

С. М. ФОРИСЬ

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0001-7104-640X

А. Ю. УСЕНКО

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри енергетичних систем та енергоменеджменту
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0001-7467-6220

В. Я. ПЕРЕРВА

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри теплового інжинірингу та енергетичних технологій
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
ORCID: 0000-0003-0665-6812

РЕКУПЕРАЦІЯ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНОГО ТЕПЛА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПІДПРИЄМСТВ

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю пошуку нових шляхів підвищення енергоефективності промислових підприємств в умовах зростання цін на енергоносії та посилення вимог до енергетичної безпеки. Значна частка теплових ресурсів у виробничих процесах втрачається у формі низькопотенційного тепла, яке може бути перетворене на корисну енергію за умови застосування сучасних технологій рекуперації. Використання таких потоків автор розглядає як стратегічний інструмент формування автономного енергопостачання, що водночас сприяє скороченню залежності від зовнішніх джерел та зменшенню екологічних навантажень.

Метою статті є наукове обґрунтування концептуальних і прикладних засад використання низькопотенційного тепла промислових процесів для створення систем автономного енергозабезпечення, а також визначення найбільш ефективних напрямів його застосування в умовах сучасних викликів енергетичної стійкості.

Методологія дослідження ґрунтується на системному підході, що передбачає аналіз фізико-технічних характеристик джерел низькопотенційного тепла, оцінку потенціалу їхньої рекуперації, вивчення принципів інтеграції у виробничу інфраструктуру, а також порівняння економічної доцільності для підприємств різних галузей. Використано методи класифікаційного та порівняльного аналізу, енергетичного моніторингу та узагальнення результатів сучасної виробничої практики.

Результати дослідження полягають у встановленні закономірностей утворення низькопотенційних теплових потоків і доведенні їхнього значного енергетичного потенціалу. Виявлено, що ефективна інтеграція систем рекуперації можлива лише за умови поєднання технічної сумісності, гнучкості теплових потоків, модульності та автоматизації управління. Проаналізовано економічні переваги впровадження, що полягають у скороченні витрат на енергоресурси, підвищенні стабільності виробничих циклів і зростанні конкурентоспроможності підприємств.

Висновки підтверджують, що системне використання низькопотенційного тепла здатне забезпечити підприємствам високий рівень енергетичної автономності, зменшити залежність від зовнішніх джерел енергії та одночасно оптимізувати виробничі витрати. Виявлено ключові бар'єри впровадження значні капітальні витрати, складність технологічної інтеграції, брак підготовлених кадрів і недосконалість нормативної бази.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з удосконаленням цифрових систем керування тепловими потоками на основі штучного інтелекту, розвитком технологій акумулювання енергії, створенням єдиних стандартів оцінки ефективності рекупераційних рішень та розробленням механізмів державного стимулювання їхнього впровадження у промисловості.

Ключові слова: енергоефективність, теплові втрати, промислові підприємства, автономні системи, рекуперація низькопотенційного тепла.

S. M. FORYS

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Energy Systems
and Energy Management
Ukrainian State University of Science and Technologies
ORCID: 0000-0001-7104-640X

A. YU. USENKO

PhD in Engineering, Associate Professor,
Head of the Department of Energy Systems and Energy Management
Ukrainian State University of Science and Technologies
ORCID: 0000-0001-7467-6220

V. YA. PERERVA

PhD in Engineering, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Thermal Engineering
and Energy Technology
Dnipro University of Technology
ORCID: 0000-0003-0665-6812

RECUPERATION OF LOW-GRADE HEAT FROM TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR AUTONOMOUS ENERGY SUPPLY OF ENTERPRISES

The relevance of the study is driven by the urgent need to identify new approaches to improving the energy efficiency of industrial enterprises under conditions of rising energy costs and increasing demands for energy security. A significant proportion of thermal resources in production processes is lost in the form of low-grade heat, which can be converted into useful energy when modern recovery technologies are applied. The author considers the utilization of such heat streams as a strategic tool for establishing autonomous energy supply systems, simultaneously reducing dependence on external sources and mitigating environmental impacts.

The purpose of this article is to provide a scientific rationale for the conceptual and applied foundations of utilizing low-grade industrial heat to develop autonomous energy supply systems, as well as to identify the most effective directions for its application under current challenges of energy resilience.

The research methodology is based on a systems approach that includes an analysis of the physical and technical characteristics of low-grade heat sources, an assessment of their recovery potential, a study of integration principles into production infrastructure, and a comparison of the economic feasibility across various industrial sectors. Methods of classification and comparative analysis, energy monitoring, and synthesis of contemporary industrial practices were employed.

The results demonstrate the patterns of low-grade heat formation and confirm its significant energy potential. The findings show that the effective integration of recovery systems is feasible only when technical compatibility, flexibility of heat streams, modularity, and automation of control are combined. The economic benefits of implementation are substantiated, including reductions in energy costs, improved stability of production cycles, and enhanced competitiveness of enterprises.

