

УДК 621.577.4:697.342:727.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.6.1/21>**Форись С.М.**

Український державний університет науки і технологій

Усенко А.Ю.

Український державний університет науки і технологій

Шемет Т.М.

Український державний університет науки і технологій

ГЕОТЕРМАЛЬНІ ТЕПЛОВІ НАСОСИ З БАГАТОКОНТУРНИМИ ГРУНТОВИМИ ПОЛЯМИ ДЛЯ АВТОНОМНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ КАМПУСІВ

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю трансформації кампусних інфраструктур до низьковуглецевих, автономних та високоефективних систем теплопостачання, у яких використання геотермальних теплових насосів з багатоконтурними ґрунтовими полями розглядається як одне з найперспективніших рішень. З огляду на високу сезонну та добову мінливість теплових навантажень сучасних кампусів і значну неоднорідність геологічних умов виникає потреба у науковому обґрунтуванні оптимальних параметрів проєктування та експлуатації таких систем.

Мета статті полягає у науковому обґрунтуванні інженерних принципів проєктування та раціональних режимів експлуатації геотермальних теплових насосів із багатоконтурними ґрунтовими полями з урахуванням теплофізичних властивостей ґрунту, динаміки теплового навантаження кампусу та вимог енергоефективності.

Методи дослідження включають системний аналіз теплофізичних параметрів ґрунтових масивів, моделювання довготривалої динаміки температурних полів, структурно-технологічний аналіз роботи теплових насосів у змінних режимах та оцінювання техніко-експлуатаційних умов інтеграції геотермальних установок у теплові мережі кампусу. Застосовано аналітичне порівняння конфігурацій багатоконтурних полів і параметрів їх взаємодії з тепловими насосами, а також проведено аналіз світової практики функціонування подібних систем.

У результаті проведеного дослідження встановлено закономірності формування та еволюції температурного поля багатоконтурних ґрунтових масивів, доведено визначальну роль теплопровідності, вологості й геометрії контурів у забезпеченні стабільної тепловіддачі. Обґрунтовано критичний вплив температури теплоносія на вході, гідравлічного балансування та динаміки теплового опору ґрунту на сезонну ефективність теплових насосів. Виявлено техніко-експлуатаційні умови для успішної інтеграції геотермальних систем у теплову інфраструктуру кампусу та визначено основні проблеми довготривалої стійкості багатоконтурних полів, зокрема деградацію теплового потенціалу, геологічну неоднорідність і територіальні обмеження.

У висновках доведено, що поєднання багатоконтурної структури ґрунтових полів з інтелектуальними стратегіями керування, резервуванням критичних елементів та застосуванням низькотемпературних внутрішніх мереж формує передумови для забезпечення автономного, стабільного та енергоощадного теплопостачання кампусів у довгостроковому періоді.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з такими напрямками: розробленням точніших моделей термогідродинаміки ґрунтових масивів, удосконаленням методик визначення оптимальної щільності свердловин на обмежених територіях та інтеграцією геотермальних систем у мультимеджерельні енергетичні комплекси нового покоління.

Ключові слова: геотермальна енергетика кампусів, багатоконтурні ґрунтові системи, сезонна теплова ефективність, термогідродинаміка ґрунту, інтелектуальне теплове керування.

