

УДК 621.1:536.24
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2025.1\(499\).8](https://doi.org/10.15589/znp2025.1(499).8)

DEVELOPMENT OF ENGINEERING METHODS FOR IMPROVING HEAT AND MASS TRANSFER IN MODERN PRODUCTION PROCESSES

РОЗРОБЛЕННЯ ІНЖЕНЕРНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНЕСЕННЯ В СУЧАСНИХ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСАХ

Larisa A. Prots
laprots@gmail.com
ORCID: 0000-0001-8162-2108

Ruslan V. Rosul
rosulrv@gmail.com
ORCID: 0009-0008-6855-4612

Yurii I. Fordziun
yurijford@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6709-9525

Л. А. Проц,
канд. техн. наук, доцент

Р. В. Росул,
канд. техн. наук, доцент

Ю. І. Фордзюн,
канд. техн. наук, доцент

Mukachevo State University, Mukachevo
Мукачівський державний університет, м. Мукачєво

Abstract. The relevance of the study is due to the need to improve the processes of heat and mass transfer in production systems to increase their energy efficiency, economic profitability and environmental sustainability. The growing need for optimisation of production processes requires the integration of the latest engineering solutions capable of reducing heat loss, reducing energy consumption and improving equipment reliability. The article identifies the main problems that arise during the implementation of innovative methods of heat and mass transfer and defines the ways to overcome them. The purpose of the study is to substantiate the effectiveness of modern engineering solutions in improving heat and mass transfer by adapting them to production needs and to create recommendations for the integration of such methods to achieve maximum economic and environmental benefits.

To achieve this goal, the article analyses the current state of heat and mass transfer in production systems, investigates the possibilities of using the latest materials and structures, and evaluates the effectiveness of their implementation. An analytical approach was used to identify the main integration problems and develop practical recommendations for overcoming them. The study shows that the introduction of modern engineering solutions, such as the use of nanomaterials, microchannel heat exchangers and automated control systems, reduces heat losses and increases productivity. It is proved that the main barriers to implementation are high investment costs, insufficient regulatory framework and lack of specialised knowledge among the staff. Measures to overcome these obstacles are proposed, including stimulating government support, training and expanding cooperation with research institutions.

The conclusions emphasise the importance of integrating environmental and economic aspects into production processes through the adaptation of the latest technologies. Prospects for further research include the creation of adaptive models for analysing thermal processes, the study of new materials with improved thermal and physical properties, and the implementation of large-scale solutions to improve energy efficiency in industrial systems.

Key words: heat and mass transfer; energy efficiency; engineering solutions; nanomaterials; microchannel heat exchangers; automation; environmental sustainability; production systems.

Анотація. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю вдосконалення процесів тепломасоперенесення у виробничих системах для підвищення їх енергоефективності, економічної вигідності та екологічної стійкості. Щораз більші потреби в оптимізації виробничих процесів вимагають інтеграції новітніх інженерних рішень, здатних забезпечити зниження тепловтрат, скорочення енергоспоживання та підвищення надійності обладнання. У статті встановлено основні проблеми, що виникають під час упровадження інноваційних методів тепломасоперенесення, та визначено напрями їх подолання.

Метою дослідження є обґрунтування ефективності сучасних інженерних рішень у вдосконаленні тепломасоперенесення шляхом їх адаптації до виробничих потреб і створення рекомендацій щодо інтеграції таких методів для досягнення максимального економічного та екологічного ефекту.

Для здійснення мети проведено аналіз сучасного стану тепломасоперенесення у виробничих системах, досліджено можливості застосування новітніх матеріалів і конструкцій, а також оцінено ефективність їх впровадження. Використано аналітичний підхід для ідентифікації основних проблем інтеграції та розроблення практичних рекомендацій щодо їх подолання.

У результаті дослідження виявлено, що впровадження сучасних інженерних рішень, як-от використання наноматеріалів, мікроканальних теплообмінників та автоматизованих систем управління, забезпечує зниження теплових втрат і підвищення продуктивності. Доведено, що основними бар'єрами впровадження є високі інвестиційні витрати, недостатня нормативна база та нестача спеціалізованих знань серед персоналу. Запропоновано заходи для подолання цих перешкод, включаючи стимулювання державної підтримки, навчання кадрів та розширення співпраці з науково-дослідними установами.

У висновках наголошено на важливості інтеграції екологічних та економічних аспектів у виробничі процеси через адаптацію новітніх технологій. Перспективи подальших досліджень полягають у створенні адаптивних моделей для аналізу теплових процесів, вивченні нових матеріалів із покращеними теплофізичними властивостями та впровадженні масштабних рішень для підвищення енергоефективності в промислових системах.