The conclusions confirm that the systematic use of low-grade heat can provide enterprises with a high degree of energy autonomy, reduce dependence on external energy sources, and simultaneously optimize production costs. However, several key barriers to implementation were identified, including high capital expenditures, complexity of technological integration, shortage of qualified personnel, and deficiencies in regulatory frameworks.

Future research perspectives are associated with the advancement of digital heat-flow management systems based on artificial intelligence, the development of energy storage technologies, the establishment of unified standards for assessing the efficiency of recovery solutions, and the creation of state-level mechanisms to incentivize their adoption in industry.

Key words: energy efficiency, heat losses, industrial enterprises, autonomous systems, low-grade heat recovery.

Постановка проблеми

Моделювання процесів зносу та відновлення твердих сплавів є важливим завданням у контексті забезпечення надійності й довговічності деталей машин сільськогосподарського виробництва. Робочі елементи техніки в умовах інтенсивних механічних навантажень, впливу абразивного та корозійного середовища зазнають прискореного руйнування, що зумовлює втрату працездатності й підвищення експлуатаційних витрат. Актуальність проблеми посилюється високою вартістю виробництва нових деталей та необхідністю підтримання стабільності роботи машинно-тракторного парку в умовах сезонних пікових навантажень.

Розробка математичних моделей, що дозволяють описати механізми зношування та прогнозувати залишковий ресурс деталей, має прямий зв'язок із практичними завданнями підвищення ефективності експлуатації сільськогосподарської техніки. Такі підходи забезпечують можливість планування ремонтів, обґрунтування вибору

оптимальних технологій відновлення та мінімізації простоїв обладнання. Водночас результати дослідження відкривають перспективи підвищення продуктивності та конкурентоспроможності аграрного виробництва за рахунок раціонального використання технічних ресурсів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Наукові праці, присвячені рекуперації низькопотенційного тепла технологічних процесів для автономного енергозабезпечення підприємств, можна згрупувати в чотири напрями. Перший напрям охоплює регуляторно-технологічні передумови декарбонізації та локальної енергетичної автономії. М. Павловський (М. Pavlovskiy) доводить, що заміщення викопного пального біодизельними сумішами підвищує паливну ефективність і покращує екологічні показники дизельних двигунів, зменшуючи питомі викиди у виробничих процесах джерелах низькопотенційного тепла [1]. О. Коростін акцентує увагу на методологічних підходах до зменшення вуглецевого сліду тренувань моделей машинного навчання (ML); такі рішення можуть бути адаптовані до цифрової інфраструктури енергоаудиту та оптимізації рекупераційних схем, знижуючи «приховані» викиди ІТ-ланки енергоменеджменту [2]. П. Хмелярж (Р. Chmielarz), аналізуючи практики медіації в соціально-господарських справах, окреслює інституційні механізми узгодження інтересів стейкхолдерів, необхідні для впровадження промислових систем рекуперації тепла на підприємствах та у промислових парках [3]. У розвиток цієї логіки П. Хмелярж (Р. Chmielarz) зазначає, що енергетична безпека постачання газу залежить від політико-правових заходів, спрямованих на диверсифікацію джерел і створення локальних гнучких потужностей; це формує попит на низькопотенційні технології як інструмент зниження пікового споживання та підвищення стійкості на рівні підприємств і громад [4]. Узагальнюючи, варто розширювати міждисциплінарні моделі оцінювання «сукупної вартості володіння» рекупераційними технологіями з урахуванням організаційної медіації, ІТ-вуглецевого сліду та сценаріїв енергетичної безпеки; доцільно проводити політико-економічні дослідження зі стимулюючими контрактами для місцевих енергоспільнот.

Другий напрям охоплює фундаментальні та оглядові дослідження технологій рекуперації низькопотенційного тепла в будівлях і промисловості.

Д. Лю (D. Liu), Ф. Чжао (F. Y. Zhao), Г. Тан (G. F. Tang) одними з перших систематизували «активні» стратегії відбору низькопотенційного тепла в будівельних системах (теплові насоси, рекуператори вентиляції, міжсезонні акумулятори), підкресливши значення керованості потоків і температурних рівнів для досягнення реальної енергоекономії [5]. Д. Цзі (D. Ji), Г. Лю (G. Liu), А. Романіолі (A. Romagnoli) та співавтори узагальнюють сучасний спектр технологій від органічних циклів Ренкіна і сорбційних машин до інтеграції теплових насосів у процесні контури і пропонують метрики порівняння за ексергетичною ефективністю та рівнем технологічної готовності [6]. В. Чен (W. Chen), З. Хуан (Z. Huang), К. Чуа (K. J. Chua) на матеріалі термопроцесів доводять, що сталий процес відновлення енергії (*energy recovery*) потребує поєднання технології відбору з відповідним «споживачем» теплоти та тепловою логістикою (акумулявання, каскадування) для мінімізації втрат ексергії та зменшення простоїв [7].

