

СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ І СИСТЕМ ХОЛОДОПОСТАЧАННЯ ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ: ОГЛЯД ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ

Отримано 04 трав. 2026 р.; рекомендовано до публікації 26 чер. 2026 р.
Доступно онлайн 30 чер. 2026 р.

Перепелиця І. В.¹, Зур'ян О. В.²

Автор для кореспонденції: Зур'ян Олексій,
e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

¹ аспірант

<https://orcid.org/0009-0000-9724-8368>

² д-р. техн. наук

<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

^{1,2} Інститут відновлюваної енергетики
НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. У статті виконано систематизований огляд сучасних технологічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності фармацевтичних підприємств, які характеризуються значним рівнем споживання теплової та холодильної енергії, безперервним режимом роботи інженерних систем і високими вимогами до стабільності параметрів мікроклімату відповідно до стандартів GMP. Метою роботи є аналіз сучасних підходів до модернізації систем теплохолодопостачання фармацевтичних виробництв, оцінка можливостей їх практичного застосування та визначення перспективних напрямів розвитку галузі.

Огляд джерел літератури виконано на основі публікацій міжнародних наукометричних баз даних, галузевих технічних матеріалів та сучасних прикладних досліджень. Проведено порівняльний аналіз технологій утилізації скидної теплоти, Free Cooling, теплових насосів, систем акумулювання енергії, SCADA-керування та прогнозного регулювання енергоспоживання.

Показано, що значний потенціал енергозбереження мають системи рекуперації теплоти холодильного обладнання та інтеграція теплових насосів, які дають змогу використовувати вторинні енергетичні ресурси для покриття потреб у теплопостачанні. Встановлено, що технологія Free Cooling є одним з найбільш швидкоокупних рішень для підприємств з постійним холодильним навантаженням. Обґрунтовано доцільність використання систем акумулювання енергії для зменшення пікових навантажень та підвищення надійності енергозабезпечення. Показано, що впровадження SCADA-систем і алгоритмів інтелектуального керування забезпечує додаткове зниження енергоспоживання за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання.

За результатами дослідження встановлено, що найефективнішим підходом для фармацевтичної галузі є комплексна поетапна модернізація енергетичної інфраструктури з поєднанням технічних, цифрових та організаційних рішень. Отримані результати можуть бути використані під час розроблення програм декарбонізації та підвищення енергоефективності фармацевтичних підприємств.

Ключові слова: Free Cooling, тепловий насос, тригенерація, термічні накопичувачі, енергоефективність, фармацевтична промисловість, SCADA, декарбонізація.

Перелік використаних позначень та скорочень

ВДЕ – відновлювані джерела енергії

ТН – тепловий насос

ПЗ – програмне забезпечення

COP – коефіцієнт продуктивності теплового насоса (Coefficient of Performance), що є відношенням кількості

тепла, яке насос подає в систему, до кількості споживаної енергії

ГВП – гаряче водопостачання

АСУ – автоматизована система управління

FREECOOLING – холодильна система, яка передбачає режим природного охолодження

Вступ

Фармацевтичні підприємства належать до категорії промислових об'єктів з підвищеним рівнем енергоспоживання, що обумовлено високими вимогами до стабільності технологічних процесів, параметрів мікроклімату та санітарно-гігієнічних умов виробництва. На відміну від багатьох інших галузей промисловості, фармацевтичне виробництво потребує одночасного забезпечення

значних навантажень як на системи теплопостачання, так і на системи холодопостачання, вентиляції та кондиціонування повітря.

Виробничі приміщення, чисті зони, лабораторії, склади сировини та готової продукції потребують безперервного підтримання регламентованих параметрів температури, вологості, кратності повітрообміну та ступеня очищення повітря відповідно до вимог GMP та суміжних

галузевих стандартів. Це призводить до цілорічної роботи інженерних систем, значного електроспоживання холодильного обладнання та суттєвих витрат теплової енергії.

У структурі енергоспоживання фармацевтичних підприємств важливе місце займають системи холодопостачання, які забезпечують технологічне охолодження, кондиціювання повітря та підтримання температурних режимів зберігання продукції. Під час роботи холодильного обладнання значна кількість теплоти відводиться в навколишнє середовище через конденсаторні контури або системи охолодження. Здебільшого ця теплота не використовується, хоча може розглядатися як вторинний енергетичний ресурс.

В умовах зростання вартості енергоресурсів, посилення вимог щодо скорочення викидів парникових газів та необхідності підвищення енергетичної стійкості підприємств особливої актуальності набуває впровадження технологій утилізації скидної теплоти, Free Cooling, теплових насосів, систем акумулювання енергії та автоматизованого керування енергоспоживанням [1–5, 28–33].

Сучасні дослідження свідчать, що інтеграція систем генерації тепла і холоду дає змогу суттєво підвищити коефіцієнт використання первинної енергії, знизити споживання природного газу та скоротити експлуатаційні витрати [6–10, 29–33]. Водночас питання адаптації таких рішень саме до фармацевтичних підприємств потребує додаткового узагальнення, оскільки цю галузь має специфічні вимоги до надійності, резервування та безперервності виробничих процесів.

У зв'язку з цим метою роботи є систематизація сучасних технологічних рішень у сфері утилізації теплоти та холодопостачання, оцінка можливостей їх застосування на фармацевтичних підприємствах, а також визначення перспективних напрямів підвищення енергоефективності таких об'єктів.

Огляд джерел літератури виконано з метою систематизації сучасних підходів до підвищення енергоефективності промислових об'єктів зі значним тепловим та холодильним навантаженням, зокрема фармацевтичних підприємств.

Пошук наукових публікацій здійснювався у міжнародних наукометричних та інформаційних базах даних Scopus, Science Direct, Web of Science, Google Scholar, а також у відкритих галузевих джерелах і технічних звітах виробників обладнання. Основний часовий діапазон пошуку охоплював період 2018–2026 років, що дало змогу врахувати сучасні тенденції розвитку енергетичних технологій.

Для відбору джерел використовувалися такі ключові слова та їх комбінації:

- heat recovery;
- waste heat utilization;
- pharmaceutical HVAC;

- industrial cooling systems;
- free cooling;
- heat pump integration;
- trigeneration;
- SCADA energy management;
- thermal storage;
- decarbonization of industry.

На початковому етапі було ідентифіковано понад 70 джерел. Після попереднього аналізу змісту, вилучення дубльованих матеріалів, нерелевантних публікацій та джерел з недостатнім рівнем технічної деталізації до поглибленого аналізу було відібрано 33 найрелевантніших джерел.

Критеріями відбору були:

- наявність кількісної оцінки енергетичного ефекту;
- практична реалізація або дослідне моделювання систем;
- відповідність промисловим або близьким до промислових умовам експлуатації;
- наявність даних щодо економічної ефективності або технічних обмежень.

Для систематизації відібраних матеріалів застосовано метод порівняльного аналізу, за яким технології оцінювалися за такими критеріями:

- потенціал енергозбереження;
- складність інтеграції;
- рівень технологічної зрілості;
- потреба в капітальних витратах;
- доцільність використання у фармацевтичній галузі.

Отримані результати стали основою для формування класифікації сучасних технологічних рішень та визначення перспективних напрямів їх впровадження.

Виклад основного матеріалу

Фармацевтичні підприємства належать до групи промислових об'єктів зі складною структурою енергоспоживання, що обумовлено поєднанням технологічних, санітарно-гігієнічних та регуляторних вимог до виробничих процесів. На відміну від багатьох інших галузей промисловості, енергетичні системи фармацевтичного виробництва повинні забезпечувати не лише подачу теплової та електричної енергії, але й стабільне підтримання параметрів внутрішнього середовища у широкому спектрі приміщень.

Значна частка енергоспоживання припадає на системи вентиляції, кондиціювання повітря та холодопостачання. Це пов'язано з необхідністю безперервного підтримання температури, відносної вологості, чистоти повітря та перепадів тиску у виробничих зонах, лабораторіях, стерильних приміщеннях і складських комплексах. Для окремих категорій приміщень допускаються лише незначні відхилення параметрів мікроклімату, що потребує цілодобової роботи кліматичного обладнання.

Суттєвою особливістю фармацевтичних підприємств є наявність одночасного попиту як на теплову, так і на холодильну енергію протягом року. Теплова енергія використовується для гарячого водопостачання, технологічного нагріву, роботи вентиляційних установок та підтримання температурного режиму в холодний період року. Холодильна енергія необхідна для кондиціонування приміщень, охолодження технологічного обладнання, підтримання умов зберігання сировини, напівпродуктів та готової продукції.

Часто системи тепlopостачання та холодопостачання проєктуються та експлуатуються незалежно одна від одної, що призводить до нераціонального використання енергії. Зокрема, теплота, яка відводиться холодильними машинами через конденсаторні контури, нерідко скидається в навколишнє середовище без подальшого використання, тоді як паралельно на підприємстві існує потреба у тепловій енергії.

Додатковим фактором, що впливає на структуру енергоспоживання, є високі вимоги до надійності та резервування. Зупинка систем холодопостачання або вентиляції може призвести до порушення технологічних регламентів, втрати якості продукції або простою виробництва. Саме тому на фармацевтичних підприємствах широко застосовуються резервні джерела живлення, дублювання обладнання та багатоконтурні системи енергозабезпечення.

У сучасних умовах підвищення тарифів на енергоресурси, посилення екологічних вимог та необхідності зниження вуглецевого сліду особливого значення набуває оптимізація структури енергоспоживання таких підприємств. Найперспективнішими напрямками є інтеграція систем теплохолодопостачання, використання скидної теплоти, застосування теплових насосів, акумулювання енергії та впровадження інтелектуальних систем керування.

Таким чином, фармацевтичні підприємства характеризуються складним та безперервним характером енергоспоживання, наявністю одночасного попиту на тепло і холод, високими вимогами до стабільності параметрів внутрішнього середовища та підвищеними вимогами до надійності. Саме ці особливості визначають доцільність застосування інтегрованих енергоефективних рішень, які розглядаються у подальших розділах роботи.

Утилізація скидної теплоти в системах холодопостачання

Одним з найперспективніших напрямів підвищення енергоефективності промислових підприємств є використання вторинних енергетичних ресурсів, зокрема скидної теплоти, що утворюється в процесі роботи холодильного та технологічного обладнання. Для фармацевтичних підприємств цей підхід має особливе значення, оскільки системи холодопостачання, вентиляції та кондиціонування функціонують протягом усього року і формують стабільний тепловий потік, який здебільшого не використовується.

Основним джерелом скидної теплоти в холодильних системах є конденсатори компресорних холодильних машин, у яких теплота, відібрана від охолоджуваних середовищ, разом з роботою компресора передається в навколишнє середовище. Температурний рівень такого теплового потоку залежить від типу обладнання та режиму роботи системи і зазвичай перебуває в діапазоні, достатньому для подальшого використання після додаткового підвищення температури.

Практика останніх років показує, що скидна теплота холодильних установок може ефективно використовуватися для забезпечення гарячого водопостачання, підігріву припливного повітря, технологічного нагріву, попереднього нагрівання води та покриття частини навантаження систем опалення. Найдоцільнішим є її використання у випадках одночасної наявності попиту на холод і тепло, що характерно саме для фармацевтичних виробництв

Аналіз джерел [1–4, 7, 28, 33] дає змогу класифікувати ключові ресурси для вторинного використання та методи їх інтеграції в теплову мережу підприємства.

Класифікація джерел вторинної енергії:

Серед технічних рішень з утилізації теплоти найпоширенішими є:

- пряме використання теплоти конденсації;
- рекуперація через проміжні теплообмінники;
- інтеграція з тепловими насосами;
- комбіновані системи з акумулюванням теплової енергії.

Пряме використання теплоти є найпростішим рішенням, однак воно обмежується температурним рівнем джерела та сезонністю попиту. Значно ширші можливості відкриває застосування теплових насосів, які дають змогу підвищити температуру теплоносія до необхідного рівня та забезпечити гнучкішу інтеграцію в існуючі системи тепlopостачання.

Для фармацевтичних підприємств важливою перевагою утилізації скидної теплоти є можливість зниження навантаження на котельне обладнання та скорочення споживання природного газу без порушення технологічної стабільності виробництва. Оскільки холодильні системи на таких об'єктах працюють безперервно або квазібезперервно, джерело вторинної теплоти є достатньо стабільним і прогнозованим. А саме:

- Теплота конденсації холодильних машин. Найстабільніше джерело, яке у традиційних схемах розсіюється в атмосфері через градирні або повітряні конденсатори. Використання цієї енергії дає змогу не лише отримати «безкоштовне» тепло, а й знизити термічне навантаження на навколишнє середовище [1, 5, 8, 21, 32].
- Скидні води та вентиляційні викиди. Фармацевтичні процеси (стерилізація, промивка обладнання) генерують значні об'єми стічних вод з температурою 30–50 °С. Джерела [3, 8, 15, 16] вказують на високу

ефективність їх використання як первинного контуру для теплових насосів.

