоутилізаційних схем для глибокої утилізації енергетичного потенціалу теплових вторинних енергоресурсів систем випарного охолодження скловарних печей.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Основні недоліки повітряних та водяних систем охолодження можливо усунути шляхом застосування пароводяної суміші в якості теплоносія. Сутність системи випарного охолодження полягає у використанні прихованої теплоти пароутворення води для охолодження конструктивних елементів печей. З огляду на те, що вода в систему охолодження надходить із деяким недогрівом до кипіння, то один кілограм води при випарному охолодженні відбирає від 2350 до 2550 кДж теплоти [5]. Таким чином, система випарного охолодження за принципом дії є аналогом парогенератора, що працює без перегріву пари. Джерелом енергії виступає при цьому теплота, що відводиться від огорожень печі. Загальну схему СВПО скловарної печі наведено на рис. 1.

По опускній трубі вода з барабана-сепаратора підводиться до охолоджуваної поверхні, теплота від якої йде на утворення пароводяної суміші. Ця суміш по піднімальній трубі прямує в барабан-сепаратор, де пар відокремлюється від води (сепарується) і надходить по паропроводу до споживачів. Нестаток води в системі заповнюється живильною водою, що подається в барабан-сепаратор по трубопроводу.

СВПО мають такі переваги: зменшення витрати охолоджуючої рідини за рахунок використання теплоти фазового переходу; збільшення терміну служби охолоджуваних деталей системи і відповідно міжремонтного періоду роботи скловарного агрегату за рахунок застосування хімічно очищеної деаерованої води; істотне зниження витрати електроенергії для перекачування охолоджуючої води із-за зменшення її об'ємів. Крім того в процесі роботи СВПО виробляється вторинна пара, енергія якої може бути використана в теплоутилізаційних системах [6].

Існує два напрямки використання енергетичного потенціалу вторинної пари систем випарного охолодження – теплотехнічний та енергетичний. Перший напрямок передбачає підігрів компонентів горіння – повітря або (та) палива, частіше природного газу. Другий варіант – використання енергії пари в котлах-утилізаторах, утилізаційних турбінах для вироблення теплової та електричної енергії [7].

Проте одним із найпоширеніших варіантів використання пари, що утворюється в системах

випарного охолодження скловарних високотемпературних теплотехнологічних агрегатів, – її застосування як теплоносія в опалювальних системах. У такому випадку пара, що зазвичай виробляється на заводських котельнях, частково або повністю замінюється паром від СВПО, що дозволяє зменшити споживання первинного палива при виробництві скломаси.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Але такий спосіб використання теплової енергії вторинної пари не вирішує проблему повноцінного її використання із-за сезонності роботи систем опалення. Таким чином, завдання ефективного використання вторинної пари СВПО залишається сьогодні остаточно невирішеним. Реалізація заходів, спрямованих на отримання одночасно різних видів енергії, дозволить забезпечити цілорічне використання енергетичного потенціалу низькопотенційної пари та підвищити загальну енергоефективність виробництва скломаси з одночасним зниженням собівартості продукції.

Одним із шляхів вирішення даної проблеми може бути застосування утилізаційних схем з абсорбційними холодильними установками (АБХУ). Вони використовують незначну кількість електроенергії, а при наявності дешевого джерела теплоти, отримання штучного холоду за її допомогою виявляється більш ефективним, ніж інші способи [8, 9]. Отриманий холод може бути використано для охолодження найбільш навантажених елементів конструкції