Е. Гарофало (E. Garofalo), М. Бевіоне (M. Bevilone), Л. Чеккіні (L. Cecchini) та співавтори конкретизують клас «waste-heat-to-power» технологій і демонструють нішеві та масові застосування Organic Rankine Cycle (органічного циклу Ренкіна) ORC/Каліни/термоелектрики, окреслюючи діапазони температур, питомі потужності й економічні обмеження для промислових майданчиків [8]. Узагальнення за напрямом: необхідні порівняльні польові дослідження «технологія-до-джерела» з повною тепловою інвентаризацією, оцінкою незворотностей і деградації коефіцієнта корисної дії (ККД) упродовж життєвого циклу, а також стандартизація профілів джерел низькопотенційного тепла для швидкого підбору технологічних рішень.

Третій напрям присвячений інтеграції низькопотенційного тепла в архітектуру енергохабів та плануванню інтегрованих енергосистем. М. Россі (M. Rossi), Л. Цзін (L. Jin), А. Ферраріо (A. Ferrario) та співавтори описують енергохаби та мікро-енергохаби в локальних енергоспільнотах, де низькопотенційне тепло моделюється як керований ресурс у мультивекторній системі (тепло, електрика, холод), що підвищує автономність підприємств і дозволяє оптимізувати розклад роботи обладнання [9]. Ц. Дін (C. Ding), С. Чжан (X. Zhang), Г. Лян (G. Liang) та співавтори пропонують ексергетично орієнтоване планування інтегрованих енергосистем із промисловою рекуперацією, показуючи, що максимізація корисної роботи замість простої енергії забезпечує ефективніші рішення щодо відбору теплообмінних мереж, насосів та генерації [10]. М. Акашах (M. Akashah), Н. Розалі (N. Rozali), С. Махадзір (S. Mahadzir) та співавтори систематизують використання «холоду» регазифікації скрапленого природного газу (СПГ) як цінного низькопотенційного ресурсу для холодопостачання, кріопроцесів і комбінованого виробництва холоду та електрики, що відкриває нетривіальні зв'язки між газовою логістикою та локальною автономією підприємств [11]. Дж. Ю (J. Yu), І. Ся (Y. Xia), Л. Чен (L. Chen) та співавтори демонструють процесно-інтегрований (Air-Carried Evaporating Separation Cycle) ACES-цикл для повного відновлення розсолів за рахунок тепла процесу при нормальних температурах, поєднуючи рекуперацію низькопотенційного тепла із водними та матеріальними потоками і створюючи додану вартість через безтінтність [12]. Узагальнення за напрямом: перспективним є поєднання ексергетичного планування з мультиоб'єктивною оптимізацією капітальних та експлуатаційних витрат, викидів та надійності, а також спільне проєктування (co-design) теплових, холодових та водних контурів енергохабів; потрібні

цифрові близнюки на рівні цехів із верифікацією за реальними диспетчерськими даними. Четвертий напрям фокусується на перетворювальних технологіях і новітніх пристроях для збору низькопотенційного тепла. М. Бхуйан (M. Bhuiyan), Х. Мамур (H. Mamur), М. Устюнєр (M. Üstüner) та співавтори окреслюють сучасний стан термоелектричних генераторів для рекуперації тепла у широкому температурному діапазоні, підкреслюючи матеріалознавчі бар'єри (ЗТ, стабільність контактів), модульну інтеграцію на поверхні обладнання та економіку малої потужності [13]. Ф. Гун (F. Gong), Х. Лі (H. Li), Дж. Хуан (J. Huang) та співавтори демонструють біоміметичний м'який актуатор для збору розсіяної пари низького тиску з перетворенням її в електроенергію, що відкриває шлях до «розподіленого мікрозбору» тепла у важкодоступних ділянках технологічних ліній [14]. В. Чу (W. Chu), М. Вічідоміні (M. Vicidomini), Ф. Калізе (F. Calise) та співавтори підсумовують методологічні та економічні підходи до стійких енергетичних систем, релевантні для проєктів рекуперації: від порівняння термотехнологій і сценарного аналізу до інтеграції з водними та екологічними показниками, що дозволяє вбудовувати пристрої у ширші «енерго-вододовкілля» рамки [15]. У цьому напрямі доцільно просувати прикладні дослідження гібридних перетворювачів (термоелектрика+ORC, сорбція+теплові насоси), довготривалі випробування на реальних об'єктах із моделями деградації та створення бібліотек «plug-and-play» модулів для ретрофіту.

Попри значні дослідження у сфері рекуперації низькопотенційного тепла, невирішеними залишаються питання комплексного аналізу фізико-технічних характеристик джерел теплових втрат, оцінки їхнього реального енергетичного потенціалу та визначення оптимальних підходів інтеграції систем у наявну виробничу інфраструктуру. Додатково відзначаються прогалини в дослідженні економічної ефективності застосування таких технологій для підприємств різних галузей, а також у подоланні бар'єрів, пов'язаних із високими капітальними витратами, браком кваліфікованих спеціалістів та недосконалістю нормативно-правового регулювання.

Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалин шляхом системного аналізу джерел теплових втрат, виявлення практичних проблем інтеграції та формулювання рекомендацій для підвищення ефективності використання низькопотенційного тепла. Такий підхід забезпечує надання прикладних орієнтирів для промислових підприємств, спрямованих на скорочення енергетичних витрат, зниження залежності від зовнішніх джерел та створення умов для підвищення енергетичної автономності.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є обґрунтування теоретичних і практичних засад рекуперації низькопотенційного тепла технологічних процесів для забезпечення автономного енергопостачання промислових підприємств та визначення ефективних напрямів його використання в умовах сучасних викликів енергетичної безпеки.

Для досягнення поставленої мети передбачено вирішення таких **завдань**:

1. Дослідити фізико-технічні характеристики джерел низькопотенційного тепла та обґрунтувати оптимальні принципи їхньої інтеграції у виробничу інфраструктуру.
2. Оцінити економічну ефективність рекуперації низькопотенційного тепла та виявити ключові бар'єри впровадження рекупераційних технологій.
3. Розробити практичні рекомендації щодо підвищення ефективності використання низькопотенційного тепла для забезпечення енергетичної автономності підприємств.

Викладення основного матеріалу дослідження

У промислових технологічних процесах низькопотенційне тепло є побічним продуктом, що утворюється внаслідок охолодження обладнання, втрат у теплопередачі або скидання відпрацьованих газів та рідин. Це тепло традиційно розсіюється в навколишнє середовище, проте воно має значний енергетичний потенціал для повторного використання. Його дослідження передбачає аналіз фізико-технічних характеристик, які визначають можливості рекуперації та подальшої трансформації у корисну енергію. До ключових параметрів належать температура джерела, тепловий потік, агрегатний стан середовища та стабільність його тепловіддачі. Саме поєднання цих характеристик визначає доцільність вибору конкретного технологічного рішення для впровадження систем рекуперації (табл. 1).

Таблиця 1

Основні фізико-технічні характеристики джерел низькопотенційного тепла у виробничих процесах

Джерело тепла	Тип середовища	Температурний діапазон, °С	Орієнтовний тепловий потік, кВт·год/рік	Особливості використання
Відпрацьовані гази	Газоподібне	80–250	10 000–50 000	Необхідне попереднє очищення від домішок і пилу
Охолоджувальні рідини	Рідинне	40–120	5 000–30 000	Доцільне використання теплових насосів
Технологічні стоки	Рідинне	30–90	2 000–15 000	Використання для підігріву водопостачання
Поверхнєве випромінювання обладнання	Тверде середовище/поверхні	25–80	1 000–8 000	Рекомендована ізоляція та застосування локальних рекуператорів

Джерело: сформовано авторами на підставі [2, с. 42–44; 3, с. 47; 5, с. 2740–2742; 10, с. 148080–148082]

Відпрацьовані гази промислових печей та сушильних установок є найбільш концентрованим джерелом низькопотенційного тепла, однак вимагають попереднього очищення від твердих частинок та агресивних сполук, що ускладнює процес рекуперації. Використання сучасних багатоступеневих фільтраційних систем дозволяє інтегрувати їх у контури теплообміну без шкоди для обладнання. Охолоджувальні рідини, які циркулюють у компресорних станціях, холодильних установках та технологічних лініях, характеризуються стабільними параметрами і добре піддаються перетворенню через теплові насоси, що робить їх особливо привабливими для систем опалення та кондиціонування виробничих площ [12]. Технологічні стоки, характерні для харчової та хімічної промисловості, мають нижчі температурні показники, проте їхній великий обсяг та постійність надходження створюють умови для ефективного використання у системах гарячого водопостачання. Поверхнєве випромінювання від корпусів машин, котлів чи конвеєрних ліній часто недооцінюють, хоча сучасні локальні рекуператори та інфрачервоні панелі дають змогу акумулювати цю енергію та спрямовувати її для підтримки мікроклімату у виробничих зонах [7]. У сукупності ці приклади демонструють, що низькопотенційне тепло, яке раніше вважали лише побічним продуктом виробництва, сьогодні може бути перетворене на стратегічний ресурс енергоефективності, знижуючи витрати на зовнішнє енергопостачання та підвищуючи автономність промислових підприємств.

Інтеграція систем рекуперації низькопотенційного тепла у виробничу інфраструктуру вимагає комплексного підходу, що враховує як технічні, так і організаційні аспекти. З одного боку, йдеться про сумісність рекупераційних установок із наявним обладнанням, оптимізацію теплових потоків та забезпечення стабільності технологічних режимів. З іншого – про необхідність адаптації управлінських процесів, регламентів експлуатації та економічного обґрунтування впровадження. Коректне визначення принципів інтеграції дозволяє уникнути порушення виробничих циклів, підвищити ефективність енергоспоживання та мінімізувати додаткові витрати (табл. 2).