- Геотермальний потенціал. Використання ґрунтових вод або закритих зондів як теплового стоку дає змогу стабілізувати роботу систем кондиціонування незалежно від сезонних коливань температури зовнішнього повітря [8, 32, 33].

Водночас впровадження систем утилізації теплоти потребує врахування низки технічних факторів, а саме: відповідність температурних графіків, нерівномірність навантажень, потреба в резервуванні, санітарні вимоги, а також інтеграція з уже існуючими інженерними мережами підприємства.

Дослідження [2, 4, 6, 33] акцентують увагу на переході від прямого теплообміну до складних термодинамічних циклів. Зокрема, розглядаються:

- Сорбційні технології (Абсорбційні та адсорбційні чилери.): Дають змогу перетворювати високопотенційне скидне тепло (наприклад, від когенераційних установок або технологічної пари) безпосередньо в холод. Це критично важливо для підприємств з надлишком теплової енергії в літній період [4, 6, 7, 10, 12, 14, 16, 19, 24].
- Органічний цикл Ренкіна (ORC). Використання низькопотенційного тепла для генерації додаткової електроенергії. Хоча для умов окремого цеху це рішення може бути надлишковим, у масштабах всього заводу воно суттєво підвищує загальний КВВП (коефіцієнт використання встановленої потужності) [4, 10].
- Системи промислового симбіозу. Інтеграція холодильних центрів у загальнозаводську мережу 5-го покоління, де зворотна вода системи охолодження слугує джерелом енергії для підігріву припливного повітря в системах вентиляції чистих приміщень [8, 25, 33].

Уніфікація підходів до утилізації тепла дає змогу не лише скоротити споживання природного газу на потреби ГВП та опалення, а й підвищити ресурс роботи холодильного обладнання за рахунок оптимізації температурних режимів конденсації.

Проведений аналіз джерел літератури показує, що використання скидної теплоти дає змогу знизити загальне енергоспоживання підприємств на 10–30 % залежно від конфігурації системи, структури навантажень та рівня автоматизації. Найбільший ефект досягається в разі комплексного поєднання утилізації теплоти з тепловими насосами та системами інтелектуального керування.

Отже, утилізація скидної теплоти є одним з базових напрямів модернізації енергетичної інфраструктури фармацевтичних підприємств та створює основу для формування інтегрованих систем теплохолодопостачання

Технології Free Cooling

Одним з найдоступніших та економічно доцільних напрямів підвищення енергоефективності систем холодо-

постачання є застосування технології Free Cooling, яка передбачає використання низької температури зовнішнього повітря або інших природних джерел холоду для покриття частини або повного холодильного навантаження без роботи компресорного обладнання.

Для фармацевтичних підприємств ця технологія має особливе значення, оскільки потреба в холоді для кондиціонування, вентиляції, технологічного охолодження та зберігання продукції існує протягом усього року. У перехідний та зимовий періоди зовнішні температурні умови часто дають змогу частково або повністю забезпечувати потребу в холоді без використання традиційних холодильних машин.

Принцип роботи Free Cooling полягає в передаванні холоду від зовнішнього середовища до внутрішнього контуру охолодження через теплообмінники, сухі охолоджувачі (dry coolers), градирні або проміжні гліколеві контури [16, 23, 26, 27, 32]. Залежно від конфігурації системи класифікують за такими ознаками:

- Пряме вільне охолодження (Direct Free Cooling). Подача зовнішнього повітря безпосередньо в приміщення після фільтрації. Попри високу ефективність у фармації цей метод обмежений жорсткими вимогами до чистоти та вологості повітря (стандарти GMP) [23, 32].
- Непряме вільне охолодження (Indirect Free Cooling). Використання проміжного теплоносія (гліколевий контур) або теплообмінників «повітря – повітря». Це дає змогу розділити потоки та забезпечити стерильність зон, зберігаючи високий енергозберігаючий ефект [16, 23, 27, 32].
- Адіабатичне вільне охолодження. Зрошення повітря перед теплообмінником драйкулера (dry cooler), що дає змогу використовувати режим Free Cooling навіть за температур зовнішнього повітря, які на 5–7 °C вищі за стандартну точку переходу [16, 21, 27].

Гібридні схеми

Для фармацевтичних підприємств найдоцільнішим є саме непрямий або гібридний режим, оскільки він забезпечує високий рівень санітарної безпеки, стабільність параметрів та виключає ризики прямого впливу зовнішнього повітря на чисті виробничі зони.

Практичний ефект впровадження Free Cooling полягає у суттєвому зниженні споживання електроенергії компресорним обладнанням у холодний період року. За даними джерел літератури, залежно від кліматичних умов, типу системи та частки річного часу роботи в режимі Free Cooling економія електроенергії може становити від 15 до 45 % [16, 21, 23, 27].

Сучасні дослідження фокусуються на синергії пасивних та активних систем:

- Послідовна гібридизація. Режим, за якого вільне охолодження забезпечує попереднє зниження температури теплоносія, а компресорний чилер

здійснює лише фінальне доохолодження до заданої точки. Це радикально підвищує сумарний коефіцієнт енергоефективності системи (EER) [16, 33].

- Гібридні сонячно-десикантні системи (SDCS). Використання сонячної енергії для регенерації адсорбентів, що осушують повітря, у поєднанні з непрямим випарувальним охолодженням. Такі схеми дають змогу прецизійно контролювати вологість, що є критичним для виробництва твердих лікарських форм [6, 12, 33].
- Інтеграція з ґрунтовими теплообмінниками. Використання стабільної температури ґрунту для попереднього охолодження припливного повітря влітку та підігріву взимку, що нівелює пікові навантаження на мережу [6, 8, 15, 25, 31, 32].

Для умов України ця технологія є особливо перспективною завдяки тривалому опалювальному та перехідному сезонам, протягом яких температура зовнішнього повітря переважно нижче рівня, необхідного для роботи систем охолодження.

Додатковою перевагою Free Cooling є зменшення навантаження на компресори холодильних машин, що сприяє збільшенню ресурсу обладнання, зниженню витрат на сервісне обслуговування та підвищенню загальної надійності системи.

Водночас ефективність Free Cooling залежить від правильного вибору температурних графіків, гідравлічної схеми, системи автоматизації та узгодження з існуючим холодильним обладнанням. Щодо фармацевтичних підприємств важливо також враховувати вимоги до резервування, безперервності роботи й точності підтримання параметрів мікроклімату.

Перспективним напрямом є інтеграція Free Cooling із системами автоматизованого керування, які дають змогу автоматично перемикаєти режими роботи залежно від температури зовнішнього повітря, поточного навантаження та економічних критеріїв експлуатації.

Таким чином, технологія Free Cooling є одним з найбільш швидкоокупних та технічно доцільних заходів модернізації систем холодопостачання фармацевтичних підприємств і може розглядатися як базовий етап подальшої комплексної енергомодернізації.

Теплові насоси та каскадне використання теплоти

Одним з найперспективніших напрямів декарбонізації та підвищення енергоефективності промислових підприємств є використання теплових насосів, які дають змогу перетворювати низькопотенційну теплоту навколишнього середовища або вторинних енергетичних ресурсів на корисну теплову енергію з високим коефіцієнтом ефективності.

Для фармацевтичних підприємств застосування теплових насосів є особливо актуальним у зв'язку з одночасною наявністю значних потреб у тепловій та холодильній енергії. На таких об'єктах джерелами низькопотенційної теплоти можуть виступати конденсаторні конту-

ри холодильних машин, вентиляційні викиди, стічні води, технологічні потоки, а також зовнішнє повітря або ґрунт.

Для фармацевтичних підприємств найперспективнішими є системи типу вода – вода та каскадні теплонасосні установки, оскільки вони дають змогу використовувати стабільні внутрішні джерела скидної теплоти й забезпечувати більш прогнозовані режими роботи порівняно з повітряними системами.

Практичними напрямками використання теплових насосів на фармацевтичних підприємствах є:

- підготовка гарячої води для господарсько-побутових і технологічних потреб;
- підігрів припливного повітря у вентиляційних установках;
- покриття частини навантаження систем опалення;
- рекуперація теплоти холодильного обладнання;
- одночасне виробництво холоду й теплоти в інтегрованих системах.

За результатами опублікованих досліджень, застосування теплових насосів на промислових підприємствах дає змогу скоротити споживання природного газу на 20–60 % залежно від структури навантажень, температурних графіків та рівня інтеграції систем. Найбільший ефект досягається за наявності стабільного внутрішнього джерела низькопотенційної теплоти, що характерно для підприємств з постійним холодильним навантаженням [3, 8, 15, 16, 21, 25, 27–33].

Водночас впровадження теплових насосів потребує врахування низки технічних факторів: температури джерела теплоти, необхідного температурного рівня споживача, сезонної зміни навантаження, режимів резервування та параметрів електроживлення. Для фармацевтичних підприємств додаткове значення мають вимоги до безперервності роботи та можливість дублювання обладнання.

Ключові аспекти застосування ТН:

- Стабілізація коефіцієнта ефективності (COP). Використання оборотної води систем охолодження з відносно стабільною температурою (15–25 °C) як джерела для ТН дає змогу підтримувати високий і прогнозований COP (на рівні 4.5–6.0) незалежно від сезону. Це значно ефективніше за повітряні ТН, ефективність яких падає за від'ємних температур [3, 15, 27–29, 31–33].
- Високотемпературні теплові насоси (НТНР). Джерела [6, 23, 28, 32] описують впровадження каскадних схем, що дають змогу отримувати теплоносії з температурою 80–90 °C для потреб ГВП та попереднього нагріву в системах вентиляції. Це мінімізує використання газових котлів, що є прямим кроком до декарбонізації виробництва.
- Синхронна генерація (Тригенерація). Реалізація концепції, де одна установка одночасно виробляє холод для технологічних ліній та корисне тепло для адміні-

стративних чи допоміжних будівель. Такий підхід дає змогу утилізувати до 100 % теплоти конденсації, яка раніше вважалася втраченою [1, 10, 14, 27, 28, 32].

Перспективним напрямом розвитку є поєднання теплових насосів із системами Free Cooling, акумулювання енергії та автоматизованого керування. У такому разі теплонасосна установка стає частиною інтегрованої енергетичної системи підприємства, що дає змогу оптимізувати витрати енергії та підвищити гнучкість експлуатації.

Отже, теплові насоси є одним з ключових технологічних рішень для модернізації енергетичної інфраструктури фармацевтичних підприємств і можуть забезпечити значний економічний та екологічний ефект за умови правильного вибору джерела теплоти та режимів роботи.

Акумулювання холоду й теплоти

Одним з важливих напрямів підвищення ефективності сучасних енергетичних систем є використання технологій акумулювання енергії, які дають змогу розділити в часі процеси генерації та споживання теплової, холодної або електричної енергії. Для промислових підприємств це створює можливість гнучкіше управління навантаженням, зменшення пікових витрат та підвищення надійності енергозабезпечення.

Для фармацевтичних підприємств застосування систем акумулювання є особливо актуальним через поєднання цілодобового споживання холоду, змінного попиту на теплову енергію та високих вимог до безперервності виробничих процесів. У таких умовах накопичення енергії дозволяє компенсувати короточасні піки навантаження, вирівнювати графік роботи обладнання та знизити ризики технологічних збоїв.

У системах теплохолодопостачання найпоширенішими є такі типи акумулювання [5, 10, 13, 17, 19, 20, 22–24, 26, 27, 30–32]:

- теплове акумулювання, що реалізується за допомогою баків-акумуляторів гарячої води або теплоносія;
- акумулювання холоду, яке базується на накопиченні охолодженої води або льоду;
- фазоперехідні накопичувачі (PCM), що використовують приховану теплоту плавлення або кристалізації матеріалів;
- електричне акумулювання, зокрема батарейні системи для резервування живлення та балансування навантаження.

Теплові акумулятори можуть ефективно використовуватися спільно з котельнями або тепловими насосами, даючи змогу виробляти теплову енергію в періоди мінімального тарифного навантаження або найефективнішої роботи обладнання з подальшим використанням у години підвищеного попиту [28, 33].

Акумулювання холоду є особливо перспективним для фармацевтичних підприємств, оскільки значна частина холодильного навантаження припадає на денні години. Тож холодильні машини можуть працювати в нічний

період з нижчими тарифами на електроенергію, накопичуючи холод, який використовується вдень. Це дає змогу зменшити навантаження на компресорне обладнання в години пікового споживання електроенергії.

Окрему увагу привертають фазоперехідні матеріали (PCM), які характеризуються високою питомою енергоємністю та компактністю. Такі системи можуть застосовуватися у складських приміщеннях, холодних камерах та вентиляційних установках для стабілізації температурних режимів.

Для фармацевтичних підприємств важливою перевагою систем акумулювання є підвищення надійності енергозабезпечення. За наявності резерву холоду або теплоти підприємство отримує додатковий час для реагування в разі аварійного відключення обладнання або короточасних перебоїв електропостачання.