Постановка проблеми. Геотермальні теплові насоси з багатоконтурними ґрунтовими полями розглядаються як перспективна основа для формування автономних систем теплопостачання кампусів. Однак їх ефективність істотно залежить від специфіки геологічних умов, режимів експлуатації та можливостей інтеграції з існуючою інфраструктурою. Проблема полягає в недостатньому науковому обґрунтуванні основних параметрів, що забезпечують оптимальну теплову віддачу ґрунтових контурів протягом довгострокових циклів навантаження, а також у відсутності комплексних методичних підходів до проектування систем, здатних працювати у режимі повної або часткової автономії. Характерною особливістю великих освітніх та наукових кампусів є значні коливання теплового попиту, що ускладнює підтримання стабільної температурної рівноваги ґрунтового масиву та потребує розроблення енергоефективних схем регулювання. Наукові завдання полягають у дослідженні теплофізичних властивостей ґрунтів, моделюванні довгострокової динаміки температурних полів, обґрунтуванні конструктивних рішень багатоконтурних систем та визначенні умов їх оптимізації у різних кліматичних і геологічних сценаріях. Практичні завдання дослідження сформовані необхідністю вирішення таких проблем: забезпечення надійності та безперервності теплопостачання, зниження залежності кампусів від централізованих мереж, підвищення енергоефективності будівель і скорочення експлуатаційних витрат. Розв'язання зазначених завдань є визначальним для впровадження стійких низьковуглецевих рішень у сфері теплової інфраструктури та формування автономних енергетичних систем нового покоління.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Огляд сучасних досліджень дозволяє виокремити чотири основні наукові напрями. Перший напрям охоплює моделювання теплових процесів у ґрунтовому середовищі та розроблення методів діагностики стану геотермальних контурів. У дослідженні С. Поперегняка (S. Poperehnyak) та співавторів розглянуто застосування сенсорних ентропійних джерел для забезпечення достовірного контролю параметрів ґрунтових систем, які впливають на роботу теплових насосів [1]. Як показали Б. Басок (B. Basok) та співавтори, двовимірна модель теплообміну в ґрунтовому масиві дозволяє відтворювати динаміку температурного поля під час роботи горизонтальних теплообмінників [2]. Методи контролю та діагностики відмов у складних теплотехнічних системах проаналізу-

вали С. Буффа (S. Buffa) та співавтори, що є актуальним для багатоконтурних геотермальних полів [3]. У праці С. Ху (S. Hu) та співавторів узагальнено підходи до поєднання ґрунтових і сонячних низькопотенційних джерел тепла з метою стабілізації теплового балансу системи [4]. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно спрямувати на побудову тривимірних моделей теплообміну з урахуванням анізотропії ґрунтів і взаємодії контурів високої щільності.

Другий напрям досліджень присвячений гібридизації геотермальних систем та їх інтеграції в багатоджерельні архітектури теплопостачання. У праці В. Чу (W. Chu) та співавторів систематизовано напрями розвитку сталих енергетичних систем, що включає комбіновані моделі, які інтегрують низькопотенційні джерела тепла [5]. Можливості адаптації теплових мереж до кліматичних змін дослідили Б. Басок (B. Basok) та співавтори. Вони акцентували увагу на перспективності застосування геотермальної енергії як базового елемента стабілізації теплових балансів [6]. У дослідженні Р. Хашмі (R. Hashmi) та співавторів обґрунтовано значення цифрових двійників для підвищення ефективності та безпеки відновлюваних енергетичних комплексів, що охоплюють геотермальні підсистеми [7]. Оцінку можливостей залучення CO₂-теплотруб у багатоконтурних схемах з метою інтенсифікації вилучення геотермальної енергії провели Г. Лей (G. Lei) та співавтори [8]. У межах цього напрямку подальші дослідження варто спрямувати на створення гнучких адаптивних систем, які оптимально поєднують геотермальну, сонячну та інші відновлювані енергетичні компоненти.

Третій напрям дослідження присвячений інженерним рішенням та оптимізації конструкцій багатоконтурних систем геотермального теплозабезпечення. У праці С. Чаппіді (S. Chappidi) та співавторів запропоновано комбіновану коаксіально-У-подібну замкнену систему, яка забезпечує підвищений тепловідбір порівняно з традиційними ґрунтовими теплообмінниками [9]. Серійно-паралельні схеми взаємодії теплових насосів і чилерів дослідили А. Агарід (A. Agharid) та співавтори. Така взаємодія дозволяє зменшувати енергоспоживання у великих будівлях, зокрема кампусних [10]. У своєму дослідженні Дж. Хао (J. Hao) та співавтори обґрунтували моделі оптимізації планування розподілених енергетичних систем з урахуванням геотермальних компонентів у структурі теплопостачання [11]. Експериментальне дослідження двофазних термосифонів

здійснили Х. Ліу (H. Liu) та співавтори. Вони встановили, що геометричні характеристики суттєво впливають на ефективність вилучення низькотемпературної геотермальної енергії [12]. Подальший розвиток цього напрямку варто спрямувати на вдосконалення матеріалів, структурних конфігурацій та параметризації контурів для збільшення тепловіддачі і довговічності систем.