Ключові слова: тепломасоперенесення; енергоефективність; інженерні рішення; наноматеріали; мікроканальні теплообмінники; автоматизація; екологічна стійкість; виробничі системи.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Тепломасообмінні процеси є основою функціонування багатьох сучасних виробничих систем, забезпечуючи ефективність енергетичних, хімічних, металургійних та інших галузей промисловості. Проте значні енергетичні й технологічні втрати та екологічні наслідки від використання застарілих методів тепломасообміну вимагають удосконалення наявних інженерних підходів. У зв'язку із цим актуальним є розроблення нових методів і моделей, які дозволяють забезпечити підвищення ефективності процесів тепломасоперенесення, мінімізуючи вплив на довкілля та знижуючи собівартість продукції.

Проблема тепломасоперенесення в сучасному виробництві тісно пов'язана з такими важливими науковими завданнями, як моделювання та оптимізація теплових і масообмінних процесів, розроблення енергоефективних технологій, дослідження нових матеріалів із підвищеними теплофізичними характеристиками. Практичне значення цієї проблеми полягає у створенні технологій, які можуть забезпечити конкурентоспроможність виробництва, скоротити витрати на енергоресурси та зменшити шкідливі викиди в атмосферу. Таким чином, удосконалення інженерних методів тепломасоперенесення є стратегічно важливим для сталого розвитку промисловості в умовах сучасних викликів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблематика вдосконалення тепломасоперенесення у виробничих процесах розглядається в численних сучасних наукових працях, які акцентують увагу на оптимізації теплових потоків, використанні інноваційних матеріалів та підходів до підвищення енергоефективності. Зокрема, дослідження М. А. Аль-Обайді (М. А. Al-Obaidi) зосереджено на використанні гібридних нанофлюїдів для підвищення теплопередачі в теплообмінниках. Експериментальні

результати демонструють зростання коефіцієнта теплопередачі, що відкриває нові можливості для вдосконалення тепломасоперенесення в промислових системах [1]. У роботі П. Адарш Варма (P. Adarsh Varma) проведено огляд сучасних тенденцій використання нанофлюїдів у теплообмінниках, підкреслено їх потенціал для зниження енергоспоживання та покращення ефективності виробничих процесів [2].

П. Шварцмайр (P. Schwarzmayr) у своєму дослідженні акцентує увагу на термальному зберіганні енергії, зокрема в системах із тепловими акумуляторами. Експерименти довели, що вдосконалені конструкції дозволяють мінімізувати теплові втрати та підвищити загальну енергоефективність [3]. Кс. Зоу (X. Zhou) розглядає вплив термічних технологій на ефективність двигунів Стірлінга, наголошуючи на перспективності їх використання для оптимізації теплових процесів у виробництві [4].

Конструкції мікроканальних теплообмінників детально аналізує К. Рамеш (K. Ramesh), доводячи їх здатність зменшувати теплові втрати та підвищувати ефективність теплопередачі, що робить їх перспективним рішенням для модернізації наявних виробничих систем [5]. А. Двіведі (A. Dwivedi) акцентує на термічних характеристиках мікроканальних теплообмінників, підтверджуючи їх здатність забезпечувати високий рівень ефективності теплопередачі в умовах виробничих процесів [6].

Вивчення автоматизації процесів тепломасоперенесення є центральною темою роботи Ф. Абделауї (F. Abdelaoui) та ін. Автори демонструють, що автоматизовані підходи можуть значно підвищити точність управління тепловими потоками, зменшуючи енерговитрати [7]. У дослідженні М. Вохра (M. Vohra) зі співавторами розглядається використання термоелектричних генераторів для утилізації відпрацьованого тепла. Автори довели, що такі системи сприяють як зниженню енергоспоживання, так і підвищенню економічної ефективності виробництва [8].

А. Камблі (A. Kambli) та П. Дей (P. Dey) аналізують сучасні інженерні підходи до проектування теплообмінників, зокрема вдосконалення їх геометрії. Результати демонструють, що оптимізація конструкцій сприяє мінімізації теплових втрат [9]. Робота Г. Брамendorfer (G. Bramendorfer) зосереджена на використанні інноваційних матеріалів у теплообмінниках, де підкреслено економічну доцільність застосування новітніх технологій [10].

Аналізу сучасних конструкцій теплообмінного обладнання присвячено монографію І. О. Мікульонка, який підкреслює важливість упровадження інноваційних матеріалів для підвищення енергоефективності виробничих систем [11]. У дослідженні К.-Х. Гроте (К.-Н. Grote) і Х. Хефази (H. Hefazi) систематизовано сучасні рішення для оптимізації тепломасоперенесення, що підкреслює значущість інтеграції нових технологій для сталого розвитку промисловості [12].