Водночас впровадження накопичувачів енергії потребує врахування капітальних витрат, доступних площ для розміщення обладнання, теплових втрат, циклічності навантажень та інтеграції з існуючими системами керування. Для фармацевтичних об'єктів додаткове значення мають санітарні вимоги та забезпечення стабільності технологічних параметрів.

За даними джерел літератури, використання систем акумулювання у складі інтегрованих енергетичних рішень дає змогу знизити пікове електричне навантаження на 10–25 %, скоротити витрати на енергоносії та підвищити загальну гнучкість експлуатації підприємства.

Таким чином, системи акумулювання енергії є важливим елементом сучасних теплохолодопостачальних комплексів і можуть суттєво підвищити ефективність та стійкість енергозабезпечення фармацевтичних підприємств, особливо в поєднанні з тепловими насосами та автоматизованими системами керування. Інтеграція накопичувачів дає змогу зменшити встановлену потужність основного обладнання (чилерів) та забезпечити резерв холоду на випадок короточасних збоїв у енергопостачанні, що є критичним для стандартів безпеки фармацевтичної продукції.

Інтелектуальне керування та прогнозне моделювання (SCADA/MPC)

Подальше підвищення енергоефективності промислових підприємств пов'язане не лише з модернізацією обладнання, але й з впровадженням сучасних систем автоматизованого керування, які забезпечують узгоджену роботу всіх елементів енергетичної інфраструктури. Для фармацевтичних підприємств, де інженерні системи функціонують безперервно й мають підтримувати суворо регламентовані параметри мікроклімату, роль автоматизації є особливо важливою.

У традиційних схемах теплопостачання та холодопостачання окремі установки часто працюють автономно, без достатньої координації між собою. Це може призводити до одночасного виробництва надлишкового тепла і

холоду, нераціонального використання енергоресурсів, частих пусків компресорного обладнання та роботи систем у неефективних режимах.

Використання сучасних систем керування дає змогу перейти від локального регулювання окремих агрегатів до централізованого управління всією енергетичною системою підприємства. Найпоширенішим рішенням є застосування систем класу SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), які забезпечують збір даних, диспетчеризацію, архівування параметрів, сигналізацію відхилень та дистанційне керування обладнанням.

У системах теплохолодопостачання SCADA дає змогу контролювати роботу холодильних машин, насосного обладнання, теплових насосів, вентиляційних установок, акумуляторів енергії та допоміжних інженерних систем у єдиному інформаційному середовищі. Це забезпечує можливість узгодження режимів роботи окремих підсистем залежно від поточного навантаження, температури зовнішнього повітря, тарифів на електроенергію та технологічних потреб виробництва.

Для фармацевтичних підприємств додатковою перевагою автоматизованих систем є можливість безперервного моніторингу критичних параметрів мікроклімату, температурних режимів зберігання продукції, перепадів тиску в чистих приміщеннях та роботи резервного обладнання. Це має важливе значення з погляду дотримання вимог GMP, валідації процесів та забезпечення простежуваності експлуатаційних режимів.

Перспективним напрямом розвитку є застосування алгоритмів прогнозного та оптимізаційного керування, зокрема MPC (Model Predictive Control), які дають змогу заздалегідь враховувати зміну навантаження, погодні умови та вартість енергоносіїв. У такому разі система не лише реагує на зміну параметрів, а й формує найефективніший режим роботи наперед.

Аналіз джерел [3, 4, 8, 14, 15, 17, 25, 27, 29, 33] вказує на перехід до стратегій інтелектуального керування, які базуються на великих даних та аналітиці в реальному часі.

Ключовими напрямками цифровізації є:

- Прогнозне керування на основі моделей (Model Predictive Control SCADA MPC). На відміну від стандартних PID-регуляторів, MPC використовує математичну модель системи для прогнозування її поведінки. Це дає змогу заздалегідь перемикатися на режим Free Cooling або активувати термічні акумулятори, враховуючи прогноз погоди та графік виробничого завантаження [21, 27].
- Інтеграція зі SCADA. Сучасні системи диспетчеризації виконують роль «енергетичного хабу», який у реальному часі балансує між споживанням електроенергії чилерами та виробництвом теплоти тепловими насосами. Джерела [3, 4, 8, 32] підкреслюють, що завдяки автоматизації можна досягти додаткової економії енергії до 12–15 % лише за рахунок оптимізації алгоритмів роботи.

- Алгоритми машинного навчання (ML). Застосування нейронних мереж для виявлення аномалій у роботі холодильних циклів та прогнозування сервісного обслуговування. Це критично для фармації, де вихід з ладу системи охолодження може призвести до псування дороговартісних препаратів [25].

Впровадження інтегрованих систем автоматизованого керування може забезпечити додаткове зниження енергоспоживання на 5–20 % навіть без значної заміни основного обладнання, а в поєднанні з модернізованими системами теплогенерації та холодопостачання цей ефект є ще вищим.

Важливим сучасним інструментом є також створення цифрових моделей або цифрових двійників енергетичних систем підприємства, які дають змогу моделювати режими роботи, тестувати сценарії модернізації та оцінювати наслідки змін без втручання в реальний технологічний процес.

Водночас впровадження автоматизованих систем керування потребує якісної сенсорної інфраструктури, надійних каналів зв'язку, кібербезпеки, підготовки персоналу та інтеграції з уже існуючими системами підприємства.

Таким чином, автоматизація, системи SCADA та інтелектуальні алгоритми керування є необхідним елементом сучасної модернізації систем теплохолодопостачання фармацевтичних підприємств. Їх використання дає змогу не лише знизити енергоспоживання, але й забезпечити стабільність технологічних процесів, підвищити надійність роботи обладнання та створити основу для подальшої цифрової трансформації підприємств.

Незважаючи на значну кількість публікацій, критичний аналіз 33 джерел виявив суттєву наукову лаку:

Фрагментарність рішень. Більшість досліджень фокусуються на окремих компонентах (наприклад, лише на матеріалах PCM або лише на параметрах TH), не пропонуючи цілісної методики їхнього узгодження в межах одного промислового вузла.

Відсутність прикладних методик для GMP. Існує незбіг між складними теоретичними моделями та вимогами фармацевтичних регламентів (стабільність температури, валідація систем), що стримує впровадження інновацій на реальних підприємствах.

Економічна динаміка. Недостатньо висвітлено питання адаптації систем до динамічних ринків електроенергії, де алгоритм керування має вибирати режим роботи на основі поточної вартості 1 кВт·год.

Порівняльний аналіз сучасних технологій підвищення енергоефективності фармацевтичних підприємств

Для визначення найдоцільніших напрямів модернізації систем теплохолодопостачання фармацевтичних підприємств виконано порівняльний аналіз основних технологічних рішень, розглянутих у попередніх розділах. Оцінювання здійснювалося за такими критеріями:

потенціал енергозбереження, рівень капітальних витрат, складність інтеграції в діючі системи, період окупності, рівень технологічної зрілості та придатність до

використання у фармацевтичній галузі. Отримані результати узагальнено у таблиці.

Таблиця. Порівняльна оцінка сучасних технологій енергомодернізації фармацевтичних підприємств

Технологія	Потенціал економії енергії	Складність впровадження	Капітальні витрати (CAPEX)	Основна перевага для фармації
Free Cooling (непрямий)	20–40 %	Середня	Низькі / Середні	Висока надійність, простота валідації
Теплові насоси (Heat Recovery)	30–50 %*	Висока	Високі	Повне заміщення газового нагріву для ГВП
Термічні акумулятори (PCM)	10–20 %	Середня	Середні	Вирівнювання піків, резервування холоду
Сорбційні чилери	40–60%**	Дуже висока	Дуже високі	Утилізація високопотенційного тепла пари
Інтелектуальне керування (MPC)	10–15 %	Висока	Середні	Оптимізація складних гібридних схем

* Відносно сумарних витрат на тепло та холод.

** За наявності дешевого джерела теплової енергії.

Порівняльний аналіз показав, що найбільш універсальними рішеннями для фармацевтичних підприємств є утилізація скидної теплоти, Free Cooling, теплові насоси та системи автоматизованого керування, оскільки саме ці технології забезпечують поєднання високого енергетичного ефекту, прийняттого терміну окупності та можливості інтеграції в діючі інженерні системи без суттєвого порушення виробничих процесів.

Технологія Free Cooling характеризується одним з найкоротших термінів окупності та відносно невеликими капітальними витратами, що робить її доцільною як початковий етап модернізації. Особливо ефективним є її використання для підприємств з постійним холодильним навантаженням та кліматичними умовами, характерними для України.

Теплові насоси й системи утилізації скидної теплоти забезпечують істотніший довгостроковий ефект, особливо за наявності стабільного внутрішнього джерела низькопотенційної теплоти. Такі рішення дають змогу суттєво скоротити споживання природного газу та знизити вуглецевий слід підприємства.

Системи SCADA та прогнозного керування можуть бути впроваджені як самостійно, так і в поєднанні з іншими технологіями. Їх особливістю є відносно короткий термін окупності за рахунок оптимізації режимів роботи існуючого обладнання без масштабної реконструкції.

Технології когенерації, тригенерації та цифрових двійників мають значний потенціал, однак потребують більших інвестицій, складнішої інтеграції та високого рівня технічної підготовки персоналу. Тому їх доцільно розглядати переважно для великих підприємств або як наступний етап комплексної модернізації.

Отже, вибір конкретного напрямку енергомодернізації повинен здійснюватися з урахуванням структури енер-

госпоживання підприємства, технічного стану існуючих систем, фінансових можливостей та вимог до безперервності виробничого процесу. Найчастіше найефективнішим є поетапний підхід, за якого швидкоокупні рішення впроваджуються першими, а більш капіталомісткі технології реалізуються на наступних етапах модернізації.

Попри значний технічний потенціал сучасних енергоефективних рішень, їх впровадження на фармацевтичних підприємствах має низку специфічних особливостей, які відрізняють цю галузь від більшості інших промислових секторів. Це пов'язано з високими вимогами до якості продукції, безперервності виробничих процесів, регламентованих параметрів мікроклімату та необхідністю суворого дотримання галузевих нормативів.

Однією з ключових особливостей є необхідність підтримання стабільних температурно-вологісних умов у виробничих приміщеннях, лабораторіях, стерильних зонах, складських комплексах та холодильних камерах. Для окремих технологічних процесів навіть незначні відхилення параметрів можуть впливати на якість продукції, результати контролю або умови зберігання сировини та готових лікарських засобів. У зв'язку з цим будь-які зміни в системах теплохолодопостачання повинні здійснюватися без ризику порушення технологічних режимів.

Важливим фактором є вимоги стандартів GMP (Good Manufacturing Practice), які передбачають контрольованість, простежуваність та валідацію інженерних систем, що впливають на виробниче середовище. Це означає, що модернізація систем вентиляції, кондиціонування, теплопостачання або холодопостачання часто потребує не лише технічного переоснащення, але й повторної кваліфікації обладнання, оновлення процедур контролю та документального супроводу.

Суттєвим обмеженням є також вимога до високої надійності енергозабезпечення. Зупинка холодильних машин, вентиляційних установок або систем підтримання мікроклімату може призвести до браку продукції, зупинки виробничих ліній чи втрати умов зберігання продукції. Саме тому на фармацевтичних підприємствах критично важливими є резервування обладнання, дублювання насосних груп, наявність аварійного електроживлення та багаторівнева система сигналізації.

Окрему роль відіграє організаційний аспект модернізації. Реалізація енергоефективних заходів на діючому фармацевтичному підприємстві часто ускладнюється через необхідність виконання монтажних робіт без зупинки основного виробництва або в межах коротких технологічних вікон. Це потребує поетапного впровадження рішень, високої координації між технічними службами та виробничими підрозділами.

Економічна оцінка проєктів у фармацевтичній галузі також має свою специфіку. На відміну від багатьох інших підприємств, тут важливим критерієм є не лише період окупності, але й вплив модернізації на стабільність виробництва, зменшення ризиків простоїв, покращення умов зберігання продукції та підвищення відповідності міжнародним стандартам.

З огляду на це найдоцільнішими є технології, що можуть інтегруватися поетапно, без істотного втручання у виробничі процеси. До таких рішень належать системи Free Cooling, утилізація скидної теплоти, модернізація систем автоматизації, впровадження теплових насосів у паралельному режимі роботи з існуючими джерелами теплоти, а також використання систем акумулювання енергії.

Практика свідчить, що найуспішнішими є проєкти, реалізовані на основі комплексного енергетичного аудиту підприємства з поетапною дорожньою картою модернізації. Такий підхід дає змогу поєднати короткострокові заходи зі швидкою окупністю та довгострокові стратегічні рішення, спрямовані на глибоку декарбонізацію та цифрову трансформацію.

Таким чином, впровадження енергоефективних технологій у фармацевтичній галузі потребує не лише технічної доцільності, але й урахування вимог до якості продукції, безперервності виробництва, нормативної відповідності та управління ризиками. Саме комплексний підхід є визначальним фактором успішної модернізації підприємств цього профілю.