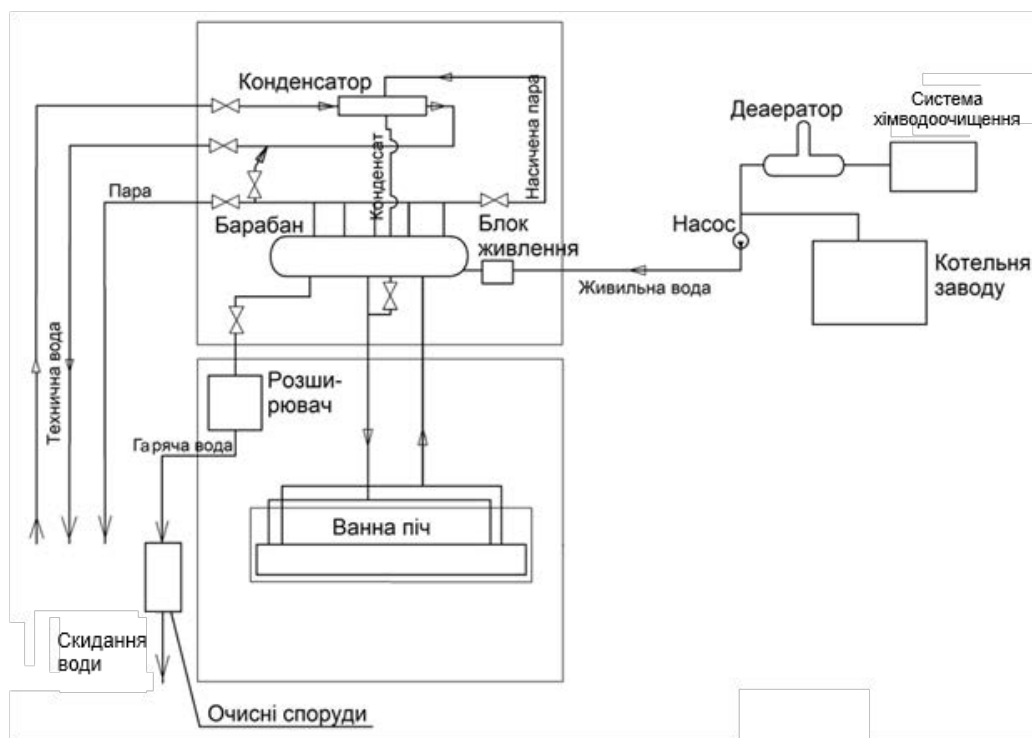


Рис. 1. Принципова схема установки випарного охолодження скловарної печі з конденсатором поверхневого типу

сковарних печей, де відсутня система випарного охолодження.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета дослідження – розробка схеми утилізації енергетичного потенціалу низькопотенційної пари систем випарного охолодження високотемпературних теплотехнологічних агрегатів сковарного виробництва з використанням абсорбційних холодильних установок та оцінка її ефективності.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ

ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для реалізації зазначеної мети дослідження використовувався метод системного аналізу, де об'єкт дослідження розглядається як інтегрована термодинамічна система «сковарна піч–система випарного охолодження–АБХУ–споживач холоду» з узгодженням енергетичних потоків. Дана методика забезпечує створення такої конфігурації теплоутилізаційної системи, що забезпечує максимальне використання наявного енергетичного потенціалу вторинної пари з урахуванням технологічних обмежень виробництва.

Об'єктом дослідження є система утилізації теплоти вторинної пари систем випарного охолодження теплотехнологічних агрегатів сковарного виробництва.

Предметом дослідження є складні тепломасообмінні процеси, що спостерігаються в елементах системи утилізації теплоти випарного охолодження сковарних печей.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Абсорбційні холодильні системи на основі води та броміду літію завдяки можливості використання різних видів низькопотенційних джерел теплоти (димові гази, гаряча вода, водяна пара) розглядаються сьогодні як перспективна альтернатива традиційним парокомпресійним установкам [9]. Вони характеризуються низьким споживанням електроенергії, екологічною безпечністю та здатністю працювати без застосування озоноруйнівних холодоагентів. Однак динамічні процеси в таких системах є досить складними для дослідження через багатоконпонентні тепло- та масообмінні явища, що відбуваються в елементах холодильної машини [10–12].

АБХМ із обігрівом низькотемпературною парою мають моноблочну компактну конструкцію. Джерелом енергії в таких установках з одноступінчастою регенерацією розчину є водяна пара низького тиску 0,2–0,25 МПа, при двоступінчастій регенерації розчину використовується пара з тиском 0,6–0,9 МПа.

В основу роботи АБХМ покладено здатність водяного розчину бромистого літію абсорбувати більш холодну водяну пару, що супроводжується виділенням певної кількості теплоти. Всі процеси в даній холодильній машині протікають у вакуумі [11, 12].