Четвертий напрям стосується системного аналізу, енергетичної оптимізації та цифровізації теплопостачальних мереж, у яких геотермальні системи є провідним елементом автономної інфраструктури кампусів. У дослідженні С. Джу (S. Ju) та співавторів запропоновано матричний метод моделювання теплових мереж, особливістю якого є мінімізація ентропійних втрат, що може бути адаптовано до багатоконтурних геотермальних структур [13]. Вплив відновлюваних джерел енергії на ефективність інтегрованих енергетичних систем проаналізували Дж. Оєкале (J. Oyekale) та співавтори. Отримані результати мають безпосереднє значення для автономних кампусних мереж теплопостачання [14]. Систематизацію підходів до застосування енергоефективних VRF-систем провели Р. Парамешваран (R. Parameshwaran) та співавтори. Дослідники наголосили на потенціалі синергії цих систем із геотермальними тепловими насосами [15]. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно спрямувати на створення кіберфізичних моделей багатоконтурних ґрунтових полів, які інтегрують цифрові двійники, прогностичні алгоритми та адаптивні системи керування.

Попри значну кількість наявних досліджень, зберігається низка невіршених завдань, які стосуються аспектів роботи геотермальних систем із багатоконтурними ґрунтовими полями. Насамперед недостатньо досліджено довгострокову динаміку температурного поля за умов змінного навантаження, що ускладнює прогноз термального ресурсу. Невизначеними залишаються параметри взаємодії теплового насоса з контурами, зокрема вплив гідравлічного балансування та динаміки теплового опору на сезонну ефективність. Додаткові прогалини у знаннях стосуються інтеграції геотермальних систем у комплексні мережі кампусів, де поєднуються пікові режими, потреба в резервуванні та вимоги до енергоощадності. Переважно невіршеними залишаються питання довгострокової стабільності багатоконтурних полів, пов'язані з деградацією тепловіддачі, геологічною неоднорідністю та територіальними обмеженнями. Запропоноване дослідження заповнює окреслені прогалини, оскільки охо-

плює моделювання розвитку температурного поля, обґрунтування моделей взаємодії теплового насоса з ґрунтовими контурами, визначення інтеграційних умов для кампусних мереж і систематизацію технічних ризиків, що впливають на довгострокову роботу. Таким чином, дослідження поглиблює наукове розуміння поведінки геотермальних систем і формує базу для підвищення їх автономності, енергоефективності та надійності в реальних експлуатаційних умовах.

Постановка завдання. Мета статті полягає в науковому обґрунтуванні принципів проектування та експлуатації геотермальних теплових насосів із багатоконтурними ґрунтовими полями для забезпечення автономного теплопостачання кампусів з урахуванням теплофізичних характеристик ґрунту, динаміки теплового навантаження та вимог енергоефективності.

Завдання статті:

1. Дослідити закономірності формування та довгострокову динаміку температурного поля багатоконтурних ґрунтових систем і обґрунтувати моделі їх взаємодії з тепловими насосами для забезпечення стабільної сезонної ефективності.

2. Встановити техніко-експлуатаційні умови інтеграції геотермальних систем у теплову інфраструктуру кампусу, врахувати пікові режими споживання, енергоощадні стратегії та вимоги до надійності й резервування.

3. Виявити головні науково-практичні обмеження довгострокової стабільності багатоконтурних полів та сформулювати практичні рекомендації щодо оптимізації проектних і експлуатаційних рішень з метою підвищення автономності та енергоефективності системи.

Виклад основного матеріалу. Формування та динаміка температурного поля багатоконтурних ґрунтових систем у режимах тривалого змінного теплового навантаження визначаються поєднанням теплофізичних характеристик ґрунту, геометрії контурів, інтенсивності відбору тепла та сезонних коливань попиту на теплову енергію в межах кампусу. У реальних умовах функціонування теплового насоса зумовлює поступове охолодження ґрунтового масиву в зимовий період та часткове його відновлення влітку, що формує складну багатопланову конфігурацію температурних градієнтів. Наявність багатоконтурної структури дозволяє розподіляти навантаження між різними зонами поля, зменшуючи ризик локального переохолодження, однак потребує точного моделювання з метою підтримання довготривалої теплової рівноваги. Проблема ускладнюється

неоднорідністю ґрунтів, різною теплопровідністю геологічних шарів та обмеженнями території кампусу. Ці фактори створюють труднощі при розміщенні контурів. Саме тому визначення закономірностей формування температурного поля у багатоциклових режимах є визначальним для прогнозування термального ресурсу системи та забезпечення стабільної ефективності теплового насоса (табл. 1).