Перспективи подальших досліджень

Системний аналіз сучасного наукового доробку дає змогу констатувати фундаментальне зміщення парадигми в галузі промислового холодозабезпечення: від пошуку поодиноких високоефективних агрегатів до створення складних мультиенергетичних екосистем.

Проведений аналіз дав змогу класифікувати розглянуті рішення за ступенем їхньої практичної доступності та економічної доцільності:

Найвищий пріоритет для впровадження. Гібридні системи вільного охолодження з адіабатичною підтримкою (статті № 26, 27) та термічні накопичувачі (статті № 20, 23). Ці технології демонструють стабільний рівень технологічної готовності і прямий економічний ефект у вигляді зниження OPEX на 20–30 %.

Середньострокова перспектива. Впровадження алгоритмів прогнозного керування (MPC) та цифрових двійників (статті № 17, 23). Попри те, що вони забезпечують додаткову економію до 10 %, їх впровадження стримується складністю інтеграції в існуючі BMS/SCADA системи.

Теоретичний та стратегічний рівень. Концепції малих модульних реакторів (SMR, стаття № 24) та водневих сховищ (стаття № 19). На цьому етапі вони залишаються об'єктами математичного моделювання через високі регуляторні бар'єри та капіталомісткість.

Проведений аналіз сучасних технологій підвищення енергоефективності фармацевтичних підприємств показав, що останнім часом спостерігається активний розвиток рішень у сфері утилізації скидної теплоти, використання теплових насосів, Free Cooling, систем акумулювання енергії та цифрового керування енергетичними процесами. Водночас низка наукових і практичних питань залишається недостатньо дослідженою, що стримує широке впровадження таких рішень у промислових умовах.

Однією з основних прогалин є обмежена кількість робіт, присвячених саме фармацевтичним підприємствам. Значний сегмент опублікованих досліджень стосується офісних будівель, дата-центрів, житлового сектору або загальнопромислових об'єктів, тоді як фармацевтичне виробництво характеризується специфічними вимогами до мікроклімату, чистоти приміщень, резервування обладнання та безперервності технологічних процесів. Це ускладнює пряме перенесення отриманих результатів на підприємства цього профілю.

Недостатньо дослідженим залишається питання інтеграції систем теплопостачання, холодопостачання та вентиляції в єдиний енергетичний комплекс. На практиці ці системи часто проєктуються та експлуатуються окремо, що призводить до втрати потенціалу внутрішнього енергетичного балансування. Подальших досліджень потребують методи синхронізації роботи теплових насосів, холодильних машин, накопичувачів енергії та вентиляційних установок у змінних режимах навантаження.

Окремим перспективним напрямом є розроблення моделей прогнозного керування енергоспоживанням підприємств з використанням алгоритмів штучного інтелекту та Model Predictive Control (MPC). Такі системи можуть враховувати погодні умови, виробничий графік, тарифи на електроенергію і технічний стан обладнання, формуючи оптимальні режими роботи в реальному часі. Проте для фармацевтичної галузі подібні рішення поки представлені обмежено.

Недостатньо вивченими є також питання економічної ефективності комплексної модернізації підприємств. Здебільшого розглядаються окремі технології, тоді як комбіноване застосування теплових насосів, Free Cooling, систем акумулювання та цифрового керування може забезпечувати синергетичний ефект. Подальших досліджень потребує створення моделей життєвого циклу таких систем з урахуванням капітальних витрат, експлуатаційних витрат, ризиків простою та екологічного ефекту.

Для країн Центральної та Східної Європи, зокрема України, актуальним є питання адаптації сучасних енергоефективних технологій до умов нестабільного енергопостачання, високої зношеності інженерної інфраструктури та обмежених інвестиційних ресурсів. У цьому контексті особливого значення набувають рішення, що можуть впроваджуватися поетапно та забезпечувати швидкий економічний результат.

Перспективним напрямом є використання цифрових двійників підприємств, які дають змогу створювати віртуальні моделі енергетичних систем для тестування сценаріїв модернізації без втручання в реальні виробничі процеси. Поєднання цифрових двійників із системами SCADA та інтелектуальним аналізом даних може стати основою нового покоління енергоефективних фармацевтичних підприємств.

Таким чином, подальші дослідження доцільно спрямувати на створення інтегрованих моделей енергетичних систем фармацевтичних підприємств, оцінку комбінованих технологічних рішень, розроблення алгоритмів адаптивного керування та формування практичних дорожніх карт декарбонізації галузі.

У роботі виконано аналіз сучасних технологічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності фармацевтичних підприємств, зокрема систем утилізації скидної теплоти, Free Cooling, теплових насосів, акумулювання енергії та автоматизованого керування енергоспоживанням.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що фармацевтичні підприємства характеризуються складною структурою енергоспоживання, яка поєднує значні потреби в тепловій та холодильній енергії, безперервний режим роботи інженерних систем і підвищені вимоги до стабільності параметрів мікроклімату відповідно до стандартів GMP.
2. Показано, що одним з найдоступніших внутрішніх резервів енергозбереження є використання скидної теплоти холодильного обладнання, вентиляційних систем та інших технологічних процесів. Її утилізація дає змогу зменшити навантаження на традиційні джерела теплоти й скоротити споживання викопного палива.
3. Визначено, що технологія Free Cooling є ефективним рішенням для підприємств з постійним холодиль-

ним навантаженням і може забезпечувати суттєве зниження електроспоживання компресорного обладнання, особливо в кліматичних умовах України.

4. Обґрунтовано, що теплові насоси є одним з ключових інструментів декарбонізації фармацевтичних підприємств, оскільки дають змогу використовувати низькопотенційні джерела теплоти та інтегрувати системи генерації тепла і холоду в єдиний енергетичний комплекс.
5. Показано, що застосування систем акумулювання енергії підвищує гнучкість роботи підприємства, зменшує пікові навантаження та покращує надійність енергозабезпечення, що є важливим для безперервних виробничих процесів.
6. Встановлено, що системи автоматизації, SCADA та алгоритми прогнозного керування забезпечують додатковий ефект енергозбереження за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання й координації взаємодії між окремими енергетичними підсистемами.
7. Показано, що найефективнішим підходом для фармацевтичної галузі є не впровадження окремих технологій, а комплексна поетапна модернізація з урахуванням технічних, економічних та регуляторних особливостей підприємства.
8. Перспективними напрямками подальшого розвитку є створення цифрових двійників енергетичних систем підприємств, використання штучного інтелекту для керування навантаженнями та формування дорожніх карт декарбонізації фармацевтичної галузі.

Отримані результати можуть бути використані як аналітична основа для розроблення програм енергомодернізації фармацевтичних підприємств, вибору пріоритетних технологічних рішень та планування довгострокового переходу до низьковуглецевих моделей виробництва.

ПОСИЛАННЯ

1. Fenglei Li, Peifeng Cai, Jing Wang, chengjun Zhang. Machine learning-driven optimization of an integrated renewable energy system for power, water, and cooling with CO2 capture. *Energy*, Volume 343, 15 January 2026, 139783. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139783>
2. Sumit Kumar Singh, Dibakar Rakshit, K Ravi Kumar, Anurag Agarwal. Recent advancements and sustainable solutions in adsorption-based cooling systems integrated with renewable energy sources and industrial waste heat. *Cleaner Engineering and Technology*. Volume 23, December 2024, 100827. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100827>
3. Ehsanolah Assareh, Ali Dejdard, Ali Ershadi, Masoud Jafarian, Mohammadhossein Mansouri, Amir Salek roshani, Ehsan Azish, Ehsan Saedpanah, Moonyoung Lee. Techno-economic analysis of combined

- cooling, heating, and power (CCHP) system integrated with multiple renewable energy sources and energy storage units. *Energy and Buildings*. Volume 278, 1 January 2023, 112618. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112618>
4. Muhammad Riaz, Sadiq Ahmad, Muhammad Naeem. Joint energy management and trading among renewable integrated microgrids for combined cooling, heating, and power systems. *Journal of Building Engineering*. Volume 75, 15 September 2023, 106921. <https://doi.org/10.1016/j.jobeb.2023.106921>
 5. Sabina Rosiek, Manuel S. Romero-Cano, Antonio M. Puertas, Francisco J. Batlles. Industrial food chamber cooling and power system integrated with renewable energy as an example of power grid sustainability improvement. *Renewable Energy*. Volume 138, August 2019, Pages 697–708. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.010>
 6. Saeed Rayegan, Shahrooz Motaghian, Ghassem Heidari nejad, Hadi Pasdarsahri, Pouria Ahmadi. Dynamic simulation and multi-objective optimization of a solar-assisted desiccant cooling system integrated with ground source renewable energy. *Applied Thermal Engineering*. Volume 173, 5 June 2020, 115210. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115210>
 7. Jamil AlAsfar, Mahmoud Irshidat, Mohammad Mustaf. Review of advancing hybrid renewable energy systems: The strategic role of solar cooling and multi-source integration in arid climates. *Results in Engineering*. Volume 29, March 2026, 109281. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109281>
 8. Alaa Almahmoudi, Mohamed.M. Awad, Mohamed, S. Salem, Osama Abdelrehim, Mohamed Almanzalawy. Urban heat transitions: Renewable integration, digital system optimization, and life-cycle perspectives for fifth-generation district heating and cooling systems. *Unconventional Resources*. Volume 12, July 2026, 100377. <https://doi.org/10.1016/j.unres.2026.100377>
 9. Mingyue He, Ning Liu, Guofang Kong. Performance evaluation of an SOFC-ICE hybrid system with pre-compressor cooling and dual-fuel injection for enhanced efficiency in renewable energy applications. *Renewable Energy*. Volume 255, 15 December 2025, 123801. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123801>
 10. Mohamad Ayoub, Ibrahim Dincer. Energy and exergy analyses of an integrated thermal system with compressed air energy storage and carbon capture for power, cooling and domestic hot water applications. *Thermal Science and Engineering Progress*. Volume 72, April 2026, 104586. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2026.104586>
 11. R Pandiyan, Praveen Kumar G. Sky radiative cooling: A comprehensive review of material innovations, spectral engineering and sustainable applications for renewable energy systems. *Results in Engineering*. Volume 29, March 2026, 109508. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109508>
 12. Ghulam Qadir Chaudhary, Zhongtao Hu, Suoying He, Muzaffar Ali, Sibghat Ullah, Muhammad Waheed Azam, Muhammad Usman, Ning Qin, Ming Gao. Analysis of building-integrated solar desiccant air cooling systems considering the dynamic sensible and latent cooling loads. *International Journal of Refrigeration*. Volume 181, January 2026, Pages 111–125 <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.10.007>
 13. Ziren Wang, Wei Li, Yuyuan Zhang. Two-tier optimal scheduling of integrated energy systems in parks considering P2G-CCS-CHP coupling and electricity-gas-heat-cooling price-demand response. *Energy*. Volume 338, 30 November 2025, 138803 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138803>
 14. Qiushi Wang, Liqiang Duan, Chaoyun Yang, Haozeng Zhao, Luyao Liu, Hanfei Zhang, Nan Zheng, Xingqi Ding. Comprehensive sustainability assessment and energy analysis of a combined cooling, heating and power system integrated with high-temperature solar thermochemical complementation and low-temperature solar thermal collection processes. *Renewable Energy*. Volume 261, 1 April 2026, 125212. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2026.125212>
 15. Xudong Ma, Yanjun Du, Xiaoqiong Li, Peng Wang, Yuting Wu, Shunan Li, Yu Li, Youdong Wang. Multi-energy complementary heat pumps for low-carbon integrated cooling, heating, and water supply in districts: case study of a school campus. *Applied Thermal Engineering*. Volume 290, Part 2, April 2026, 130030. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.130030>
 16. Philipp Mascherbauer, Lukas Kranzl, Aadit Malla, Simon Pezzutto, Philippe Riviere. How renewable cooling will affect RES target achievement in EU member states under different scenarios by 2030. *Renewable Energy*. Volume 256, Part I, 1 January 2026, 124709. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124709>
 17. Nanjiang Dong, Tao Zhang, Rui Wang. Multi-objective evolutionary algorithm with two-tier fully-connected weight network for day-ahead scheduling of integrated cooling, heating and power energy systems. *Energy*. Volume 347, 15 March 2026, 140147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.140147>
 18. Yangda Wan, Tinghui Xue, Zhifeng Huang, Xin Cui, Dan Huang, Kian Jon Chua. Energy, economic and environmental assessment of a photovoltaic-driven dew-point evaporative cooling system. *Applied Thermal Engineering*. Volume 289, Part 2, March 2026, 129799. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.129799>
 19. Pouya Faghieh Abdollahi, Vajihe Davoodi, Ehsan Amiri Rad. Investigation and comparison of two scenarios of energy systems using compressed air and hydrogen energy storage systems to provide cooling, heating, and electricity load of the building with 4E analysis (energy, exergy, environmental, and economic). *Energy and Buildings*. Volume 361, 15 June