Враховуючи те, що СВПО сковарних печей у більшості випадків виробляють насичену водяну пару з тиском 0,6–0,8 МПа, доцільно розглядати

використання двоступеневою абсорбційною холодильною машиною, що відповідає робочому тиску в АБХМ, застосування саме таких установок має певні переваги. Вони в першу чергу пов'язані з відсутністю необхідності підвищення параметрів водяної пари на вході. Це дозволяє відмовитися від встановлення додаткового теплообмінного обладнання, що зменшує загальну вартість утилізаційної системи.

На рис. 1, 2 зображено схему теплоутилізаційної установки з двоступеневою абсорбційною холодильною машиною та цикл її роботи в діаграмі i - ξ . Тут випарювання розчину здійснюється у двох генераторах – високо- та низькотемпературному. Джерелом енергії для низькотемпературного генератора є пара холодоагенту, що надходить із високотемпературного генератора.

В теплообмінниках 2-го та 1-го ступенів ТО2, ТО1 слабкий розчин з абсорберу А нагрівається зустрічними потоками гарячого розчину (процеси 1–2 та 2–3). Далі слабкий розчин потрапляє в генератор 1-го ступеня Г1, в якому здійснюється його нагрів та кипіння (процес 3–4) за рахунок використання теплоти пари СВПО сковарної печі СП, яка обладнана регенеративним теплообмінником Р. Водяна пара із генератора Г1 (т. 8') надходить на обігрів генератора 2-го ступеня Г2, а розчин проміжної конденсації, попередньо охолоджений в теплообміннику ТО1, надходить в генератор 2-го ступеня, де випаровується (процес 5–6). Отримана пара (т. 9') надходить в конденсатор К1. Після процесу конденсації (т. 9) вона змішується (т. 10) з конденсатом (т. 8) після теплообмінника К2 і потрапляє у випарник В. Міцний розчин перед надходженням в абсорбер А охолоджується в теплообміннику ТО2, потім цикл замикається (процес 7–1) при насиченні міцного розчину водяною парою (т. 10').

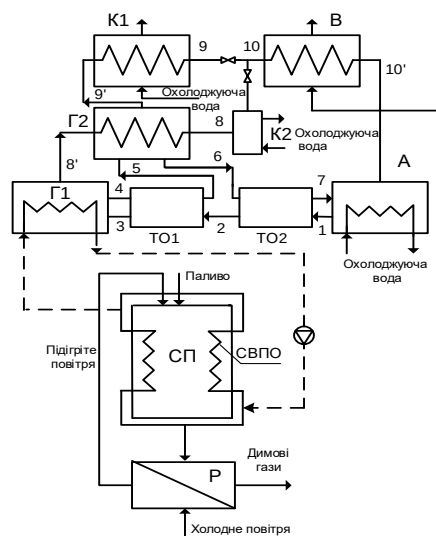


Рис. 1. Схема утилізації теплоти вторинної пари СВПО з використанням двоступеневої абсорбційної холодильної машини

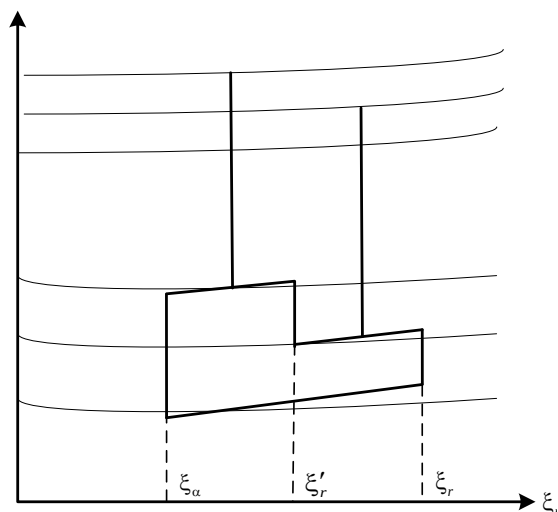


Рис. 2. Цикл роботи абсорбційної двоступеневої холодильної машини в i - ξ координатах