У практиці сучасних кампусних енергетичних систем багатоконтурні ґрунтові поля функціонують як термодинамічно активне середовище-акумулятор, у якому температура формується під впливом сукупності взаємозалежних параметрів, систематизованих у Таблиці. Під час зимового відбору тепла навколо зондів поступово виникає термічна депресія, яка у добре насичених вологою ґрунтах поширюється повільніше завдяки високій теплопровідності та значній теплоємності. У кампусах із щільною забудовою, наприклад університетських містечках Північної Європи чи Північної Америки, це дозволяє зменшити глибину зондів і водночас підтримувати стабільність теплопостачання у періоди пікових навантажень [11]. У посушливих або дренажних ґрунтах температура знижується швидше, тому практикується збільшення міжконтурного кроку або чергування активних контурів для запобігання локальному переохолодженню. У реальних проєктах теплові масиви функціонують як довгострокові сезонні акумулятори: влітку ґрунт частково відновлює температуру через інверсію теплових потоків та відведення надлишку тепла від будівель, що особливо ефективно застосовується на кампусах зі значним навантаженням від лабораторій чи серверних [2, р. 275–276]. Багатоконтурна архітектура дозволяє застосовувати адаптивні режими керування – система автоматично перемикає

групи зондів, віддаючи пріоритет тим, у яких тепловий потенціал є більшим, що забезпечує рівномірне використання поля та знижує деградацію його продуктивності. Така організація роботи дає можливість підтримувати стабільну температуру на вході в тепловий насос протягом усього циклу, подовжувати життєвий ресурс інфраструктури та мінімізувати ризики перевантаження окремих контурів. Це критично важливо для забезпечення безперервності енергопостачання великих навчальних і наукових кампусів.

Взаємодія теплового насоса з ґрунтовими контурами визначається термодинамічними умовами компресійного циклу та тепловим станом ґрунтового поля, від якого система отримує низькопотенційне тепло. Критичними параметрами є температура теплоносія на вході, гідравлічний баланс контурів і динаміка теплового опору ґрунту. Ці чинники разом визначають сезонну ефективність коефіцієнта перетворення теплової енергії – коефіцієнта продуктивності (Coefficient of Performance, COP) та довготривалу стабільність роботи системи в умовах змінного навантаження кампусу (табл. 2).

У сучасній практиці кампусного теплопостачання взаємодія теплового насоса і ґрунтових контурів забезпечує режим адаптивної термодинамічної рівноваги, критично важливий для систем з високою сезонною варіабельністю навантаження. На прикладі північноєвропейських університетських кампусів інверторні компресори використовуються для плавного реагування на добові температурні коливання, що дозволяє утримувати COP на стабільному рівні навіть за інтенсивного зимового відбору тепла [4]. У кампусах із лабораторіями та дата-центрами активно застосовується реверсивний режим роботи, який забезпечує перенесення надлишкового літнього

Таблиця 1

Основні параметри, що визначають формування температурного поля багатоконтурних ґрунтових систем

Параметр	Опис	Практичний вплив у кампусних системах
Теплопровідність ґрунту	Здатність ґрунту передавати тепло в умовах тривалого відбору	Визначає швидкість охолодження і глибину термічної депресії навколо контурів
Вологість і насиченість	Співвідношення твердої, рідкої та газової фаз у ґрунті	Впливає на стабільність тепловіддачі та коливання сезонної ефективності
Геометрія контурів	Глибина, крок, кількість і просторове розміщення зондів	Забезпечує рівномірність навантаження та знижує ризик локального переохолодження
Інтенсивність теплового навантаження	Обсяг тепла, що вилучається тепловим насосом у різні періоди року	Формує амплітуду сезонних змін температурного поля
Час відновлення ґрунтового масиву	Тривалість природного повернення температури після періоду відбору	Визначає довгострокову здатність системи працювати без деградації ефективності

Джерело: сформовано на основі [1, р. 364–365; 2, р. 275–276; 11; 12].