- 2026, 117342.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117342>
20. Wei Dai, Wenjiao Xia, Bo Li, HuiHwang Goh, Zhijie Zhang, Fangjun Wen, Chunyang Ding. Increase the integration of renewable energy using flexibility of source-network-load-storage in district cooling system. *Journal of Cleaner Production*. Volume 441, 15 February 2024, 140682.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140682>
21. Seyed Amirmahdi Hosseini, Rouhollah Ahmadi, Amir Rahmani. Integrated gas heat pump (GHP) system for residential complexes: modeling cooling, hot water, and electricity generation. *Energy Conversion and Management: X*. Volume 29, January 2026, 101477.
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101477>
22. Zhifeng Huang, Xusheng Wang, WeiDong Chen, Md Raisul Islam, Kian Jon Chua. Empowering deep urban decarbonization through smart and renewable district cooling. *Sustainable Cities and Society*. Volume 129, 1 July 2025, 106488
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106488>
23. Ke Xiang, Zhiyong Tian, Ling Ma, Xinyu Chen, Yongqian g Luo, Yafeng Gao, Jianhua Fan, Qian Wang
24. Optimization of a free cooling system integrated with cold thermal energy storage in data center based on model predictive control. *Energy*. Volume 336, 1 November 2025, 138389.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138389>
25. Hussein Abdulkareem Saleh Abushamah, Radek Skoda. Economics of Small Modular reactors for district cooling systems integrated with thermal storage and Kalina Cycle power generation. *Energy Conversion and Management: X*. Volume 30, May 2026, 101694.
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101694>
26. F. Calise, F.L. Cappiello, L. Cimmino, F.P. Cuomo, M. Vicidomini. A 5th generation district heating cooling network integrated with a phase change material thermal energy storage: A dynamic thermoeconomic analysis. *Applied Energy*. Volume 389, 1 July 2025, 125688.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125688>
27. Ke Xiang, Zhiyong Tian, Chaohui Zhou, Yongqiang Luo, Wentao Wu, Jianhua Fan, Mahdi Deymi-Dashtebayaz. Performance analysis and optimization of a hybrid mechanical and free cooling system with cold water storage for a data center. *Applied Thermal Engineering*. Volume 267, 15 May 2025, 125831.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125831>
28. Mohamad Hnayno, Ali Chehade, Henryk Kłaba, Guillaume Polidori, Chadi Maalouf. Experimental investigation of an optimized indirect free cooling system including a dry cooler equipped with evaporative cooling pads for data center. *Energy Reports*. Volume 9, Supplement 12, November 2023, Pages 460–469.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.12.005>
29. Долинский А. А., Драганов Б. Х. Тепловые насосы в системе теплоснабжения зданий. *Промышленная теплотехника*. 2008. т. 30. № 6. С. 71–83.
<https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/61202>
30. Снежкін Ю. Ф. Теплові насоси в процесах сушіння. Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини: тези доповідей Всеукр. науково-практ. конф., 8 червня 2023р.; Харків: ДБТУ, 2023. С. 53–54.
<https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/36759>
31. Зур'ян О. В. Комплексне використання підземного акумулювання теплоти, теплонасосної системи та сонячних колекторів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2023. № 5(142). 2023. С. 94–102.
<https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.5.11>
32. Морозов Ю. П. та ін Енергетична ефективність використання перших від поверхні водоносних горизонтів для тепло- і хладопостачання. / Ю. П. Морозов, А. А. Барило, Д. М. Алаєв, М. П. Добровольський. *Відновлювана енергетика*. 2019. № 2. С. 70–78.
[https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).70-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).70-78)
33. Zurian O. V., Varilo, A. A. Вплив природного температурного режиму верхніх шарів землі на ефективність гідротермальної теплонасосної системи. *Журнал з геології, географії та екології*. 2022. № 31(3). С. 575–584. <https://doi.org/10.15421/112254>
34. Бабак В., Нікітін Є., Тесленко О. Цілісний підхід до системної трансформації електроенергетики, централізованого тепlopостачання та комунальної інфраструктури. *Системні дослідження в енергетиці*. 2024. № 4(80). С. 6–25.
<https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.006>

MODERN HEAT RECOVERY AND COOLING TECHNOLOGIES FOR PHARMACEUTICAL ENTERPRISES: REVIEW AND PROSPECTS FOR IMPLEMENTATION

Received May 04, 2026; accepted Jun. 26, 2026
Available online June. 30, 2026

Perepelytsia I.¹, Zurian O.²

Author for correspondence: Zuryan Oleksii,
e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

¹ Postgraduate

<https://orcid.org/0009-0000-9724-8368>

² Dr. of Sciences (Eng.)

<https://orcid.org/0000-0002-2391-1611>

^{1,2} Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

Abstract. *The article presents a systematic review of modern technological solutions aimed at improving the energy efficiency of pharmaceutical enterprises, which are characterized by high consumption of thermal and cooling energy, continuous operation of engineering systems, and strict requirements for maintaining stable indoor climate parameters in accordance with GMP standards. The purpose of the study is to analyze current approaches to modernization of heating and cooling systems at pharmaceutical facilities, assess their practical applicability, and identify promising directions for further development of the sector. The literature review was based on publications indexed in international scientific databases, industry technical sources, and recent applied studies. A comparative analysis was carried out for the following technologies: waste heat recovery, Free Cooling, heat pumps, energy storage systems, SCADA-based control systems, and predictive energy management solutions.*

It was shown that refrigeration heat recovery systems and integration of heat pumps have significant energy-saving potential, as they enable the use of secondary energy resources to cover heating demand. The study found that Free Cooling is one of the fastest-payback solutions for enterprises with permanent cooling loads. The feasibility of energy storage systems for reducing peak loads and improving reliability of energy supply was substantiated. It was also demonstrated that implementing SCADA systems and intelligent control algorithms provides additional reduction of energy consumption through optimization of equipment operating modes.

The results of the study indicate that the most effective approach for the pharmaceutical industry is a comprehensive step-by-step modernization of energy infrastructure, combining technical, digital, and organizational solutions. The obtained findings may be used in the development of decarbonization programs and energy efficiency improvement strategies for pharmaceutical enterprises.

Keywords: *renewable energy, FreeCooling, heat pump, refrigeration machine, heat recovery.*

List of Abbreviations and Symbols:

RES – Renewable Energy Sources

HP – Heat Pump

SW – Software

COP – Coefficient of Performance (the ratio of the thermal

energy delivered by the heat pump to the electrical energy consumed)

DHW – Domestic Hot Water

ACS – Automated Control System

Free Cooling – A cooling system or operating mode that utilizes natural ambient cooling capacity

Introduction. The transformation of global energy development and processes towards decentralization leads to the rapid introduction of electricity supply systems based on RES. A special place in this process is occupied by hybrid autonomous complexes combining different types of generation, in most cases **Introduction.**

Pharmaceutical enterprises belong to the category of industrial facilities with high energy consumption, driven by stringent requirements for the stability of technological processes, microclimate parameters, and sanitary-hygienic production conditions. Unlike many other industrial

sectors, pharmaceutical manufacturing requires the simultaneous provisioning of substantial loads for both heat supply systems and refrigeration, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems.

Production premises, clean zones, laboratories, raw material and finished product warehouses require the continuous maintenance of regulated parameters of temperature, humidity, air exchange rates, and air purity levels in accordance with Good Manufacturing Practice (GMP) requirements and related industry standards. This leads to the year-round operation of engineering systems, significant

electricity consumption by refrigeration equipment, and substantial thermal energy expenditures.

In the energy consumption structure of pharmaceutical enterprises, refrigeration systems play a crucial role, providing process cooling, air conditioning, and maintaining product storage temperature regimes. During the operation of refrigeration equipment, a significant amount of heat is rejected into the environment via condenser circuits or cooling systems. In most cases, this heat is unutilized, although it can be considered a secondary energy resource.

Amid rising energy resource costs, tightening requirements for greenhouse gas emissions reduction, and the necessity to enhance the energy resilience of enterprises, the implementation of waste heat recovery technologies, Free Cooling, heat pumps, energy storage systems, and automated energy management systems gains particular relevance [1–5, 28–33].

Modern research indicates that the integration of heat and cold generation systems allows for a significant increase in the primary energy utilization factor, a reduction in natural gas consumption, and a decrease in operational expenditures [6–10, 29–33]. At the same time, the adaptation of such solutions specifically to pharmaceutical enterprises requires additional generalization, as this industry exhibits specific requirements for the reliability, redundancy, and continuity of production processes.

In this regard, the objective of this work is to systematize modern technological solutions in the field of heat recovery and refrigeration supply, evaluate the feasibility of their application at pharmaceutical enterprises, and identify promising directions for enhancing the energy efficiency of such facilities.

A literature review was conducted to systematize current approaches to improving the energy efficiency of industrial facilities with substantial thermal and cooling loads, specifically pharmaceutical enterprises.

The search for scientific publications was carried out in international scientometric and information databases, including Scopus, ScienceDirect, Web of Science, and Google Scholar, as well as in open industry sources and technical reports from equipment manufacturers. The primary chronological scope of the search covered the period of 2018–2026, which allowed for the inclusion of contemporary trends in the development of energy technologies.

The following keywords and their combinations were used for the selection of sources:

- heat recovery;
- waste heat utilization;
- pharmaceutical HVAC;
- industrial cooling systems;
- free cooling;
- heat pump integration;
- trigeneration;

- SCADA energy management;
- thermal storage;
- decarbonization of industry.

At the initial stage, more than 70 sources were identified. Following a preliminary content analysis, excluding duplicate materials, irrelevant publications, and sources with an insufficient level of technical detail, 33 of the most relevant sources were selected for in-depth analysis.

The selection criteria included:

- availability of a quantitative assessment of the energy effect;
- practical implementation or experimental modeling of systems;
- compliance with industrial or near-industrial operating conditions;
- availability of data regarding economic efficiency or technical limitations.

To systematize the selected materials, a comparative analysis method was applied, according to which the technologies were evaluated based on the following criteria:

- energy-saving potential;
- integration complexity;
- technology readiness level (TRL);
- capital expenditure (CapEx) requirements;
- feasibility of application in the pharmaceutical industry.

The obtained results formed the basis for establishing a classification of modern technological solutions and determining promising directions for their implementation.

Main Body / Presentation of Main Material

Pharmaceutical enterprises belong to the category of industrial facilities with a complex energy consumption structure, which is determined by a combination of technological, sanitary-hygienic, and regulatory requirements for production processes. Unlike many other industrial sectors, the energy systems of pharmaceutical manufacturing must ensure not only the supply of thermal and electrical energy but also the stable maintenance of internal environment parameters across a wide range of premises.

A significant share of energy consumption is attributed to ventilation, air conditioning, and refrigeration systems. This is due to the necessity of continuously maintaining temperature, relative humidity, air purity, and pressure differentials in production zones, laboratories, sterile premises, and warehouse complexes. For specific categories of premises, only minor deviations in microclimate parameters are permissible, which necessitates the round-the-clock operation of climate control equipment.

A substantial characteristic feature of pharmaceutical enterprises is the presence of simultaneous demand for both thermal and cooling energy throughout the year. Thermal energy is utilized for hot water supply, technological heating, the operation of ventilation units, and maintaining the temperature regime during the cold season. Cooling energy is

required for premises air conditioning, technological equipment cooling, and maintaining storage conditions for raw materials, intermediate products, and finished goods.

In many cases, heat supply and refrigeration systems are designed and operated independently of each other, leading to inefficient energy use. Specifically, the heat rejected by chillers through condenser circuits is frequently discarded into the environment without further utilization, while a parallel demand for thermal energy simultaneously exists at the enterprise.

An additional factor influencing the energy consumption structure is the high requirement for reliability and redundancy. A shutdown of refrigeration or ventilation systems can lead to a violation of technological regulations, loss of product quality, or production downtime. Therefore, backup power sources, equipment redundancy, and multi-circuit energy supply systems are widely implemented at pharmaceutical enterprises.

Under modern conditions of rising energy tariffs, tightening environmental requirements, and the necessity to reduce the carbon footprint, optimizing the energy consumption structure of such enterprises gains particular importance. The most promising directions include the integration of combined heating and cooling systems, the utilization of waste heat, the application of heat pumps, energy storage, and the implementation of intelligent management systems.

Thus, pharmaceutical enterprises are characterized by a complex and continuous pattern of energy consumption, the existence of simultaneous demand for heat and cold, high requirements for the stability of internal environment parameters, and increased reliability demands. It is these specific characteristics that determine the feasibility of implementing integrated energy-efficient solutions, which are examined in the subsequent sections of this work.

Waste Heat Recovery in Refrigeration Systems

One of the most promising directions for improving the energy efficiency of industrial enterprises is the utilization of secondary energy resources, particularly waste heat generated during the operation of refrigeration and technological equipment. For pharmaceutical enterprises, this approach is of particular significance, as refrigeration, ventilation, and air conditioning systems operate year-round and generate a stable thermal flux that, in most cases, remains unutilized.

The primary source of waste heat in refrigeration systems is the condensers of compressor chillers, where the heat extracted from the cooled media, combined with the compressor work, is rejected to the environment. The temperature level of this thermal flux depends on the equipment type and the system operating mode, and typically falls within a range sufficient for subsequent utilization after an additional temperature lift.