Сучасні холодильні машини обладнані автоматичною системою керування, що забезпечує регулювання холодопродуктивності в діапазоні від 20 до 100%, а також захист обладнання в позаштатних ситуаціях.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

В залежності від технологічної схеми, масштабів виробництва та виду продукції, скловарні підприємства мають різні співвідношення виходу вторинних енергоресурсів та потреб в тепловій, механічній або електричній енергії. Вибір напрямків і схем використання вторинних енергоресурсів в кожному конкретному випадку повинен враховувати технологічні потреби підприємства в різних видах енергії та визначатися за величиною найбільшого економічного ефекту.

Слід зазначити, що ефективність застосування абсорбційних холодильних установок суттєво залежить від стабільності параметрів вторинної пари, що обмежує доцільність їх використання в умовах значних коливань теплового навантаження скловарної печі. Традиційні методи аналізу складних теплоутилізаційних систем часто базуються на припущеннях, які не дозволяють адекватно оцінити перехідні режими роботи, особливо при зміні навантаження чи джерела теплоти. Для повної оцінки роботи системи утилізації теплоти систем СВПО, включаючи технічні та економічні аспекти, доцільним є застосування методу ексергетичного аналізу, який є ефективним інструментом для проектування, оптимізації та оцінки енергетичних процесів. Стосовно АБХУ необхідно використовувати ексергетичні баланси у вигляді двох типів діаграм – «ексергія–склад» та «ексергія–ентальпія», що дозволяють ідентифікувати втрати ексергії під час процесів розділення та змішування робочого тіла.

Ексергетичний коефіцієнт утилізації виступає якісним показником, що характеризує рівень

динамічної досконалості складних енергетичних систем. Для його визначення застосовують два методи. Найбільш поширеним є спрощений підхід, який ґрунтується на співвідношенні ексергії, отриманої внаслідок використання теплоти енергоносія, до ексергії вторинних енергетичних ресурсів. Такий метод доцільно застосовувати у випадках, коли повернення енергії у технологічний агрегат не передбачено.

Для теплотехнологічних установок, у яких можливо зменшити споживання первинного палива шляхом залучення вторинних енергоресурсів, ексергетичний коефіцієнт утилізації доцільно визначати за іншим підходом. У цьому випадку він розраховується як відношення сукупної ексергії технологічного продукту та енергоносіїв, отриманих завдяки утилізації теплоти, до ексергії використаного палива та екзотермічних реакцій у високотемпературному реакторі для виробництва скломаси.

Різні напрями застосування вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) відрізняються як за технологічними особливостями, так і за рівнем необхідних капіталовкладень та кінцевим економічним результатом. Однакова кількість перетвореного тепла може забезпечувати різний рівень ефективності залежно від умов його використання. Це зумовлює потребу у введенні додаткового критерію оцінки, який би відображав не лише кількісні та якісні параметри утилізованої енергії, але й результативність її практичного застосування.

Таким інтегральним показником може бути коефіцієнт ефективності, що визначається як відношення фактичного економічного ефекту від використання ВЕР (в даному випадку енергії низькопотенційної пари СВПО) до максимально можливого ефекту, який може бути досягнутий за умов економічно доцільного ступеня перетворення енергії та оптимальної схеми її використання.

ВИСНОВКИ

Використання абсорбційних холодильних машин у системах утилізації теплоти високотемпературних агрегатів є дієвим способом підвищення енергоефективності скловарного виробництва та підвищення терміну експлуатації обладнання за рахунок забезпечення ефективного охолодження найбільш навантажених елементів конструкції скловарних печей. Вторинна пара систем випарного охолодження може слугувати джерелом енергії для роботи АБХМ без додаткового підвищення її параметрів.

Застосування двоступеневих схем дозволяє знизити витрати охолоджуючої води, підвищити тепловий коефіцієнт та зменшити вартість утилізаційної системи. В залежності від технологічної схеми, масштабів виробництва та виду продукції, скловарні підприємства мають різні співвідношення виходу вторинних енергоресурсів та потреб в тепловій, механічній або електричній енергії. Вибір напрямків і схем

використання вторинних енергоресурсів в кожному конкретному випадку повинен враховувати технологічні потреби підприємства в різних видах енергії та визначатися за величиною найбільшого економічного ефекту.