тепла у ґрунтовий масив і таким чином відновлює його термальний ресурс перед опалювальним сезоном [1, р. 370]. Системи гідравлічного балансування, встановлені у багатоконтурних полях Північної Америки, дозволяють рівномірно розподіляти теплове навантаження між групами свердловин, що знижує ризик локального переохолодження та подовжує життєвий цикл контурів [10]. Завдяки використанню моделей SCOP проєктувальники отримують можливість здійснити оцінку реальної ефективності системи в річному режимі та адаптувати кількість контурів та їх глибину до геологічних умов, забезпечуючи підвищену автономність і енергостійкість кампусної інфраструктури.

Інтеграція геотермальних систем у теплову інфраструктуру кампусу потребує узгодження технічних параметрів роботи теплового насоса з динамікою внутрішньої теплової мережі, режимами споживання та вимогами до надійності. На відміну від традиційних систем, геотермальна інфраструктура не реагує миттєво на пікові зміни

навантаження, тому важливими є попереднє моделювання режимів, оптимізація гідравлічних схем та впровадження резервних і допоміжних енергетичних модулів. Техніко-експлуатаційні умови інтеграції вимагають збалансованості між сталим базовим навантаженням, можливістю покриття короткочасних піків та інтелектуальним керуванням, спрямованим на зниження енергоспоживання без компромісу щодо безперервності теплопостачання (табл. 3).

Техніко-експлуатаційна інтеграція геотермальних систем зосереджена на досягненні стабільного базового теплового внеску та ефективному керуванні короткочасними нерівностями споживання. На кампусах Канади геотермальна система зазвичай покриває приблизно дві третини середньорічного теплового навантаження, тоді як решта компенсується піковими котлами, які вмикаються лише у дні екстремально низьких температур [15, р. 120]. Це дозволяє зберігати роботу геотермальної частини у сталому режимі без перевантаження. У технічних університетах Скандинавії

Таблиця 2

Основні параметри та моделі взаємодії теплового насоса з ґрунтовими контурами

Параметр / Модель	Наукова характеристика	Вплив на сезонну ефективність і стабільність
Температура теплоносія на вході	Визначає термодинамічний стан циклу компресії пари	Зниження температури спричиняє падіння COP на 3–5 % за кожен градус
Гідравлічний баланс контурів	Рівномірність витрати в паралельних гілках	Запобігає локальному переохолодженню та зберігає стабільність подачі
Нелінійний тепловий опір ґрунту	Враховує сезонні зміни теплопровідності та накопичення теплової депресії	Дозволяє прогнозувати погіршення роботи за інтенсивного навантаження
Модель сезонного COP (Seasonal Coefficient of Performance, SCOP)	Враховує річні коливання температури ґрунту й теплового навантаження будівель	Формує реалістичну оцінку ефективності в річному циклі
Алгоритми керування інверторного компресора	Динамічне регулювання частоти обертів під тепловий попит	Підвищує гнучкість системи, знижує пікові навантаження на ґрунт

Джерело: сформовано на основі [1, р. 370; 4; 10; 13, р. 334].

Таблиця 3

Техніко-експлуатаційні умови інтеграції геотермальних систем у теплову інфраструктуру кампусу

Умова	Технічна характеристика	Значення для інтеграції
Узгодження базового теплового навантаження	Співвідношення між потужністю теплового насоса та середньодобовим тепловим попитом	Забезпечує стабільний режим роботи та мінімізує використання резервних джерел
Покриття пікових навантажень	Використання допоміжних систем: акумуляторів тепла або пікових котлів	Створює гнучкість системи та гарантує безперебійність у періоди максимального попиту
Енергоощадні стратегії керування	Алгоритми прогнозування попиту, нічне зниження потужності, теплові буферні ємності	Оптимізують споживання електроенергії та зменшують експлуатаційні витрати
Резервування системних компонентів	Дублювання насосного обладнання та ключових елементів гідравлічної схеми	Підвищує надійність і знижує ризики відмов у критичних режимах
Інтеграція з внутрішньою мережею будівель	Узгодження температурних графіків, гідравлічних опорів та часових профілів споживання	Забезпечує ефективність передачі тепла й адаптацію системи до реального споживання

Джерело: сформовано на основі [5; 6; 14; 15, р. 120].