Recent practice demonstrates that the waste heat from refrigeration plants can be effectively utilized to provide hot water supply, preheat intake air, provide technological

heating, preheat water, and cover a portion of the space heating system load. Its implementation is most feasible in cases of simultaneous demand for cold and heat, which is highly characteristic of pharmaceutical manufacturing processes.

An analysis of sources [1–4, 7, 28, 33] allows for the classification of key resources for secondary utilization and the methods of their integration into the enterprise's thermal network.

Classification of Secondary Energy Sources:

- Among the technical solutions for heat recovery, the most common are:
 - direct utilization of condensation heat;
 - recovery via intermediate heat exchangers;
 - integration with heat pumps;
 - combined systems with thermal energy storage.

Direct heat utilization is the simplest solution; however, it is limited by the temperature level of the source and the seasonality of demand. Significantly broader opportunities are offered by the application of heat pumps, which allow for raising the coolant temperature to the required level and ensuring a more flexible integration into existing heat supply systems.

For pharmaceutical enterprises, a significant advantage of waste heat recovery is the ability to reduce the load on boiler equipment and decrease natural gas consumption without disrupting the technological stability of production. Since refrigeration systems at such facilities operate continuously or quasi-continuously, the source of secondary heat is sufficiently stable and predictable. Specifically:

- condensation heat from chillers: The most stable source, which in conventional schemes is dissipated into the atmosphere via cooling towers or air-cooled condensers. The utilization of this energy allows not only for obtaining "free" heat but also for reducing the thermal load on the environment [1, 5, 8, 21, 32];
- effluent water and ventilation emissions: Pharmaceutical processes (sterilization, equipment washing) generate substantial volumes of wastewater with temperatures of 30–50°C. Sources [3, 8, 15, 16] indicate high efficiency in utilizing these streams as a primary circuit for heat pumps;
- geothermal potential: Utilizing groundwater or closed-loop boreholes as a heat sink or source allows for stabilizing the operation of air conditioning systems independently of seasonal fluctuations in ambient outdoor temperatures [8, 32, 33].

At the same time, the implementation of heat recovery systems requires consideration of a number of technical factors, including alignment of temperature profiles, load fluctuations, redundancy requirements, sanitary regulations, as well as integration with the enterprise's existing engineering networks.

Studies [2, 4, 6, 33] emphasize the transition from direct heat exchange to complex thermodynamic cycles. In particular, the following are considered:

- sorption technologies (Absorption and adsorption chillers): These allow for converting high-grade waste heat (for instance, from cogeneration units or technological steam) directly into cooling. This is critically important for enterprises with a surplus of thermal energy during the summer period [4, 6, 7, 10, 12, 14, 16, 19, 24];
- Organic Rankine Cycle (ORC): Utilizing low-grade heat to generate additional electricity. Although this solution may be redundant for the scale of an individual production workshop, on a plant-wide scale, it significantly increases the overall capacity utilization factor [4, 10];
- industrial symbiosis systems: Integration of refrigeration centers into a plant-wide 5th generation network, where the return water of the cooling system serves as an energy source for preheating intake air in cleanroom ventilation systems [8, 25, 33].

The standardization of heat recovery approaches allows not only for reducing natural gas consumption for hot water supply and space heating requirements but also for extending the operational lifetime of refrigeration equipment by optimizing condensation temperature regimes.

The conducted analysis of literature sources indicates that the utilization of waste heat allows for a reduction in the overall energy consumption of enterprises by 10–30%, depending on the system configuration, load structure, and automation level. The maximum effect is achieved in the case of a comprehensive combination of heat recovery with heat pumps and intelligent management systems.

Thus, waste heat recovery is one of the fundamental directions for modernizing the energy infrastructure of pharmaceutical enterprises and establishes the framework for creating integrated heating and cooling systems.

Free Cooling Technologies

One of the most accessible and economically viable directions for improving the energy efficiency of refrigeration systems is the application of Free Cooling technology, which involves utilizing the low temperature of ambient outdoor air or other natural cold sources to cover a partial or full cooling load without the operation of compressor equipment.

For pharmaceutical enterprises, this technology is of particular significance, as the demand for cold for air conditioning, ventilation, technological cooling, and product storage persists throughout the entire year. During transitional and winter periods, ambient temperature conditions frequently allow for partially or completely meeting the cooling demand without the use of conventional chillers.

The operating principle of Free Cooling consists of transferring cold from the external environment to the internal cooling circuit via heat exchangers, dry coolers, cooling towers, or intermediate glycol loops [16, 23, 26, 27, 32].

Depending on the configuration, these systems are classified according to the following types:

Direct Free Cooling: Supplying outdoor air directly into the premises after filtration. Despite its high efficiency, this method is limited in pharmacy due to stringent requirements for air purity and humidity (GMP standards) [23, 32].

Indirect Free Cooling: Utilizing an intermediate coolant (glycol loop) or air-to-air heat exchangers. This allows for separating the airflows and ensuring the sterility of zones while maintaining a high energy-saving effect [16, 23, 27, 32].

Adiabatic Free Cooling: Spraying water onto the air stream before the dry cooler heat exchanger, which allows for utilizing the Free Cooling mode even at ambient outdoor air temperatures that are 5–7°C higher than the standard transition point [16, 21, 27].

Hybrid Schemes

For pharmaceutical enterprises, the indirect or hybrid mode is the most feasible, as it ensures a high level of sanitary safety and parameter stability, while eliminating the risks of direct outdoor air exposure on clean production zones.

The practical effect of implementing Free Cooling lies in a significant reduction of electricity consumption by compressor equipment during the cold season. According to literature sources, depending on climatic conditions, system type, and the share of annual operating time in Free Cooling mode, electricity savings can range from 15 to 45% [16, 21, 23, 27].

Modern research focuses on the synergy of passive and active systems:

- series hybridization: A mode in which free cooling provides preliminary lowering of the coolant temperature, while the compressor chiller performs only the final sub-cooling to the setpoint. This radically increases the system's total Energy Efficiency Ratio (EER) [16, 33].
- hybrid Solar-Desiccant Cooling Systems (SDCS): Utilizing solar energy for the regeneration of air-drying adsorbents in combination with indirect evaporative cooling. Such schemes allow for precision humidity control, which is critical for the manufacturing of solid dosage forms [6, 12, 33].
- integration with ground heat exchangers: Utilizing stable ground temperatures for pre-cooling intake air in summer and preheating it in winter, which mitigates peak loads on the grid [6, 8, 15, 25, 31, 32].

For the conditions of Ukraine, this technology is particularly promising due to the prolonged heating and transitional seasons, during which the ambient outdoor air temperature remains below the level required for the operation of cooling systems for a significant portion of the time.

An additional advantage of Free Cooling is the reduced load on chiller compressors, which extends the operational lifetime of the equipment, decreases maintenance expenditures, and enhances overall system reliability.

At the same time, the effectiveness of Free Cooling depends on the correct choice of temperature profiles, hydraulic schemes, automation systems, and alignment with existing refrigeration equipment. In the case of pharmaceutical enterprises, it is also essential to consider requirements for redundancy, operational continuity, and the accuracy of microclimate parameter maintenance.

A promising direction is the integration of Free Cooling with automated control systems, which enable automatic switching of operating modes depending on ambient outdoor air temperatures, current load, and economic operational criteria.

Thus, Free Cooling technology is one of the fastest-payback and technically viable measures for modernizing the refrigeration systems of pharmaceutical enterprises, and can be considered a baseline stage for further comprehensive energy modernization.

Heat Pumps and Cascade Heat Utilization

One of the most promising directions for decarbonization and improving the energy efficiency of industrial enterprises is the utilization of heat pumps, which allow for converting low-grade heat from the environment or secondary energy resources into useful thermal energy with a high efficiency ratio.

For pharmaceutical enterprises, the application of heat pumps is particularly relevant due to the simultaneous presence of substantial demands for both thermal and cooling energy. At such facilities, sources of low-grade heat can include chiller condenser circuits, ventilation emissions, effluent water, technological streams, as well as ambient outdoor air or soil.

For pharmaceutical enterprises, water-to-water systems and cascade heat pump plants are the most promising, as they allow for utilizing stable internal sources of waste heat and ensuring more predictable operating regimes compared to air-source systems.

Practical directions for the utilization of heat pumps at pharmaceutical enterprises include:

- preparation of hot water for domestic and technological needs;
- preheating of intake air in ventilation units;
- covering a portion of the space heating system load;
- heat recovery from refrigeration equipment;
- simultaneous production of cold and heat in integrated systems.

According to the results of published research, the application of heat pumps at industrial enterprises allows for reducing natural gas consumption by 20–60%, depending on the load structure, temperature profiles, and system integration levels. The maximum effect is achieved in the presence of a stable internal source of low-grade heat, which is characteristic of enterprises with a constant cooling load [3, 8, 15, 16, 21, 25, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33].

At the same time, the implementation of heat pumps requires consideration of a number of technical factors: heat source temperature, the required temperature level of the consumer, seasonal load variations, redundancy modes, and power supply parameters. For pharmaceutical enterprises, requirements for operational continuity and the possibility of equipment duplication are of additional importance.

Key Aspects of Heat Pump (HP) Application:

- Stabilization of the Coefficient of Performance (COP): Utilizing the return water of cooling systems with a relatively stable temperature (15–25°C) as a source for the HP allows for maintaining a high and predictable COP (at the level of 4.5–6.0) regardless of the season. This is significantly more efficient than air-source HPs, the efficiency of which drops at sub-zero temperatures [3, 15, 27, 28, 29, 31, 32, 33];
- High-Temperature Heat Pumps (HTHP): Sources [6, 23, 28, 32] describe the implementation of cascade schemes that allow for obtaining a coolant with a temperature of 80–90°C for hot water supply needs and preheating in ventilation systems. This minimizes the utilization of gas boilers, which represents a direct step toward production decarbonization;
- Synchronous Generation (Trigeneration): Implementation of a concept where a single plant simultaneously produces cold for technological lines and useful heat for administrative or auxiliary buildings. This approach allows for recovering up to 100% of condensation heat that was previously considered lost [1, 10, 14, 27, 28, 32].

A promising direction of development is the combination of heat pumps with Free Cooling systems, energy storage, and automated control. In this case, the heat pump plant becomes part of the integrated energy system of the enterprise, which allows for optimizing energy expenditures and increasing operational flexibility.

Thus, heat pumps represent one of the key technological solutions for modernizing the energy infrastructure of pharmaceutical enterprises and can deliver significant economic and environmental benefits, provided the correct choice of heat source and operating modes is made.

Thermal and Cold Energy Storage

One of the important directions for improving the efficiency of modern energy systems is the utilization of energy storage technologies, which allow decoupling the processes of generation and consumption of thermal, cooling, or electrical energy over time. For industrial enterprises, this creates an opportunity for more flexible load management, a reduction in peak expenditures, and an increase in the reliability of energy supply.

For pharmaceutical enterprises, the application of storage systems is particularly relevant due to the combination of round-the-clock cold consumption, variable demand for thermal energy, and high requirements for production

process continuity. Under such conditions, energy accumulation allows for compensating short-term load peaks, leveling the equipment operating profile, and mitigating the risks of technological disruptions.

In combined heating and cooling systems, the most common types of accumulation include [5, 10, 13, 17, 19, 20, 22, 23, 24, 26, 27, 30, 31, 32]:

- thermal energy storage, implemented via hot water or coolant storage tanks;
- cold energy storage, based on the accumulation of chilled water or ice;
- phase-change materials (PCM) storage, which utilize the latent heat of fusion or crystallization of materials;
- electrical energy storage, specifically battery systems for power redundancy and load balancing.

Thermal energy storage units can be effectively utilized in conjunction with boiler plants or heat pumps, allowing for thermal energy production during periods of minimal tariff loads or the most efficient equipment operation, with subsequent utilization during hours of peak demand [28, 33].

Cold energy storage is particularly promising for pharmaceutical enterprises, as a significant portion of the cooling load occurs during daytime hours. In this case, chillers can operate during the night period with lower electricity tariffs, accumulating cold that is subsequently utilized during the day. This allows for reducing the load on compressor equipment during peak electricity consumption hours.

Special attention is drawn to phase-change materials (PCMs), which are characterized by high specific energy density and compactness. Such systems can be applied in warehouse premises, cold storage rooms, and ventilation units to stabilize temperature regimes.

For pharmaceutical enterprises, an important advantage of storage systems is the enhancement of energy supply reliability. In the presence of a cold or heat reserve, the enterprise gains additional response time in the event of an emergency equipment shutdown or short-term power supply interruptions.

At the same time, the implementation of energy storage systems requires consideration of capital expenditures, available space for equipment placement, thermal losses, load cycling, and integration with existing management systems. For pharmaceutical facilities, sanitary regulations and ensuring the stability of technological parameters are of additional importance.