Ефективність процесів трансформації енергії у теплоутилізаційних комплексах скловарних печей визначається як характеристиками застосовуваних енергоносіїв, так і специфічними умовами

енергоспоживання. Враховуючи особливості роботи абсорбційних холодильних установок, можна зазначити, що запропонована теплоутилізаційна система буде найбільш ефективною за умов наявності стабільного джерела вторинної пари з тиском не нижче 0,6 МПа. Це забезпечить її цілорічне використання в системах охолодження скловарних печей, зменшить загальне енергоспоживання підприємства та собівартість кінцевого продукту.

REFERENCES

- [1] Hichov, Yu.O. (2012) *Vtorynni enerhoresursy promyslovykh pidpriemstv. Chastyna I [Industrial Secondary Energy Resources. Part I]*. Dnipropetrovsk: NMetAU [in Ukrainian].
- [2] Bashlii, S. V., Panova, V.O. (2016). *Metalurhiini pechi : navch.-metod. posibnyk z osnov roboty metalurhiinykh pechei [Metallurgical Furnaces: A Teaching and Methodological Guide to the Fundamentals of Metallurgical Furnace Operation]*. Zaporizhzhia : ZDIA [in Ukrainian].
- [3] Min'ko, N.I., Zaitsev, Y.S., Zaitseva, N.N., Bilinskii, R. L., Shershnev, Yu. M. (2000). Evaporation cooling of glass-melting furnaces (a review). *Glass Ceram*, 57 (5-6), 187-189. <https://doi.org/10.1007/BF02681273>.
- [4] Trier, W. (2012). *Glassschmelzöfen: Konstruktion und Betriebsverhalten*. Berlin-Heidelberg-New York-Tokio : Springer-Verlag.
- [5] Koshelnik, O.V., Dolobovska, O.V., Pavlova, V.G. (2017). Perspektyvni napriamky vykorystannia nyzkopotentsiinoi pary system vyparnoho okholodzhennia sklovarykh pechei [The Promising Trends of the low-potential Steam Utilization of the Glassfurnaces Transpiration Cooling Systems]. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia [Integrated Technologies and Energy Saving]*. 1. 53-59 [in Ukrainian].
- [6] Koshelnik, O.V., Dolobovska, O.V., Pugacheva, T.M., Kruglyakova, O.V., Pavlova, V.G. (2020). Rozrobka skhem vykorystannia nyzkopotentsiinoi pary system vyparnoho okholodzhennia sklovarykh pechei dlia otrymannia elektrychnoi enerhii [Study of electric Energy Generation Gases using low-grade Steam of Glass Melting Furnace Evaporation Cooling System]. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia [Integrated Technologies and Energy Saving]*. 2. 3-10. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2020.2.01> [in Ukrainian].
- [7] Dincer, I., Ratlamwala, T. A. H. (2016). *Integrated Absorption Refrigeration Systems*. Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-33658-9_7.
- [8] Ghatos, S., Taha-Janani, M. (2025). Literature Review of Absorption Machine and Thermodynamic Modeling of Single-Effect Absorption Cooling Systems Using H₂O-LiBr Pair. In: Boutahir, M., El Mehdi, E. (eds) *Advanced Materials for Sustainable Energy and Engineering. Engineering Materials*. Springer, Cham, 399-412. https://doi.org/10.1007/978-3-031-75032-8_27.
- [9] Nikbakhti, R., Wang, X., Hussein, A.K., Iranmanesh, A. (2020). Absorption cooling systems – Review of various techniques for energy performance enhancement. *Alexandria Engineering Journal*, 59(2), 707-738. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.036>.
- [10] Blanco-Marigorta, Ana M., Daniel Marcos, J. (2021). Key issues on the exergetic analysis of H₂O/LiBr absorption cooling systems. *Case Studies in Thermal Engineering*, 28, 101568. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101568>.
- [11] Zhou, Y., Pan, L., Han, X., Sun, L. (2023). Dynamic modeling and thermodynamic analysis of lithium bromide absorption refrigeration system using Modelica. *Applied Thermal Engineering*, 225, 120106. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120106>.
- [12] Chan, W.M., Leong, Y.T., Foo, J.J., Leng Chew, I.M. (2017). Synthesis of energy efficient chilled and cooling water network by integrating waste heat recovery refrigeration system, *Energy*, 141, 1555-1568. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.056>.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Гічов Ю.О. *Вторинні енергоресурси промислових підприємств. Частина I*: Дніпропетровськ : НМетАУ, 2012. 64 с.
- [2] Башлій С.В., Панова В.О. *Металургійні печі : навч.-метод. посібник з основ роботи металургійних печей*. Запоріжжя : ЗДІА, 2016. 158 с.
- [3] Min'ko, N.I., Zaitsev, Y.S., Zaitseva, N.N., Bilinskii, R. L., Shershnev, Yu. M. (2000). Evaporation cooling of glass-melting furnaces (a review). *Glass Ceram*. Vol. 57, no.5-6, pp. 187-189. <https://doi.org/10.1007/BF02681273>.
- [4] Trier W. *Glassschmelzöfen: Konstruktion und Betriebsverhalten*. Berlin-Heidelberg-New York-Tokio : Springer-Verlag, 2012. 328 s.
- [5] Кошельнік О.В., Долобовська О.В., Павлова В.Г. (2017) Перспективні напрямки використання низькопотенційної пари систем випарного охолодження скловарних печей. *Інтегровані технології та енергозбереження*. № 1. С. 53-59.
- [6] Кошельнік О.В., Долобовська О.В., Пугачова Т.М., Круглякова О.В., Павлова В.Г. (2020). Розробка схем використання низькопотенційної пари систем випарного охолодження скловарних печей для отримання електричної енергії. *Інтегровані технології та енергозбереження*. № 2. С. 3-10. <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2020.2.01>. Deng, Y., Liu, R., Zhang, J., Jiao, K. (2020). Manufacturing technology and application of cooling stave in blast furnace. *Metall. Res. Technol.* 117 (5). 504. <https://doi.org/10.1051/metal/2020049>.