широке застосування отримали великі буферні ємності, які акумулюють тепло нічного періоду або надлишкове тепло від систем рекуперації, вирівнюючи добові коливання попиту й суттєво знижуючи навантаження на електромережу під час пікових годин.

У кампусах з інтенсивним і нерівномірним споживанням – наприклад, наукових центрах з лабораторіями та майстернями – використовують зональне керування гідравлікою. Кожен корпус отримує тепловий потік відповідно до свого фактичного графіка роботи, що дозволяє уникати надлишкових або недостатніх подач тепла. У США поширеною практикою є дублювання насосних станцій та використання незалежних контурів циркуляції, що уможлиблює обслуговування або модернізацію окремих елементів без зупинки системи [4]. На деяких кампусах із високою часткою скляних фасадів застосовуються погодні алгоритми, які враховують інсоляцію та вітрові навантаження, що дозволяє тепловому насосу працювати з нижчою потужністю у світлі години. Завдяки застосуванню наведених практичних рішень геотермальна система стає ядром інфраструктури теплопостачання кампусу, забезпечуючи поєднання стабільності, гнучкості та енергоощадності, що є обов'язковим для сучасних освітніх і наукових комплексів.

Проектування та довгострокова експлуатація багатоконтурних ґрунтових полів ускладнюються низкою науково-практичних проблем, які безпосередньо впливають на термічну стабільність системи та її здатність забезпечувати сталу тепловіддачу. Однією з основних є деградація теплового потенціалу ґрунту, яка виникає через кумулятивне охолодження масиву в умовах багаторічної експлуатації, коли процес природного відновлення температури не встигає компенсувати сезонний відбір тепла. Це призводить до поступового зниження температури теплоносія на вході та зменшення коефіцієнта продуктивності теплового насоса. Додатковою проблемою є геологічна неоднорідність, що проявляється у значних варіаціях теплопровідності та вологості між окремими шарами. Це призводить до нерівномірної роботи контурів та формування асиметричних температурних зон, що ускладнює прогнозування довгострокової тепловіддачі.

Обмеженість території кампусу створює дефіцит площі для оптимального розміщення свердловин: зменшення міжконтурного кроку підвищує теплову взаємодію між зондами та прискорює формування термічних депресій. Це особливо кри-

тично для щільно забудованих ділянок, де ґрунтове поле доводиться розташовувати у геометрично стиснутих масивах [11]. Ускладнюючим фактором є невизначеність гідрогеологічних процесів: підземні води можуть як покращувати тепловіддачу за рахунок конвекції, так і спричиняти непередбачувані перерозподіли теплових потоків, які порушують роботу моделі теплового розрахунку.

Важливою технічною проблемою є складність гідравлічного балансування багатоконтурних систем: незначні відмінності в довжині або глибині свердловин можуть спричинити нерівномірність циркуляції та прискорене охолодження окремих гілок. Довгострокову стабільність погіршує також потенційна деградація матеріалів зондів і трубопроводів під дією циклічних температурних навантажень, що вимагає контролю хімічної стійкості теплоносія та ретельного вибору полімерних матеріалів. У деяких випадках суттєвою проблемою залишається невизначеність математичних моделей, які часто спрощують реальну термогідродинаміку ґрунту, що ускладнює точне прогнозування термічного ресурсу поля в горизонті 20–30 років [13, р. 332].

Сукупність цих проблем формує багатоаспектне науково-практичне завдання – забезпечити довготривалу стабільність теплового поля в умовах складної геології, територіальних обмежень та змінного теплового навантаження, мінімізуючи ризики деградації та підвищуючи надійність системи протягом усього життєвого циклу.