Таблиця 2

Принципи інтеграції систем рекуперації у виробничу інфраструктуру

Принцип інтеграції	Технічна характеристика	Організаційна складова	Очікуваний ефект
Сумісність з технологічним обладнанням	Вибір теплообмінників та насосів, що відповідають параметрам наявних ліній	Розробка регламентів технічного обслуговування	Безперервність виробництва
Гнучкість теплових потоків	Використання буферних ємностей та акумуляторів тепла	Планування графіків навантаження	Стабільність енергопостачання
Модульність та масштабованість	Побудова системи з окремих блоків, які легко додати чи демонтувати	Можливість поетапного фінансування	Зниження інвестиційних ризиків
Автоматизація керування	Інтеграція з системами диспетчерського контролю та збору даних (далі SCADA) та система планування ресурсів підприємства (далі --ERP)	Навчання персоналу роботи з цифровими інтерфейсами	Оптимізація витрат та контроль
Економічна доцільність	Баланс між вартістю обладнання та очікуваним енергозбереженням	Використання механізмів енергетичного аудиту	Скорочення собівартості продукції

Джерело: сформовано авторами на підставі [1; 4, с. 200–201; 6; 7; 9]

Реалізація принципу сумісності на практиці означає, що нові рекупераційні модулі не повинні порушувати логіку вже сформованих виробничих циклів. У металургії це досягається встановленням теплообмінників безпосередньо у газоходах доменних печей, що дозволяє відбирати тепло для підігріву шихти без зміни основних параметрів плавки. Гнучкість теплових потоків проявляється у здатності компенсувати коливання навантажень: у харчовій промисловості буферні ємності згладжують перепади, що виникають у процесі пастеризації чи охолодження, зберігаючи рівномірність енергопостачання. Принцип модульності особливо цінний для підприємств із нестабільним фінансуванням: впровадження відбувається поетапно, починаючи з базових модулів та поступово розширюючись до повноцінних систем [9]. Автоматизація інтеграції забезпечує якісно новий рівень керованості, коли дані про теплові потоки в режимі реального часу синхронізуються з виробничими та фінансовими показниками підприємства, створюючи можливості для точного прогнозування й планування. Нарешті, економічна доцільність не обмежується лише окупністю: системи рекуперації формують нову культуру енерговикористання, де тепло перестає бути відходом і перетворюється на актив, що знижує собівартість продукції та посилює конкурентні позиції підприємства.

Економічна доцільність рекуперації низькопотенційного тепла визначається передусім здатністю підприємства зменшити витрати на енергоносії та підвищити рівень автономності енергопостачання. Важливою особливістю є те, що вигода проявляється по-різному залежно від галузі та масштабу виробництва. Для енергоемних підприємств стратегічним чинником стає значне скорочення паливних витрат, тоді як для малих і середніх виробництв вирішальне значення мають стабільність і передбачуваність енергозабезпечення. Таким чином, доцільність використання рекупераційних технологій не слід розглядати лише в категоріях окупності, але й у ширшому контексті економічної стійкості та конкурентоспроможності (табл. 3).

Таблиця 3

Економічна доцільність застосування рекупераційних технологій у різних типах підприємств

Тип підприємства	Характеристика використання рекуперації	Основний економічний ефект	Стратегічне значення
Металургійні комбінати	Відбір тепла від газоходів та печей для підігріву сировини	Значне скорочення витрат на паливо	Формування конкурентних переваг у висококонкурентній галузі
Хімічні заводи	Використання тепла реакторів і стоків у виробничих циклах	Зменшення витрат на утилізацію і повторне залучення енергії	Підвищення ефективності технологічних процесів
Харчові підприємства	Рекуперація тепла охолоджувальних рідин і стоків	Швидке зниження операційних витрат	Забезпечення стабільності енергопостачання
Деревообробні підприємства	Використання тепла сушильних камер і відпрацьованих газів	Оптимізація витрат на газ	Підвищення ефективності основних технологічних процесів
Машинобудівні підприємства	Використання тепла охолоджувальних систем і обладнання	Зменшення витрат на опалення виробничих приміщень	Поліпшення умов праці та якості продукції

Джерело: сформовано авторами на підставі [8; 11; 12; 13, с. 897–901; 14; 15]

Для великих металургійних комбінатів ключовим є те, що відбір тепла з доменних або мартенівських печей не лише скорочує споживання палива, а й забезпечує дотримання жорстких екологічних нормативів, оскільки знижується інтенсивність викидів CO₂ [6]. У хімічних виробництвах повторне використання тепла від реакторних процесів і технологічних стоків дозволяє зменшити навантаження на очисні споруди та одночасно підвищити ефективність основних виробничих циклів. Це демонструє подвійний економічний ефект: економію енергії та зменшення витрат на рекуперацію.