- [7] Dincer I., Ratlamwala T. A. H. (2016). *Integrated Absorption Refrigeration Systems*. Springer Cham, 2016. 270 p.
- [8] Ghatoos S., Taha-Janan M. Literature Review of Absorption Machine and Thermodynamic Modeling of Single-Effect Absorption Cooling Systems Using H₂O-LiBr Pair. In: Boutahir, M., El Mehdi, E. (eds) *Advanced Materials for Sustainable Energy and Engineering. Engineering Materials*. Springer, Cham, 2025. pp. 399-412. https://doi.org/10.1007/978-3-031-75032-8_27.
- [9] Nikbakhti R., Wang X., Hussein A.K., Iranmanesh A. (2020). Absorption cooling systems – Review of various techniques for energy performance enhancement. *Alexandria Engineering Journal*. 59(2). pp. 707-738. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.01.036>.
- [10] Blanco-Marigorta, Ana M., Daniel Marcos, J. (2021) Key issues on the exergetic analysis of H₂O/LiBr absorption cooling systems. *Case Studies in Thermal Engineering*. Vol. 28, 101568. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101568>.
- [11] Zhou, Y., Pan, L., Han, X., Sun, L. (2023). Dynamic modeling and thermodynamic analysis of lithium bromide absorption refrigeration system using Modelica. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 225. 120106. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120106>.
- [12] Chan W.M., Leong Y.T., Foo J.J., Leng Chew I.M. (2017). Synthesis of energy efficient chilled and cooling water network by integrating waste heat recovery refrigeration system. *Energy*. Vol. 141. pp. 1555-1568. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.056>.

© Кошельнік О. В., Кунденко М. П., Пугачова Т. М., Круглякова О. В.,
Єгорова О. Ю., Тарасенко О. М., Руденко А. Ю.

Дата першого надходження статті до видання: 22.02.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 17.03.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 22.05.2026



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