Практичні рекомендації щодо оптимізації проєктних рішень і режимів експлуатації геотермальних теплових насосів у кампусних системах мають ґрунтуватися на принципі поєднання стабільного базового навантаження з керованою гнучкістю та цифровізованим контролем. На етапі проєктування доцільно орієнтуватися на покриття геотермальною системою більшої частини середньорічного теплового попиту кампусу, залишаючи пікові навантаження для допоміжних джерел, які працюють обмежений час. Це дає змогу зменшити встановлену потужність теплових насосів і ґрунтового поля, оптимізувати капітальні витрати та уникнути перевантаження ґрунтового масиву. Вибір конфігурації багатоконтурного поля має базуватися на детальному гідрогеологічному обстеженні з урахуванням теплопровідності, вологості, можливого руху ґрунтових вод і територіальних обмежень. Крок між свердловинами слід визначати не за емпіричними нормами, а за результатами теплотехнічного моделювання з горизонтом не менше 20–25 років.

З метою забезпечення енергоефективності та автономності особливого значення набуває впровадження інтелектуальних систем керування, які поєднують погодозалежні алгоритми, прогнозування теплового навантаження і динамічне керування групами контурів та роботою інверторних компресорів. Такі системи дають змогу згладжувати пікові навантаження, уникати надмірного охолодження окремих зон ґрунтового поля, підтримувати стабільний COP і зменшувати споживання електроенергії у години максимального тарифу. Додатковий ефект дає інтеграція геотермальної системи з низькотемпературними внутрішніми мережами опалення та вентиляції, зокрема з поверхневим опаленням, фанкойлами та рекуперативними установками, що дозволяють працювати на нижчих температурних графіках і підвищувати загальну ефективність.

Для зниження життєвого циклу витрат критично важливо закладати у проєкт сервісну придатність і модульність: застосування стандартних елементів, можливість поетапного розширення поля, дублювання ключових насосних агрегатів і вузлів керування. Рекомендованим є створення цифрового двійника геотермальної системи на основі даних, отриманих з датчиків температури, витрати і споживання енергії, що дозволяє в режимі реального часу відстежувати стан ґрунтового поля, виявляти відхилення від розрахункових режимів та своєчасно коригувати стратегію експлуатації. Поєднання таких підходів забезпечує не лише енергоощадність і високу автономність теплопостачання кампусу, а й мінімізацію сукупних витрат на проєктування, будівництво, обслуговування та модернізацію системи упродовж усього її життєвого циклу.

Висновки. У дослідженні встановлено, що ефективність геотермальних теплових насосів

з багатоконтурними ґрунтовими полями визначається узгодженою взаємодією теплофізичних властивостей ґрунту, геометрії свердловин, режимів теплового навантаження та параметрів роботи теплового насоса. Показано, що температура теплоносія на вході, гідравлічний баланс контурів і динаміка теплового опору ґрунту формують основу сезонної ефективності системи, а використання моделей SCOP та інтелектуальних алгоритмів керування створює умови для стабільної роботи в умовах нерівномірного попиту.

За результатами дослідження виявлено коло проблем, що стримують довгострокову стабільність багатоконтурних полів: поступова деградація тепловіддачі через кумулятивне охолодження, геологічна неоднорідність, обмеження простору для оптимального розміщення свердловин, непередбачуваність гідрогеологічних процесів, складність гідравлічного балансування та обмежена точність існуючих математичних моделей. Кожен із цих чинників впливає на здатність системи зберігати розрахунковий термічний ресурс протягом десятиліть. Практичні рекомендації, сформульовані в роботі, спрямовані на оптимізацію проєктування та експлуатації шляхом використання адаптивного керування, низькотемпературних внутрішніх мереж, поетапної модульності, резервування ключових вузлів та створення цифрових двійників для моніторингу стану ґрунтового поля й динамічної корекції режимів. Перспективи подальших досліджень охоплюють розроблення удосконалених багатовимірних моделей теплової еволюції ґрунту, комплексних методик розрахунку щільності й конфігурації свердловин для обмежених територій, а також інтеграцію геотермальних систем у мультиджерельні енергетичні кластери, які здатні забезпечувати стійкість і гнучкість майбутніх низьковуглецевих кампусних інфраструктур.