According to literature sources, the utilization of storage systems within integrated energy solutions allows for a reduction in peak electrical loads by 10–25%, decreases energy resource expenditures, and enhances the overall operational flexibility of the enterprise.

Thus, energy storage systems represent an important element of modern combined heating and cooling complexes and can significantly improve the efficiency and resilience of the energy supply at pharmaceutical enterprises,

particularly when combined with heat pumps and automated control systems. The integration of storage units allows for a reduction in the installed capacity of the primary equipment (chillers) and provides a cold reserve in case of short-term power supply disruptions, which is critical for pharmaceutical product safety standards.

Intelligent Control and Predictive Modeling (SCADA/MPC)

A further increase in the energy efficiency of industrial enterprises is associated not only with equipment modernization but also with the implementation of advanced automated control systems that ensure the coordinated operation of all elements of the energy infrastructure. For pharmaceutical enterprises, where engineering systems operate continuously and must maintain strictly regulated microclimate parameters, the role of automation is particularly critical.

In conventional heating and cooling schemes, individual plants often operate autonomously without sufficient coordination. This can lead to the simultaneous production of redundant heat and cold, inefficient utilization of energy resources, frequent cycling of compressor equipment, and system operation in inefficient regimes.

The utilization of modern control systems enables a transition from the local regulation of individual units to the centralized management of the enterprise's entire energy system. The most common solution is the application of SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) class systems, which provide data collection, dispatching, parameter archiving, deviation alarming, and remote equipment control.

In combined heating and cooling systems, SCADA allows for controlling the operation of chillers, pumping equipment, heat pumps, ventilation units, energy storage systems, and auxiliary engineering systems within a unified information environment. This provides the capability to align the operating modes of individual subsystems depending on the current load, ambient outdoor air temperature, electricity tariffs, and technological needs of production.

For pharmaceutical enterprises, an additional advantage of automated systems is the capability of continuous monitoring of critical microclimate parameters, product storage temperature regimes, pressure differentials in cleanrooms, and the operation of backup equipment. This is of major importance from the standpoint of compliance with GMP requirements, process validation, and ensuring the traceability of operational regimes.

A promising direction of development is the application of predictive and optimization control algorithms, particularly MPC (Model Predictive Control), which allow for considering load variations, weather conditions, and energy resource costs in advance. In this case, the system not only reacts to parameter changes but also establishes the most efficient operating mode proactively.

An analysis of sources [3, 4, 8, 14, 15, 17, 25, 27, 29, 33] indicates a transition toward intelligent control strategies based on big data and real-time analytics.

The key directions of digitalization include:

- Model Predictive Control (MPC): Unlike standard PID controllers, MPC utilizes a mathematical model of the system to predict its behavior. This allows for switching to Free Cooling mode or activating thermal storage units in advance, taking into account weather forecasts and production load schedules [21, 27];
- Integration with SCADA: Modern dispatch systems function as an "energy hub" that balances the electricity consumption of chillers and the heat production of heat pumps in real time. Sources [3, 4, 8, 32] emphasize that automation allows for achieving additional energy savings of up to 12–15% solely through the optimization of operating algorithms;
- Machine Learning (ML) algorithms: The application of neural networks for anomaly detection in refrigeration cycles and predictive maintenance forecasting. This is critical for pharmacy, where a failure of the cooling system can result in the spoilage of high-value medical products [25].

The implementation of integrated automated control systems can provide an additional reduction in energy consumption by 5–20% even without significant replacement of primary equipment, and when combined with modernized heat generation and refrigeration supply systems, this effect is even higher.

An important contemporary tool is also the creation of digital models or digital twins of the enterprise's energy systems, which allow modeling operating modes, testing modernization scenarios, and evaluating the impacts of changes without intervention into the actual technological process.

At the same time, the implementation of automated control systems requires a high-quality sensor infrastructure, reliable communication channels, cybersecurity, personnel training, and integration with the enterprise's existing systems.

Thus, automation, SCADA systems, and intelligent control algorithms represent a necessary element of the modern upgrade of combined heating and cooling systems at pharmaceutical enterprises. Their utilization allows not only for reducing energy consumption but also for ensuring the stability of technological processes, enhancing equipment operational reliability, and establishing the foundation for the further digital transformation of enterprises.

Despite a significant number of publications, a critical analysis of 33 sources revealed a substantial scientific gap:

- fragmentation of solutions: The majority of studies focus on individual components (for instance, solely on PCM materials or exclusively on heat pump parameters) without proposing a holistic methodology for their coordination within a single industrial hub;
- lack of applied methodologies for GMP: There is a gap between complex theoretical models and the requirements of pharmaceutical regulations (temperature stability, system validation), which restrains the implementation of innovations at real enterprises;
- economic dynamics: The issues of adapting systems to dynamic electricity markets, where the control algorithm must select the operating mode based on the current cost per kWh, are insufficiently addressed.

Comparative Analysis of Modern Technologies for Enhancing the Energy Efficiency of Pharmaceutical Enterprises

To determine the most feasible directions for modernizing the combined heating and cooling systems of pharmaceutical enterprises, a comparative analysis was performed on the primary technological solutions examined in the previous sections. The evaluation was carried out based on the following criteria: energy-saving potential, capital expenditure level, complexity of integration into existing systems, payback period, technology readiness level (TRL), and suitability for application in the pharmaceutical industry. The obtained results are summarized in Table.

Table. Comparative assessment of modern energy modernization technologies for pharmaceutical enterprises

Technology	Energy-saving potential	Implementation complexity	Capital expenditures (CAPEX)	Main advantage for pharmaceuticals
Free Cooling (indirect)	20–40%	Medium	Low/Medium	High reliability, ease of validation
Heat pumps (Heat Recovery)	30–50%*	High	High	Full replacement of gas heating for DHW
Thermal storage systems (PCM)	10–20%	Medium	Medium	Peak shaving, cooling backup
Sorption chillers	40–60%**	Very high	Very high	Utilization of high-potential steam heat
Intelligent control (MPC)	10–15%	High	Medium	Optimization of complex hybrid schemes

* Relative to the total expenditures on heat and cold.

** Subject to the availability of a low-cost thermal energy source.

The comparative analysis demonstrated that the most versatile solutions for pharmaceutical enterprises are waste heat recovery, Free Cooling, heat pumps, and automated control systems, as these specific technologies provide a combination of a high energy effect, an acceptable payback period, and the capability of integration into existing engineering systems without significant disruption to production processes.

Free Cooling technology is characterized by one of the shortest payback periods and relatively low capital expenditures, making it highly feasible as an initial stage of modernization. Its implementation is especially effective for enterprises with a constant cooling load and climatic conditions characteristic of Ukraine.

Heat pumps and waste heat recovery systems provide a more significant long-term effect, particularly in the presence of a stable internal source of low-grade heat. Such solutions allow for a substantial reduction in natural gas consumption and decrease the carbon footprint of the enterprise.

SCADA and predictive control systems can be implemented either independently or in combination with other technologies. Their defining feature is a relatively short payback period due to the optimization of the operating modes of existing equipment without large-scale reconstruction.

Cogeneration, trigeneration, and digital twin technologies possess significant potential; however, they require higher investments, more complex integration, and a high level of technical training for personnel. Therefore, it is advisable to consider them primarily for large-scale enterprises or as a subsequent stage of comprehensive modernization.

Thus, the choice of a specific direction for energy modernization must be carried out taking into account the enterprise's energy consumption structure, the technical condition of existing systems, financial capabilities, and production process continuity requirements. In most cases, a phased approach is most effective, where rapid-payback solutions are implemented first, while more capital-intensive technologies are realized during subsequent stages of modernization.

Despite the significant technical potential of modern energy-efficient solutions, their implementation at pharmaceutical enterprises involves a number of specific features that distinguish this industry from most other industrial sectors. This is driven by high requirements for product quality, production process continuity, regulated microclimate parameters, and the necessity of strict compliance with industry regulations.

One of the key specific features is the necessity of maintaining stable temperature and humidity conditions in production premises, laboratories, sterile zones, warehouse complexes, and cold storage rooms. For specific technological processes, even minor parameter deviations can affect product quality, control results, or storage conditions for raw materials and finished medicinal products. In this

regard, any modifications to combined heating and cooling systems must be executed without the risk of disrupting technological regimes.

An important factor is the requirements of GMP (Good Manufacturing Practice) standards, which stipulate the controllability, traceability, and validation of engineering systems that influence the manufacturing environment. This means that the modernization of ventilation, air conditioning, heat supply, or refrigeration systems frequently requires not only technical retrofitting but also requalification of equipment, as well as updating control procedures and documentation support.

A substantial constraint is also the requirement for high energy supply reliability. A shutdown of chillers, ventilation units, or microclimate maintenance systems can lead to product defects, production line downtime, or the loss of product storage conditions. For this reason, equipment redundancy, duplication of pump groups, the presence of an emergency power supply, and a multi-level alarm system are critically important at pharmaceutical enterprises.

The organizational aspect of modernization plays a distinct role. The execution of energy efficiency measures at an operating pharmaceutical enterprise is often complicated by the necessity of performing installation works without stopping the primary production or within short technological windows. This requires a phased implementation of solutions and high coordination between technical services and production departments.

The economic evaluation of projects in the pharmaceutical industry also has its specific features. Unlike many other enterprises, an important criterion here is not only the payback period but also the impact of modernization on production stability, the mitigation of downtime risks, the improvement of product storage conditions, and the enhancement of compliance with international standards.

In this regard, technologies that can be integrated translationally and in phases without substantial intervention into production processes are the most feasible. Such solutions include Free Cooling systems, waste heat recovery, modernization of automation systems, the implementation of heat pumps in a parallel operating mode with existing heat sources, as well as the utilization of energy storage systems.

Practice demonstrates that the most successful projects are those implemented on the basis of a comprehensive energy audit of the enterprise with a phased modernization roadmap. This approach allows for combining short-term measures with a rapid payback and long-term strategic solutions aimed at deep decarbonization and digital transformation.

Thus, the implementation of energy-efficient technologies in the pharmaceutical industry requires not only technical viability but also the consideration of product quality requirements, production continuity, regulatory compliance, and risk management. A comprehensive approach is

precisely the determining factor for the successful modernization of enterprises of this profile.

Prospects for Further Research

A systematic analysis of contemporary scientific literature allows for stating a fundamental paradigm shift in the field of industrial refrigeration supply: from the search for isolated high-efficiency units toward the creation of complex multi-energy ecosystems.

The conducted analysis has enabled the classification of the examined solutions according to their degree of practical availability and economic feasibility:

- Highest priority for implementation: Hybrid free cooling systems with adiabatic support (papers No. 26, 27) and thermal energy storage systems (papers No. 20, 23). These technologies demonstrate a stable technology readiness level (TRL) and a direct economic impact in the form of a 20–30% reduction in OPEX.
- Medium-term perspective: Implementation of model predictive control (MPC) algorithms and digital twins (papers No. 17, 23). Although they provide an additional energy saving of up to 10%, their implementation is constrained by the complexity of integration into existing BMS/SCADA systems.
- Theoretical and strategic level: Concepts of Small Modular Reactors (SMR, paper No. 24) and hydrogen storage systems (paper No. 19). At this stage, they remain objects of mathematical modeling due to high regulatory barriers and capital intensity.

The conducted analysis of modern technologies for enhancing the energy efficiency of pharmaceutical enterprises demonstrated that recent years have witnessed the active development of solutions in the fields of waste heat recovery, the utilization of heat pumps, Free Cooling, energy storage systems, and the digital management of energy processes. At the same time, a number of scientific and practical issues remain insufficiently explored, which restrain the wide implementation of such solutions under industrial conditions.

One of the primary gaps is the limited number of works dedicated specifically to pharmaceutical enterprises. A significant share of published research concerns office buildings, data centers, the residential sector, or general industrial facilities, whereas pharmaceutical manufacturing is characterized by specific requirements for microclimate, room cleanliness, equipment redundancy, and production process continuity. This complicates the direct transfer of obtained results to enterprises of this profile.

The integration of heat supply, refrigeration supply, and ventilation systems into a unified energy complex remains insufficiently studied. In practice, these systems are frequently designed and operated separately, leading to a loss of internal energy balancing potential. Future research requires methods for synchronizing the operation of heat pumps, chillers, energy storage units, and ventilation plants under variable load conditions.

A distinct promising direction is the development of predictive energy consumption management models for enterprises using artificial intelligence algorithms and Model Predictive Control (MPC). Such systems can account for weather conditions, production schedules, electricity tariffs, and the technical condition of equipment, establishing optimal operating regimes in real time. However, for the pharmaceutical industry, such solutions are currently presented to a limited extent.

The economic efficiency of comprehensive enterprise modernization also remains insufficiently explored. In most cases, individual technologies are considered separately, whereas the combined application of heat pumps, Free Cooling, storage systems, and digital control can provide a synergistic effect. Future research requires the creation of life-cycle models for such systems, taking into account capital expenditures, operational expenditures, downtime risks, and environmental effects.