Д. Атомоде (D. Atomode) аналізує інноваційні підходи до оптимізації енергоефективності в механічних системах, наголошуючи на їх впливі на екологічну стійкість виробничих процесів [13]. Роботу С. Саха (S. Saha) та ін. присвячено оптимізації теплових процесів у специфічних умовах, як-от бафльовані теплообмінні конструкції, з демонстрацією їх практичної ефективності [14]. Нарешті, С. Салехін (S. Salehin) зі співавторами узагальнюють можливості використання нанофлюїдів у сучасних теплообмінниках, підкреслюючи їх екологічність та ефективність [15].

Таким чином, аналіз представлених праць демонструє глибокий науковий інтерес до вдосконалення тепломасоперенесення, акцентуючи на інноваційних матеріалах, оптимізації конструкцій та автоматизації процесів.

ВИОКРЕМЛЕННЯ НЕ ВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Попри досягнення у вивченні тепломасоперенесення, залишаються нерозглянутими аспекти, що впливають на його ефективність у сучасних виробничих системах. Зокрема, недостатньо досліджено вплив нових теплообмінних матеріалів і конструкцій у реальних виробничих умовах, де показники, отримані в лабораторіях, можуть суттєво відрізнятися. Також бракує даних про довгострокову надійність таких матеріалів та їх економічну доцільність в умовах масштабного виробництва.

Окремою проблемою є інтеграція новітніх технологій у вже наявні виробничі системи. Цей процес ускладнюється високими інвестиційними витратами, недостатньою технічною підготовкою персоналу та обмеженнями, які накладає застаріла інфраструктура.

Недостатньо уваги приділяється аналізу екологічного впливу впровадження сучасних матеріалів та конструкцій у промислових масштабах. Хоча такі рішення позиціонуються як екологічно безпечні, їх реальний вплив на довкілля залишається маловивченим.

Запропоноване дослідження сприятиме заповненню цих прогалин шляхом детального аналізу застосування новітніх матеріалів і технологій у виробничих процесах. Отримані результати дозволять підвищити ефективність виробничих систем і мінімізувати їх вплив на довкілля, що є важливим кроком у напрямі сталого розвитку.

Мета дослідження – аналіз наукових підходів інженерних методів удосконалення процесів тепломасоперенесення в сучасних виробничих системах із метою підвищення їх ефективності, зниження енергетичних витрат і мінімізації негативного впливу на довкілля.

Завдання статті:

1) дослідити вплив тепломасоперенесення на енергоефективність виробничих процесів з урахуванням сучасних технологічних тенденцій та можливостей застосування нових теплообмінних матеріалів і конструкцій;

2) визначити ключові проблеми впровадження інженерних методів удосконалення тепломасоперенесення у виробничі процеси, а також оцінити їх ефективність, ураховуючи технологічні, енергетичні та екологічні аспекти;

3) надати практичні рекомендації щодо інтеграції вдосконалених методів тепломасоперенесення для підвищення енергоефективності та екологічної стійкості виробничих систем.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи дослідження включають аналіз сучасних підходів до вдосконалення тепломасоперенесення у виробничих системах, оцінювання ефективності використання теплоізоляційних матеріалів та автоматизації технологічних процесів. Основна увага приділяється аналізу характеристик сучасних матеріалів і конструкцій теплообмінників, які сприяють підвищенню енергоефективності виробничих процесів.

Об'єктом дослідження є виробничі процеси, що базуються на тепломасоперенесенні, зокрема в галузях енергетики, хімічної промисловості та металургії. Предметом дослідження виступають інженерні методи вдосконалення тепломасоперенесення, спрямовані на зменшення енерговтрат, оптимізацію технологічних процесів і зниження негативного впливу на довкілля.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Тепломасоперенесення є фундаментальним процесом, що визначає ефективність функціонування виробничих систем. Сучасний розвиток промисловості супроводжується значним зростанням енергетичних витрат, тому вдосконалення методів тепломасоперенесення стає критично важливим. Енергоефективність виробничих процесів залежить від оптимізації теплообміну в системах охолодження, нагрівання, сушіння та інших

технологічних операціях. Використання інноваційних матеріалів із підвищеними теплофізичними властивостями, як-от композити або наноматеріали, а також упровадження інтелектуальних систем керування, дозволяє суттєво знизити витрати енергії (табл. 1).