Харчова промисловість вирізняється найшвидшою окупністю таких рішень, адже відбір тепла від охолоджувальних установок чи пастеризаційних ліній стабільно використовується для опалення приміщень і гарячого водопостачання. У результаті навіть середні за масштабом підприємства отримують можливість зменшити залежність від газових котелень та підвищити конкурентоспроможність продукції за рахунок нижчих операційних витрат. Деревообробні підприємства, особливо ті, що займаються сушінням пиломатеріалів, інтегрують системи утилізації тепла від сушильних камер, що дозволяє не лише оптимізувати витрати на енергоносії, а й підвищити якість готової продукції завдяки більш стабільному режиму сушіння. У машинобудуванні рекуперацію тепла від охолоджувальних систем важкого обладнання використовують для обігріву цехів, створюючи комфортні умови праці та одночасно знижуючи енергетичні витрати на вентиляцію і опалення.

Упровадження систем рекуперації низькопотенційного тепла у виробництво обмежується комплексом проблем, що формують взаємопов'язані бар'єри. Найпомітнішими є високі капітальні витрати: сучасні теплообмінники, системи очищення газів та автоматизованого керування потребують значних інвестицій, що для малих і середніх підприємств без доступу до пільгового фінансування стає критичною перешкодою [2, с. 42–44]. До цього додається технологічна складність інтеграції: рекупераційні установки мають працювати у вже сформованих циклах із жорсткими параметрами температури та тиску, і будь-які відхилення можуть вплинути на якість продукції або безперервність процесу [10, с. 148080–148082].

Організаційні проблеми зумовлені браком підготовлених фахівців: більшість підприємств не мають енергоменеджерів, а персонал орієнтований на традиційні теплотехнічні системи. Як наслідок, обладнання експлуатується нижче розрахункових можливостей і швидше виводиться з експлуатації [3, с. 47]. Додатково розвиток стримує відсутність чіткої нормативно-правової бази: стандарти інтеграції та механізми стимулювання залишаються фрагментарними, що створює невизначеність для інвесторів та управлінців [15].

Не менш суттєвими є експлуатаційні обмеження. Відпрацьоване тепло часто має низьку та нестабільну температуру, через що потрібні додаткові системи, зокрема теплові насоси та акумулятори, які подовжують строк окупності [6]. Проблемаю є також необхідність модернізації допоміжної інфраструктури: трубопроводів, теплоізоляції та систем автоматичного регулювання, без яких ефективність рекуперації значно знижується [9]. Нарешті, суттєвим ризиком є простої під час монтажу: зупинка технологічних ліній для інтеграції обладнання призводить до втрат продуктивності, що неприпустимо для підприємств із безперервним циклом [14].

Ефективне використання низькопотенційного тепла як інструмента автономного енергозабезпечення підприємств вимагає комплексного поєднання технічних, організаційних та управлінських рішень, здатних забезпечити максимальну віддачу від наявних теплових ресурсів. Практика демонструє, що першочерговим завданням є впровадження систем енергетичного моніторингу, які дозволяють виявляти та кількісно оцінювати теплові втрати на різних етапах виробничих процесів. Це створює підґрунтя для раціонального підбору технологій рекуперації та прогнозування ефекту їхнього застосування.

Другим важливим напрямом є інтеграція рекупераційних систем із внутрішніми енергетичними контурами підприємства. Використання відпрацьованого тепла для підігріву сировини, опалення приміщень чи забезпечення гарячого водопостачання дозволяє скорочувати залежність від зовнішніх джерел енергії та знижувати

собівартість продукції. У багатьох випадках ефективність такого підходу посилюється завдяки застосуванню теплових насосів і теплоакумулювальних установок, що забезпечують стабільний тепловий баланс навіть за умов нерівномірного надходження тепла.

Значну роль відіграє цифровізація управління тепловими потоками. Використання автоматизованих систем керування на базі SCADA або ERP дає змогу інтегрувати рекупераційні рішення у загальну виробничу інфраструктуру, оптимізуючи розподіл енергії в реальному часі. Це не лише підвищує енергоефективність, а й мінімізує ризики аварійних ситуацій та забезпечує формування достовірної бази даних для стратегічного планування.

Організаційна складова включає підготовку персоналу та розвиток внутрішніх компетентностей у сфері енергоменеджменту. Наявність фахівців, здатних аналізувати теплові баланси, ухвалювати рішення щодо модернізації обладнання та контролювати роботу систем рекуперації, є передумовою стабільності та довготривалого ефекту від інвестицій. У поєднанні з цим актуальним є створення механізмів фінансового стимулювання, зокрема через податкові пільги або цільові програми підтримки підприємств, що впроваджують енергоефективні технології.

Таким чином, максимальний ефект від використання низькопотенційного тепла досягається тоді, коли технічні рішення підкріплені організаційними заходами та підтримані економічними інструментами. Системна інтеграція рекупераційних технологій у виробничу та управлінську інфраструктуру перетворює їх на потужний фактор енергетичної автономності підприємств, здатний забезпечити стійкість до зовнішніх викликів і сформувати новий рівень конкурентоспроможності.