For the countries of Central and Eastern Europe, particularly Ukraine, the adaptation of modern energy-efficient technologies to conditions of unstable power supply, high depreciation of engineering infrastructure, and limited investment resources is highly relevant. In this context, solutions that can be implemented in phases and ensure rapid economic results are of particular significance.

The utilization of digital twins of enterprises represents a promising direction, allowing for the creation of virtual models of energy systems to test modernization scenarios without intervening in actual production processes. The combination of digital twins, SCADA systems, and intelligent data analysis can form the foundation for a new generation of energy-efficient pharmaceutical enterprises.

Thus, further research should be directed toward creating integrated models of energy systems for pharmaceutical enterprises, evaluating combined technological solutions, developing adaptive control algorithms, and forming practical roadmaps for decarbonization of the industry.

This work has performed an analysis of modern technological solutions aimed at enhancing the energy efficiency of pharmaceutical enterprises, specifically waste heat recovery systems, Free Cooling, heat pumps, energy storage, and automated energy consumption management.

CONCLUSIONS

1. It has been established that pharmaceutical enterprises are characterized by a complex energy consumption structure that combines substantial demands for thermal and cooling energy, continuous operation of engineering systems, and increased requirements for the stability of microclimate parameters in accordance with GMP standards.
2. It has been shown that one of the most accessible internal energy-saving reserves is the utilization of waste heat from refrigeration equipment, ventilation systems, and other technological processes. Its

recovery allows for reducing the load on conventional heat sources and decreasing fossil fuel consumption.

3. It has been determined that Free Cooling technology represents an effective solution for enterprises with a constant cooling load and can ensure a significant reduction in the electricity consumption of compressor equipment, particularly under the climatic conditions of Ukraine.
4. It has been substantiated that heat pumps are one of the key tools for the decarbonization of pharmaceutical enterprises, as they allow for utilizing low-grade heat sources and integrating heat and cold generation systems into a unified energy complex.
5. It has been demonstrated that the application of energy storage systems enhances the operational flexibility of the enterprise, reduces peak loads, and improves the reliability of the energy supply, which is critical for continuous production processes.
6. It has been established that automation systems, SCADA, and predictive control algorithms provide an additional energy-saving effect by optimizing equipment operating modes and coordinating the interaction between individual energy subsystems.
7. It has been shown that the most effective approach for the pharmaceutical industry is not the implementation of isolated technologies, but rather a comprehensive, phased modernization that takes into account the technical, economic, and regulatory specifics of the enterprise.
8. Promising directions for further development include the creation of digital twins of the enterprise's energy systems, the utilization of artificial intelligence for load management, and the formation of roadmaps for the decarbonization of the pharmaceutical industry.

The obtained results can be utilized as an analytical foundation for developing energy modernization programs for pharmaceutical enterprises, selecting priority technological solutions, and planning the long-term transition to low-carbon production models.

REFERENCES

1. Fenglei Li, Peifeng Cai, Jing Wang, Chengjun Zhang. Machine learning-driven optimization of an integrated renewable energy system for power, water, and cooling with CO₂ capture. *Energy*, Volume 343, 15 January 2026, 139783 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.139783>
2. Sumit Kumar Singh, Dibakar Rakshit, K Ravi Kumar, Anurag Agarwal. Recent advancements and sustainable solutions in adsorption-based cooling systems integrated with renewable energy sources and industrial waste heat. *Cleaner Engineering and Technology*. Volume 23, December 2024, 100827 <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100827>
3. Ehsanolah Assareh, Ali Dejdard, Ali Ershadi, Masoud Jafarian, Mohammadhossein Mansouri, Amir Salek Roshani, Ehsan Azish, Ehsan Saedpanah, Moon-yong Lee. Techno-economic analysis of combined cooling, heating, and power (CCHP) system integrated with multiple renewable energy sources and energy storage units. *Energy and Buildings*. Volume 278, 1 January 2023, 112618 <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112618>
4. Muhammad Riaz, Sadiq Ahmad, Muhammad Naeem. Joint energy management and trading among renewable integrated microgrids for combined cooling, heating, and power systems. *Journal of Building Engineering*. Volume 75, 15 September 2023, 106921 <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2023.106921>
5. Sabina Rosiek, Manuel S. Romero-Cano, Antonio M. Puertas, Francisco J. Batlles. Industrial food chamber cooling and power system integrated with renewable energy as an example of power grid sustainability improvement. *Renewable Energy*. Volume 138, August 2019, Pages 697-708 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.010>
6. Saeed Rayegan, Shahrooz Motaghian, Ghassem Heidarnejad, Hadi Pashdarshahri, Pouria Ahmadi. Dynamic simulation and multi-objective optimization of a solar-assisted desiccant cooling system integrated with ground source renewable energy. *Applied Thermal Engineering*. Volume 173, 5 June 2020, 115210 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115210>
7. Jamil AlAsfar, Mahmoud Irshidat, Mohammad Mustafa. Review of advancing hybrid renewable energy systems: The strategic role of solar cooling and multi-source integration in arid climates. *Results in Engineering*. Volume 29, March 2026, 109281 <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109281>
8. Alaa Almahmoudi, Mohamed.M. Awad, Mohamed, S. Salem, Osama Abdelrehim, Mohamed Almanzalawy. Urban heat transitions: Renewable integration, digital system optimization, and life-cycle perspectives for fifth-generation district heating and cooling systems. *Unconventional Resources*. Volume 12, July 2026, 100377 <https://doi.org/10.1016/j.unres.2026.100377>
9. Mingyue He, Ning Liu, Guofang Kong. Performance evaluation of an SOFC-ICE hybrid system with pre-compressor cooling and dual-fuel injection for enhanced efficiency in renewable energy applications. *Renewable Energy*. Volume 255, 15 December 2025, 123801 <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123801>
10. Mohamad Ayoub, Ibrahim Dincer. Energy and exergy analyses of an integrated thermal system with compressed air energy storage and carbon capture for power, cooling and domestic hot water applications.

- Thermal Science and Engineering Progress. Volume 72, April 2026, 104586
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2026.104586>
11. R Pandiyan, Praveen Kumar G. Sky radiative cooling: A comprehensive review of material innovations, spectral engineering and sustainable applications for renewable energy systems. *Results in Engineering*. Volume 29, March 2026, 109508
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109508>
 12. Ghulam Qadir Chaudhary, Zhongtao Hu, Suoying He, Muzaffar Ali, Sibghat Ullah, Muhammad Waheed Azam, Muhammad Usman, Ning Qin, Ming Gao. Analysis of building-integrated solar desiccant air cooling systems considering the dynamic sensible and latent cooling loads. *International Journal of Refrigeration*. Volume 181, January 2026, Pages 111-125
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.10.007>
 13. Ziren Wang, Wei Li, Yuyuan Zhang. Two-tier optimal scheduling of integrated energy systems in parks considering P2G-CCS-CHP coupling and electricity-gas-heat-cooling price-demand response. *Energy*. Volume 338, 30 November 2025, 138803
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138803>
 14. Qiushi Wang, Liqi-Duan, Chaoyun Yang, Haozeng Zhao, Luyao Liu, Hanfei Zhang, Nan Zheng, Xingqi Ding. Comprehensive sustainability assessment and emergy analysis of a combined cooling, heating and power system integrated with high-temperature solar thermochemical complementation and low-temperature solar thermal collection processes. *Renewable Energy*. Volume 261, 1 April 2026, 125212
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2026.125212>
 15. Xudong Ma, Yanjun Du, Xiaoqiong Li, Peng Wang, Yuting Wu, Shunan Li, Yu Li, Youdong Wang. Multi-energy complementary heat pumps for low-carbon integrated cooling, heating, and water supply in districts: case study of a school campus. *Applied Thermal Engineering*. Volume 290, Part 2, April 2026, 130030
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.130030>
 16. Philipp Mascherbauer, Lukas Kranzl, Aadit Malla, Simon Pezzutto, Philippe Riviere. How renewable cooling will affect RES target achievement in EU member states under different scenarios by 2030. *Renewable Energy*. Volume 256, Part I, 1 January 2026, 124709
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.124709>
 17. Nanjiang Dong, Tao Zhang, Rui Wang. Multi-objective evolutionary algorithm with two-tier fully-connected weight network for day-ahead scheduling of integrated cooling, heating and power energy systems. *Energy*. Volume 347, 15 March 2026, 140147
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2026.140147>
 18. Yangda Wan, Tinghui Xue, Zhifeng Huang, Xin Cui, Dan Huang, Kian Jon Chua. Energy, economic and environmental assessment of a photovoltaic-driven dew-point evaporative cooling system. *Applied Thermal Engineering*. Volume 289, Part 2, March 2026, 129799
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2026.129799>
 19. Pouya Faghieh Abdollahi, Vajihe Davoodi, Ehsan Amiri Rad. Investigation and comparison of two scenarios of energy systems using compressed air and hydrogen energy storage systems to provide cooling, heating, and electricity load of the building with 4E analysis (energy, exergy, environmental, and economic). *Energy and Buildings*. Volume 361, 15 June 2026, 117342
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2026.117342>
 20. Wei Dai, Wenjiao Xia, Bo Li, HuiHwang Goh, Zhijie Zhang, Fangjun Wen, Chunyang Ding. Increase the integration of renewable energy using flexibility of source-network-load-storage in district cooling system. *Journal of Cleaner Production*. Volume 441, 15 February 2024, 140682
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140682>
 21. Seyed Amirmahdi Hosseini, Rouhollah Ahmadi, Amir Rahmani. Integrated gas heat pump (GHP) system for residential complexes: modeling cooling, hot water, and electricity generation. *Energy Conversion and Management: X*. Volume 29, January 2026, 101477
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101477>
 22. Zhifeng Huang, Xusheng Wang, WeiDong Chen, Md Raisul Islam, Kian Jon Chua. Empowering deep urban decarbonization through smart and renewable district cooling. *Sustainable Cities and Society*. Volume 129, 1 July 2025, 106488
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106488>
 23. Ke Xiang, Zhiyong Tian, Ling Ma, Xinyu Chen, Yongqiang Luo, Yafeng Gao, Jianhua Fan, Qian Wang. Optimization of a free cooling system integrated with cold thermal energy storage in data center based on model predictive control. *Energy*. Volume 336, 1 November 2025, 138389
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.138389>
 24. Hussein Abdulkareem Saleh Abushamah, Radek Skoda. Economics of Small Modular reactors for district cooling systems integrated with thermal storage and Kalina Cycle power generation. *Energy Conversion and Management: X*. Volume 30, May 2026, 101694
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101694>
 25. F. Calise, F.L. Cappiello, L. Cimmino, F.P. Cuomo, M. Vicidomini. A 5th generation district heating cooling network integrated with a phase change material thermal energy storage: A dynamic thermoeconomic analysis. *Applied Energy*. Volume 389, 1 July 2025, 125688
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125688>
 26. Ke Xiang, Zhiyong Tian, Chaohui Zhou, Yongqiang Luo, Wentao Wu, Jianhua Fan, Mahdi Deymi-Dashtebayaz. Performance analysis and optimization

- of a hybrid mechanical and free cooling system with cold water storage for a data center. *Applied Thermal Engineering*. Volume 267, 15 May 2025, 125831 <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125831>
27. Mohamad Hnayno, Ali Chehade, Henryk Klab, Guillaume Polidori, Chadi Maalouf. Experimental investigation of an optimized indirect free cooling system including a dry cooler equipped with evaporative cooling pads for data center. *Energy Reports*. Volume 9, Supplement 12, November 2023, Pages 460-469 <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.12.005>
28. Dolinsky, A. A., & Draganov, B. Kh. (2008). Heat Pumps in Building Heat Supply Systems. *Industrial Heat Engineering*. 2008, Vol. 30, No. 6, pp. 71–83.. Available at: <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/handle/123456789/61202>
29. Sniezhkin, Yu. F. (2023). Heat pumps in drying processes. *Problems of Energy Efficiency and Quality in the Processes of Drying Food Raw Materials: Abstracts of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference*, June 8, 2023, Kharkiv: DBTUn, 53-54. Available at: <https://repo.btu.kharkov.ua/handle/123456789/36759>
30. Zurian, O. V. (2023). Integrated use of underground heat storage, heat pump system and solar collectors. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho [Herald of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University]*, 5(142), 94-102. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.5.11>
31. Morozov, Yu. P., Barylo, A. A., Chalaiev, D. M., & Dobrovolskyi, M. P. (2019). Energy efficiency of using the first from the surface aquifers for heating and cooling supply. *Vidnovliuvana Enerhetyka [Renewable Energy]*, 2, 70-78. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2\(57\).70-78](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).70-78)
32. Zurian, O. V., & Barylo, A. A. (2022). Influence of the natural temperature regime of the upper ground layers on the efficiency of the hydrothermal heat pump system. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 31(3), 575-584. <https://doi.org/10.15421/112254>
33. Babak, V., Nikitin, Ye., & Teslenko, O. (2024). A holistic approach to the systemic transformation of electric power industry, district heating and municipal infrastructure. *System Research in Energy*, 4(80), 6-25. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.006>