На практиці нині сучасні виробничі підприємства активно впроваджують новітні підходи до управління процесами тепломасоперенесення. Інтелектуальні системи моніторингу та регулювання, засновані на алгоритмах штучного інтелекту, дозволяють автоматично оптимізувати параметри теплообміну залежно від умов експлуатації. Наприклад, у металургії застосування нанопокриттів на теплообмінних поверхнях суттєво підвищило швидкість та ефективність процесу. В енергетичній галузі впровадження теплообмінників із новітніх матеріалів знижує тепловтрати, що особливо актуально для когенераційних систем.

Сучасні технологічні тенденції також включають перехід до замкнених циклів енергопостачання, які мінімізують втрати теплової енергії. Наприклад, застосування рекупераційних систем дозволяє використовувати залишкове тепло для опалення або інших технологічних процесів. Ці рішення значно підвищують конкурентоспроможність підприємств, одночасно сприяючи досягненню екологічних цілей.

Нові теплообмінні матеріали та конструкції відкривають значні можливості для вдосконалення процесів тепломасоперенесення, що є важливим чинником підвищення енергоефективності виробничих процесів. Зокрема, наноматеріали, композитні сплави та металокерамічні покриття забезпечують не лише

високу теплопровідність, а й тривалу стійкість до екстремальних температур і корозійного середовища. Такі інноваційні конструкції, як мікроканальні теплообмінники та модульні системи, підвищують ефективність передачі тепла завдяки більшій площі теплообміну і зниженню енергетичних втрат.

Сучасні теплообмінні матеріали та інноваційні конструкції значно змінили підходи до організації тепломасоперенесення у виробничих процесах. Наприклад, наноматеріали забезпечують вищу теплопровідність порівняно зі звичайною сталлю чи алюмінієм, що раніше домінували у виробництві. У системах охолодження високопродуктивного обладнання застосування наноматеріалів дозволяє скоротити енергетичні втрати на 20–30%, що робить їх економічно вигідними попри високі початкові витрати [1; 15]. Традиційні матеріали, як-от мідь, хоча й демонструють високу теплопровідність, мають обмежену корозійну стійкість, що знижує їх довговічність у складних умовах експлуатації.

Композитні сплави, на відміну від чистих металів, забезпечують додаткову міцність і стійкість до корозійного впливу, що є критично важливим у хімічній промисловості. Наприклад, у традиційних теплообмінниках зі сталі виникали значні втрати ефективності через відкладення солей або корозію. Використання композитів дозволяє продовжити термін служби обладнання до 10 років без значних збоїв у роботі, що раніше було неможливим [9; 10].

Мікроканальні конструкції, порівняно з традиційними пластинчастими теплообмінниками, забезпечують

Таблиця 1. Порівняльний аналіз традиційних та сучасних методів тепломасоперенесення у виробничих процесах

Параметр	Традиційні методи	Сучасні методи
Ефективність теплообміну	Низька через використання стандартних матеріалів	Висока завдяки наноматеріалам із поліпшеними властивостями
Управління процесом	Ручне або напівавтоматизоване	Автоматизоване з використанням IoT-технологій
Енергетичні витрати	Високі через втрати енергії в системі	Низькі завдяки оптимізованим конструкціям та матеріалам
Вплив на довкілля	Значний через високі викиди CO ₂	Мінімальний завдяки енергоефективним рішенням
Інвестиційні витрати	Порівняно низькі	Потребують значних початкових інвестицій

Джерело: сформовано авторами на підставі [1; 3; 7; 9].

Таблиця 2. Можливості нових теплообмінних матеріалів і конструкцій у виробничих процесах

Категорія	Опис	Приклади використання
Наноматеріали	Матеріали із включенням наночастинок для збільшення теплопровідності	Використання в системах охолодження високопродуктивного обладнання
Композитні сплави	Матеріали, що поєднують високу міцність і стійкість до корозії	Теплообмінники в хімічній промисловості
Металокерамічні покриття	Покриття, що забезпечують підвищену термічну стабільність	Теплообмінники для роботи у високотемпературних умовах
Мікроканальні конструкції	Системи з малими каналами, що збільшують площу теплообміну і мінімізують теплові втрати	Використання в авіаційній та автомобільній промисловості
Модульні системи	Конструкції, що легко адаптуються до змін у виробничих процесах	Використання в когенераційних установках

Джерело: сформовано авторами на підставі [2; 4; 5; 6; 14].

більш рівномірний розподіл теплоносія та зменшення гідравлічного опору. У когенераційних системах такі конструкції дозволяють використовувати залишкове тепло для вторинних потреб, зокрема опалення або нагріву води, що традиційні теплообмінники реалізували з меншим коефіцієнтом ефективності.