Висновки

У дослідженні доведено, що рекуперація низькопотенційного тепла промислових процесів може слугувати надійним джерелом автономного енергозабезпечення підприємств. Установлено, що навіть джерела з невисокими температурними параметрами здатні забезпечувати суттєвий енергетичний ефект за умови коректної інтеграції у виробничі контури. Сформульовано принципи впровадження таких систем, які поєднують технічну сумісність, гнучкість теплових потоків, модульність та цифрове управління, що дозволяє знизити залежність від зовнішніх ресурсів і водночас підвищити конкурентоспроможність.

Виявлено основні обмеження: значні інвестиційні витрати, технологічні труднощі інтеграції у наявні цикли, нестача кваліфікованих кадрів та відсутність належної нормативно-правової підтримки. Саме ці чинники залишаються ключовими бар'єрами для широкого впровадження рекупераційних технологій у промисловості.

Рекомендовано розвивати системи енергетичного моніторингу, впроваджувати теплові насоси та акумуляційні установки, підвищувати рівень цифровізації управління енергією, готувати спеціалізованих фахівців і формувати фінансові стимули для підприємств-інвесторів. Перспективи подальших досліджень полягають у створенні моделей штучного інтелекту для керування тепловими потоками, розвитку сенсорних технологій моніторингу та формуванні уніфікованих стандартів оцінки ефективності таких систем.

Список використаної літератури

1. Pavlovskiy M. The Improvement of Fuel Efficiency and Environmental Characteristics of Diesel Engine by Using Biodiesel Fuels. In: Boichenko S., Zaporozhets A., Yakovlieva A., Shkilniuk I. (eds) *Modern Technologies in Energy and Transport. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 510. Springer, Cham. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4
2. Korostin O. O. Approaches to reducing the carbon footprint in training large ML models. *Taurida Scientific Herald. Series: Technical Sciences*. 2025. № 1. P. 40–51. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.5>
3. Chmielarz P. Problematyka mediacji w sprawach społecznych i gospodarczych. *Studia Politologica*. 2022. Vol. 28, № 370. P. 45–60. URL: <https://studiapolitologica.uken.krakow.pl/article/view/10777> (date of access: 10.09.2025).
4. Chmielarz P. Analiza bezpieczeństwa energetycznego Rzeczypospolitej Polskiej w zakresie dostaw gazu ziemnego w latach 2015–2021 w powiązaniu z działaniami politycznymi oraz prawnymi. *Rocznik Integracji Europejskiej*. 2023. № 17. P. 197–206. DOI: <https://doi.org/10.14746/rie.2023.17.12>
5. Liu D., Zhao F. Y., Tang G. F. Active low-grade energy recovery potential for building energy conservation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol. 14, № 9. P. 2736–2747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.005>
6. Ji D., Liu G., Romagnoli A., Rajoo S., Besagni G., Markides C. N. Low-grade thermal energy utilization: Technologies and applications. *Applied Thermal Engineering*. 2024. Vol. 244. Article 122618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122618>
7. Chen W., Huang Z., Chua K. J. Sustainable energy recovery from thermal processes: a review. *Energy, Sustainability and Society*. 2022. Vol. 12, № 46. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00372-2>
8. Garofalo E., Bevione M., Cecchini L., Mattiussi F., Chiolerio A. Waste heat to power: Technologies, current applications, and future potential. *Energy Technology*. 2020. Vol. 8, № 11. Article 2000413. DOI: <https://doi.org/10.1002/ente.202000413>

9. Rossi M., Jin L., Monforti Ferrario A., Di Somma M., Buonanno A., Papadimitriou C., Comodi G. Energy hub and micro-energy hub architecture in integrated local energy communities: enabling technologies and energy planning tools. *Energies*. 2024. Vol. 17, № 19. Article 4813. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17194813>
10. Ding C., Zhang X., Liang G., Feng J. Optimizing Exergy Efficiency in Integrated Energy System: A Planning Study Based on Industrial Waste Heat Recovery. *IEEE Access*. 2024. Vol. 12. P. 148074–148089. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3468291>
11. Noor Akashah M. H., Mohammad Rozali N. E., Mahadzir S., Liew P. Y. Utilization of cold energy from LNG regasification process: a review of current trends. *Processes*. 2023. Vol. 11, № 2. Article 517. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11020517>
12. Yu J., Xia Y., Chen L., Yan W., Liu B., Jin S. Full recovery of brines at normal temperature with process-heat-supplied coupled air-carried evaporating separation (ACES) cycle. *npj Clean Water*. 2024. Vol. 7, № 1. Article 133. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41545-024-00430-6>
13. Bhuiyan M. R. A., Mamur H., Üstüner M. A., Dilmaç Ö. F. Current and future trend opportunities of thermoelectric generator applications in waste heat recovery. *Gazi University Journal of Science*. 2022. Vol. 35, № 3. P. 896–915. DOI: [10.35378/gujs.934901](https://doi.org/10.35378/gujs.934901)
14. Gong F., Li H., Huang J., Jing Y., Hu Z., Xia D., Xiao R. Low-grade energy harvesting from dispersed exhaust steam for power generation using a soft biomimetic actuator. *Nano Energy*. 2022. Vol. 91. Article 106677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106677>
15. Chu W., Vicidomini M., Calise F., Duić N., Østergaard P. A., Wang Q., da Graça Carvalho M. Recent advances in technologies, methods, and economic analysis for sustainable development of energy, water, and environment systems. *Energies*. 2022. Vol. 15, № 19. Article 7129. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15197129>