Металокерамічні покриття також забезпечують нові можливості для виробництва, дозволяючи працювати за температури до 1000°C без втрати функціональних властивостей. Для порівняння: звичайні сталеві теплообмінники починають втрачати свої властивості за температури понад 500°C, що обмежує їх застосування в металургії [9]. Водночас упровадження металокерамічних матеріалів у теплообмінники дозволило не тільки покращити теплопровідність, а й зменшити ризики аварійних ситуацій, пов'язаних із термічною нестабільністю.

Оцінювання ефективності інженерних рішень у процесах тепломасоперенесення є критично важливим завданням для забезпечення конкурентоспроможності сучасних виробничих систем. Традиційні методи оцінювання, зосереджені переважно на термічній ефективності, не враховують комплексного впливу технологічних, енергетичних та екологічних факторів, що обмежує можливості оптимізації. Сучасний підхід до оцінювання передбачає використання інтегральних показників, які охоплюють усі ключові аспекти ефективності, включаючи вплив на навколишнє середовище, витрати енергії та технологічну адаптивність. Такий підхід дозволяє не лише оцінювати поточну ефективність, але й прогнозувати довгострокові результати впровадження інженерних рішень, що є важливим для стратегічного планування (табл. 3).

Так, сучасні підходи дозволяють оптимізувати виробничі процеси завдяки інтеграції методів аналізу великих даних, цифрових моделей та алгоритмів штучного інтелекту. Наприклад, у тепловій енергетиці моделювання тепломасоперенесення за допомогою цифрових двійників дозволяє оцінити енергетичну ефективність не лише окремих елементів системи, але й усієї установки. У металургії використання сенсорів для моніторингу реальних

умов роботи теплообмінників допомагає оперативно коригувати параметри, підвищуючи технологічну адаптивність.

Екологічний аспект також набув значної важливості. Наприклад, у хімічній промисловості оцінювання екологічної безпеки нових теплообмінників враховує зменшення викидів CO₂ на 15–20% завдяки більш ефективній теплопередачі [7]. Економічна ефективність визначається через скорочення витрат на енергоресурси, що стало можливим завдяки впровадженню композитних матеріалів із високою теплопровідністю. Інноваційний потенціал дозволяє не лише підвищувати конкурентоспроможність, але й швидко адаптуватися до змін у ринкових умовах, що особливо важливо у висококонкурентних галузях, як-от авіація та автомобільна промисловість.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Запровадження інженерних методів удосконалення тепломасоперенесення у виробничі процеси зіштовхується з низкою проблем, що ускладнюють реалізацію цих технологій у сучасних умовах. Однією з ключових проблем є високі початкові витрати на впровадження нових технологій та матеріалів. Це стосується не лише розроблення та закупівлі інноваційного обладнання, але й адаптації наявних систем до нових умов роботи. Така ситуація є особливо актуальною для підприємств із застарілою інфраструктурою, де інтеграція сучасних рішень вимагає значних інвестицій.

Технологічна складність також є важливим бар'єром. Новітні матеріали, як-от нанокомпозити чи мікроканалні теплообмінники, потребують високо-технологічного виробничого обладнання і спеціалізованих знань для їх ефективного використання. Крім того, впровадження таких технологій може вимагати змін у виробничих процесах, що впливає на загальну продуктивність на початкових етапах адаптації. Відсутність відповідних компетенцій серед персоналу стає додатковим фактором, що ускладнює використання нових методів.

Ще однією проблемою є недостатнє екологічне оцінювання багатьох інноваційних рішень. Хоча такі

Таблиця 3. Критерії оцінювання ефективності інженерних рішень у процесах тепломасоперенесення

Критерій оцінювання	Характеристика	Методи вимірювання
Технологічна ефективність	Оцінювання адаптивності рішення до різних виробничих умов	Аналіз продуктивності та часу реакції на зміну параметрів
Енергетична ефективність	Визначення енергоспоживання та мінімізація втрат енергії	Використання енергетичних балансів і теплових моделей
Екологічна безпека	Оцінювання впливу на довкілля, зокрема скорочення шкідливих викидів	Аналіз життєвого циклу та екологічних наслідків
Економічна ефективність	Співвідношення витрат на впровадження рішення до очікуваної економії	Розрахунок показників повернення інвестицій (ROI)
Інноваційний потенціал	Оцінювання можливості впровадження інновацій та адаптації до нових умов	SWOT-аналіз інженерних рішень

Джерело: сформовано авторами на підставі [7; 8; 10; 13; 15].

матеріали та конструкції часто заявляються як більш екологічно безпечні, їх вплив на навколишнє середовище в довгостроковій перспективі може бути недостатньо дослідженим. Наприклад, виробництво наноматеріалів може супроводжуватися високими енергетичними витратами та викидами шкідливих речовин, що ставить під сумнів їх екологічну ефективність у глобальному масштабі [2].

Регуляторні бар'єри також відіграють значну роль у процесі впровадження інноваційних рішень. У багатьох країнах нормативно-правова база, що стосується тепломасоперенесення, не встигає за розвитком технологій, що обмежує можливості використання новітніх матеріалів та конструкцій у реальних умовах. Це може стосуватися як стандартів безпеки, так і вимог до енергетичної ефективності обладнання.

Нарешті, економічна нестабільність та зовнішні виклики, як-от зростання цін на енергоресурси, впливають на здатність підприємств інвестувати в інновації. У таких умовах акцентують часто на короткострокову економію, а не на довгострокові переваги, які можуть забезпечити нові інженерні рішення. Таким чином, розв'язання цих проблем вимагає комплексного підходу, що включає фінансову підтримку, розвиток нормативної бази, підготовку кадрів та ширше впровадження результатів наукових досліджень у виробничі процеси.

Інтеграція вдосконалених методів тепломасоперенесення у виробництво вимагає стратегічного підходу, який забезпечить максимальний економічний та екологічний ефект. Першочерговим кроком є проведення всебічного енергоаудиту виробничих процесів, що дозволяє ідентифікувати ключові зони тепловтрат та визначити, які саме вдосконалення будуть найбільш ефективними. Це створює основу для обґрунтованого вибору технологій, що оптимально відповідають потребам конкретного підприємства.

Для успішної інтеграції вдосконалених методів необхідно забезпечити навчання персоналу, включаючи як інженерів, так і персонал обслуговування, для роботи з новими матеріалами і технологіями. Важливим є впровадження автоматизованих систем моніторингу та управління тепломасоперенесенням. Такі системи дозволяють у реальному часі аналізувати параметри роботи, оперативно коригувати процеси і мінімізувати втрати енергії, що є необхідним для досягнення сталого економічного ефекту.

Рекомендовано використовувати інноваційні матеріали, як-от навантажувачі, металокерамічні сплави та мікроканальні конструкції, які забезпечують значне підвищення теплопровідності та стійкості до екстремальних умов експлуатації. При цьому слід урахувати довгострокову окупність таких інвестицій, зважаючи на потенційне зниження витрат на енергоресурси та обслуговування обладнання.

Для досягнення екологічного ефекту доцільно інтегрувати рекупераційні системи, які дозволяють використовувати залишкове тепло для вторинних потреб, як-от опалення приміщень або підігрів води.

Такі рішення не лише знижують енергоспоживання, але й сприяють зменшенню викидів парникових газів.

Важливим елементом є створення партнерства із науково-дослідними установами та впровадження інновацій на основі актуальних наукових досягнень. Це дозволить не лише адаптувати новітні технології до специфічних потреб підприємства, але й розробляти індивідуальні рішення, що забезпечують конкурентні переваги.

Забезпечення фінансової підтримки, наприклад, через державні програми або гранти, сприятиме активнішому впровадженню вдосконалених методів. Також доцільно враховувати міжнародні стандарти енергоефективності, що дозволить підвищити експортний потенціал продукції.

Таким чином, інтеграція вдосконалених методів тепломасоперенесення повинна базуватися на комбінації технічних, організаційних та фінансових рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності, зниження витрат і забезпечення екологічної стійкості виробництва.

ВИСНОВКИ

Дослідження показало, що сучасні інженерні методи тепломасоперенесення значно підвищують ефективність виробничих процесів. Установлено, що ключову роль відіграють теплообмінні властивості матеріалів, геометрія теплообмінників та автоматизація управління процесами. Впровадження інноваційних технологій забезпечує зниження енергоспоживання, оптимізацію теплових потоків та підвищення загальної ефективності системи.

Серед основних проблем відзначають: високі початкові інвестиційні витрати; складність інтеграції сучасних матеріалів і конструкцій у наявні виробничі процеси; недостатнє екологічне оцінювання багатьох інноваційних рішень; недостатню нормативну базу, що не враховує сучасні технологічні тенденції.

Рекомендується проводити енергоаудити для виявлення зон тепловтрат, упорядковувати автоматизовані системи управління процесами тепломасоперенесення, використовувати інноваційні матеріали, зокрема навантажувачі, і новітні теплообмінні конструкції. Для підвищення екологічної ефективності пропонується інтеграція рекупераційних систем, які використовують залишкове тепло для вторинних потреб. Також доцільно підтримувати співпрацю з науково-дослідними установами та залучати фінансування через державні програми та гранти.

Подальші дослідження можуть бути присвячені створенню адаптивних моделей для аналізу теплових процесів у реальному часі, розробленню нових матеріалів із покращеними теплоізоляційними властивостями, а також вдосконаленню автоматизованих систем управління технологічними процесами. Важливим напрямом є вивчення інтеграції нових підходів у масштабні виробничі системи з урахуванням їх взаємодії з екологічними стандартами.