References

1. Pavlovskiy, M. (2024). The improvement of fuel efficiency and environmental characteristics of diesel engine by using biodiesel fuels. In S. Boichenko, A. Zaporozhets, A. Yakovlieva, & I. Shkilniuk (Eds.), *Modern technologies in energy and transport*. Studies in Systems, Decision and Control, vol. 510. Cham: Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44351-0_4
2. Korostin, O. O. (2025). Approaches to reducing the carbon footprint in training large ML models. *Taurida Scientific Herald. Series: Technical Sciences*, (1), 40–51. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.1.5>
3. Chmielarz, P. (2022). Problematyka mediacji w sprawach społecznych i gospodarczych [Problems of mediation in social and economic matters]. *Studia politologica – Political science studies*, 28(370), 45–60. Retrieved from <https://studiapolitologica.uken.krakow.pl/article/view/10777> [in Polish].
4. Chmielarz, P. (2023). Analiza bezpieczeństwa energetycznego Rzeczypospolitej Polskiej w zakresie dostaw gazu ziemnego w latach 2015–2021 w powiązaniu z działaniami politycznymi oraz prawnymi [Analysis of Poland's energy security regarding natural gas supply in 2015–2021 in connection with political and legal actions]. *Rocznik integracji europejskiej – Yearbook of european integration*, 17, 197–206. DOI: <https://doi.org/10.14746/rie.2023.17.12> [in Polish].
5. Liu, D., Zhao, F. Y., & Tang, G. F. (2010). Active low-grade energy recovery potential for building energy conservation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2736–2747. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.005>
6. Ji, D., Liu, G., Romagnoli, A., Rajoo, S., Besagni, G., & Markides, C. N. (2024). Low-grade thermal energy utilization: Technologies and applications. *Applied thermal engineering*, 244, 122618. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.122618>
7. Chen, W., Huang, Z., & Chua, K. J. (2022). Sustainable energy recovery from thermal processes: A review. *Energy, Sustainability and Society*, 12(46). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00372-2>
8. Garofalo, E., Beviere, M., Cecchini, L., Mattiussi, F., & Chiolerio, A. (2020). Waste heat to power: Technologies, current applications, and future potential. *Energy technology*, 8(11), 2000413. DOI: <https://doi.org/10.1002/ente.202000413>
9. Rossi, M., Jin, L., Monforti Ferrario, A., Di Somma, M., Buonanno, A., Papadimitriou, C., & Comodi, G. (2024). Energy hub and micro-energy hub architecture in integrated local energy communities: Enabling technologies and energy planning tools. *Energies*, 17(19), 4813. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17194813>
10. Ding, C., Zhang, X., Liang, G., & Feng, J. (2024). Optimizing exergy efficiency in integrated energy system: A planning study based on industrial waste heat recovery. *IEEE Access*, 12, 148074–148089. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3468291>
11. Noor Akashah, M. H., Mohammad Rozali, N. E., Mahadzir, S., & Liew, P. Y. (2023). Utilization of cold energy from LNG regasification process: A review of current trends. *Processes*, 11(2), 517. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11020517>
12. Yu, J., Xia, Y., Chen, L., Yan, W., Liu, B., & Jin, S. (2024). Full recovery of brines at normal temperature with process-heat-supplied coupled air-carried evaporating separation (ACES) cycle. *npj Clean water*, 7(1), 133. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41545-024-00430-6>

13. Bhuiyan, M. R. A., Mamur, H., Üstüner, M. A., & Dilmaç, Ö. F. (2022). Current and future trend opportunities of thermoelectric generator applications in waste heat recovery. *Gazi university journal of science*, 35 (3), 896–915. DOI: <https://doi.org/10.35378/gujs.934901>
14. Gong, F., Li, H., Huang, J., Jing, Y., Hu, Z., Xia, D., & Xiao, R. (2022). Low-grade energy harvesting from dispersed exhaust steam for power generation using a soft biomimetic actuator. *Nano energy*, 91, 106677. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106677>
15. Chu, W., Vicidomini, M., Calise, F., Duić, N., Østergaard, P. A., Wang, Q., & da Graça Carvalho, M. (2022). Recent advances in technologies, methods, and economic analysis for sustainable development of energy, water, and environment systems. *Energies*, 15(19), 7129. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15197129>

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.09.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 24.10.2025

Дата публікації: 28.11.2025