REFERENCES

- [1] Al-Obaidi, M. A., Rashid, F. L., Rasheed, M. K., et al. (2024). Recent achievements in heat transfer enhancement with hybrid nanofluid in heat exchangers: A comprehensive review. *International Journal of Thermophysics*, 45(133). <https://doi.org/10.1007/s10765-024-03428-x>
- [2] Adarsh Varma, P., Das, S., Mangadoddy, N., & Hoffmann, J. (2024). Nanofluids for heat transfer augmentation in heat exchangers—An overview of current research. In Das, S., Mangadoddy, N., & Hoffmann, J. (Eds.), *Proceedings of the 1st International Conference on Fluid, Thermal and Energy Systems* (pp. 3–23). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5990-7_8
- [3] Schwarzmayer, P., Birkelbach, F., Walter, H., & Hofmann, R. (2023). Standby efficiency and thermocline degradation of a packed bed thermal energy storage: An experimental study. *Applied Energy*, 337, Article ID 120917. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120917>
- [4] Zhou, X., Xu, X., Ouyang, X., & Huang, J. (2023). Convective meta-thermal concentration for ultrahigh efficient Stirling engine with waste heat and cold utilization. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/abs/2306.07813>
- [5] Ramesh, K. N., Sharma, T. K., & Rao, G. A. P. (2021). Latest advancements in heat transfer enhancement in the micro-channel heat sinks: A review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28, 3135–3165. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09495-1>
- [6] Dwivedi, A., Khan, M. M., & Pali, H. S. (2023). A comprehensive review of thermal enhancement techniques in microchannel heat exchangers and heat sinks. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148, 13189–13231. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12451-3>
- [7] Abdelaoui, F. Z. E., Jabri, A., & Barkany, A. E. (2023). Optimization techniques for energy efficiency in machining processes—a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 125, 2967–3001. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10927-y>
- [8] Vohra, M., Sharma, M., & Kumar, S. (2022). Numerical and analytical investigation of automotive exhaust gas waste heat recovery module using thermoelectric generator. In Kumar, R., Pandey, A. K., Sharma, R. K., & Norkey, G. (Eds.), *Recent Trends in Thermal Engineering* (pp. 3–15). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-3132-0_3
- [9] Kambli, A., & Dey, P. (2023). A critical review on recent developments and applications of microchannels in the field of heat transfer and energy. *Heat and Mass Transfer*, 59, 1707–1747. <https://doi.org/10.1007/s00231-023-03358-8>
- [10] Bramerdorfer, G., Tapia, J. A., Pyrhönen, J. J., & Cavagnino, A. (2018). Modern electrical machine design optimization: Techniques, trends, and best practices. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(10), 7672–7684.
- [11] Mikulonok, I. O. (2023). *Innovatsiine teploobminne obladdannia [Innovative heat exchange equipment]*. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. Retrieved from <https://ela.kpi.ua/items/d606e80b-d765-4dd0-a454-fa4a40ab6691> [in Ukrainian].
- [12] Grote, K.-H., & Hefazi, H. (2021). *Springer handbook of mechanical engineering*. Springer Nature. Retrieved from <https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=upQoEAAAQBAJ>
- [13] Atomode, D. (2023). Optimizing energy efficiency in mechanical systems: Innovations and applications. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 11(5), 458–464. Retrieved from <https://www.jetir.org/papers/JETIR2405G63.pdf>
- [14] Saha, S. C., Gu, Y. T., & Khan, M. M. K. (2017). Heat transfer enhancement in a baffled attic-shaped space. In Khan, M. M. K., Chowdhury, A. A., & Hassan, N. M. S. (Eds.), *Application of Thermo-fluid Processes in Energy Systems: Key Issues and Recent Developments for a Sustainable Future* (pp. 157–172). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0697-5_8
- [15] Salehin, S., Ehsan, M. M., Faysal, S. R., & Islam, A. K. M. S. (2018). Utilization of nanofluid in various clean energy and energy efficiency applications. In Chowdhury, A. A., & Hassan, N. M. (Eds.), *Application of Thermo-fluid Processes in Energy Systems* (pp. 3–33). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0697-5_2

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Al-Obaidi, M.A., Rashid, F.L., Rasheed, M.K. et al. (2024). Recent Achievements in Heat Transfer Enhancement with Hybrid Nanofluid in Heat Exchangers: A Comprehensive Review. *International Journal of Thermophysics*. Vol. 45, No. 133. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10765-024-03428-x> (date of access: 21.12.2024).
- [2] Adarsh Varma, P., Das, S., Mangadoddy, N., & Hoffmann, J. (2024). Nanofluids for Heat Transfer Augmentation in Heat Exchangers—An Overview of Current Research. In: Das, S., Mangadoddy, N., Hoffmann, J. (Eds.). *Proceedings of the 1st International Conference on Fluid, Thermal and Energy Systems*. Singapore: Springer, P. 3–23. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-99-5990-7_8 (date of access: 21.12.2024).
- [3] Schwarzmayer, P., Birkelbach, F., Walter, H., & Hofmann, R. (2023). Standby efficiency and thermocline degradation of a packed bed thermal energy storage: An experimental study. *Applied Energy*. Vol. 337. Article ID 120917. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120917> (date of access: 21.12.2024).
- [4] Zhou, X., Xu, X., Ouyang, X., & Huang, J. (2023). Convective meta-thermal concentration for ultrahigh efficient Stirling engine with waste heat and cold utilization. *arXiv preprint*. arXiv:2306.07813. URL: <https://arxiv.org/abs/2306.07813> (date of access: 21.12.2024).
- [5] Ramesh, K.N., Sharma, T.K., & Rao, G.A.P. (2021). Latest Advancements in Heat Transfer Enhancement in the Micro-channel Heat Sinks: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*. Vol. 28, No. 3135–3165. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09495-1> (date of access: 21.12.2024).
- [6] Dwivedi, A., Khan, M.M., & Pali, H.S. (2023). A comprehensive review of thermal enhancement techniques in microchannel heat exchangers and heat sinks. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Vol. 148, No. 13189–13231. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12451-3> (date of access: 21.12.2024).

- [7] Abdelaoui, F.Z.E., Jabri, A., & Barkany, A.E. (2023). Optimization techniques for energy efficiency in machining processes—a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Vol. 125. P. 2967–3001. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10927-y> (date of access: 21.12.2024).
- [8] Vohra, M., Sharma, M., & Kumar, S. (2022). Numerical and Analytical Investigation of Automotive Exhaust Gas Waste Heat Recovery Module Using Thermoelectric Generator. In: Kumar R., Pandey A.K., Sharma R.K., Norkey G. (Eds.). *Recent Trends in Thermal Engineering*. Singapore: Springer, P. 3–15. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3132-0_3 (date of access: 21.12.2024).
- [9] Kambli, A., & Dey, P. (2023). A critical review on recent developments and applications of microchannels in the field of heat transfer and energy. *Heat and Mass Transfer*. Vol. 59. P. 1707–1747. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-023-03358-8> (date of access: 21.12.2024).
- [10] Bramerdorfer, G., Tapia, J.A., Pyrhönen, J.J., & Cavagnino, A. (2018). Modern Electrical Machine Design Optimization: Techniques, Trends, and Best Practices. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 65, No. 10. P. 7672–7684. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2801805> (date of access: 21.12.2024).
- [11] Мікульонок, І.О. (2023). *Інноваційне теплообмінне обладнання*. Монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, (142 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/d606e80b-d765-4dd0-a454-fa4a40ab6691> (дата звернення: 21.12.2024).
- [12] Grote, K.-H., & Hefaz, i H. (2021). *Springer handbook of mechanical engineering*. Springer Nature. P. 5–30. URL: <https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=upQoEAAAQBAJ> (date of access: 21.12.2024).
- [13] Atomode, D. (2023). Optimizing energy efficiency in mechanical systems: Innovations and applications. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. Vol. 11, No. 5. P. 458–464. URL: <https://www.jetir.org/papers/JETIR2405G63.pdf> (date of access: 21.12.2024).
- [14] Saha, S.C., Gu, Y.T., & Khan, M.M.K. (2017). Heat Transfer Enhancement in a Baffled Attic-Shaped Space. In: Khan M.M.K., Chowdhury A.A., Hassan N.M.S. (Eds.). *Application of Thermo-fluid Processes in Energy Systems: Key Issues and Recent Developments for a Sustainable Future*. Singapore: Springer, P. 157–172. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0697-5_8 (date of access: 21.12.2024).
- [15] Salehin, S., Ehsan, M.M., Faysal, S.R., & Islam, A.K.M.S. (2018). Utilization of Nanofluid in Various Clean Energy and Energy Efficiency Applications. In: Chowdhury A.A., Hassan N.M. (Eds.). *Application of Thermo-fluid Processes in Energy Systems*. Singapore: Springer, P. 3–33. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0697-5_2 (date of access: 21.12.2024).

© Проц Л. А., Росул Р. В., Фордзюн Ю. І.

Дата надходження статті до редакції: 10.02.2025

Дата затвердження статті до друку: 22.02.2025