Список літератури:

1. Poperehnyak S., Syvachenko I., Shevchuk Y. Enhancing pseudorandom number generation using environmental sensor-based entropy sources. *Cybersecurity Providing in Information and Telecommunication Systems (CPITS 2025): Proceedings of the Workshop*. 2025. Vol. 3991. P. 363–380. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3991/paper26.pdf>
2. Basok B., Pavlenko A., Nedbailo O., Bozhko I., Moroz M. A Two-dimensional Numerical Model of Heat Exchange in the Soil Massif During the Operation of a Shallow Horizontal Soil Heat Exchanger. *Rocznik Ochrona Środowiska*. 2023. Vol. 25. P. 274–281. DOI: <https://doi.org/10.54740/ros.2023.029>
3. Buffa S., Fouladfar M. H., Franchini G., Lozano Gabarre I., Andres Chicote M. Advanced control and fault detection strategies for district heating and cooling systems – A review. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 1. Article 455. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11010455>
4. Hu S., Liu J., Lu X., Zhang W. A Review of Geothermal–Solar Hybrid Power-Generation Systems. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 21. Article 5852. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18215852>
5. Chu W., Vicidomini M., Calise F., Duić N., Østergaard P. A., Wang Q., da Graça Carvalho M. Review of hot topics in the Sustainable Development of Energy, Water, and Environment Systems Conference in 2022. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 23. Article 7897. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16237897>

6. Basok B., Bazeev E., Pavlenko A., Kurayeva I. Municipal Heat Energy of Ukraine – Adaptation to Global Warming. *Rocznik Ochrona Srodowiska*. 2021. Vol. 23. DOI: <https://doi.org/10.54740/ros.2021.039>
7. Hashmi R., Liu H., Yavari A. Digital twins for enhancing efficiency and assuring safety in renewable energy systems: A systematic literature review. *Energies*. 2024. Vol. 17, № 11. Article 2456. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17112456>
8. Lei G., Yu X., Li T., Habibzadeh-Bigdarvish O., Wang X., Mrinal M., Luo C. Feasibility study of a new attached multi-loop CO₂ heat pipe for bridge deck de-icing using geothermal energy. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 275. Article 123160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123160>
9. Chappidi S., Kumar A., Singh J. Geothermal energy extraction using a novel combined coaxial and U-shaped closed-loop system. *Geothermics*. 2024. Vol. 119. Article 102968. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.102968>
10. Agharid A. P., Permana I., Wang F., Lee M. Energy-saving and carbon reduction analysis of series/parallel combination for heat pump and chiller in a hotel building. *Energy and Buildings*. 2024. Vol. 325. Article 115022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115022>
11. Hao J., Yang Y., Xu C., Du X. A comprehensive review of planning, modeling, optimization, and control of distributed energy systems. *Carbon Neutrality*. 2022. Vol. 1, № 1. Article 28. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43979-022-00029-1>
12. Liu H., Wang X., Gan W., Gao H., Yao H., Wang Y., Zhu Y. Experimental investigation on extraction of shallow geothermal energy by flexible two-phase closed thermosyphons: Effect of geometric parameters. *Energy and Buildings*. 2023. Vol. 298. Article 113515. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113515>
13. Ju C., Tian L., Hao J., Yang Y., Ge Z., Du X. Matrixed modeling method and entropy generation minimization analysis of heat supply system based on standard thermal resistance. *Energy Science & Engineering*. 2023. Vol. 11, № 1. P. 331–346. DOI: <https://doi.org/10.1002/ese3.1335>
14. Oyekale J., Petrollese M., Tola V., Cau G. Impacts of renewable energy resources on effectiveness of grid-integrated systems: Succinct review of current challenges and potential solution strategies. *Energies*. 2020. Vol. 13, № 18. P. 4856. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13184856>
15. Parameshwaran R., Karunakaran R. Energy efficient variable refrigerant flow systems for modern buildings. In: *Variable Refrigerant Flow Systems: Advances and Applications of VRF*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. P. 117–144. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-6833-4_6

Forys S.M., Usenko A.Yu., Shemet T.M. GEOTHERMAL HEAT PUMPS WITH MULTILoop GROUND FIELDS FOR AUTONOMOUS CAMPUS HEAT SUPPLY

The relevance of this study arises from the growing need to transform campus infrastructure into low carbon, autonomous, and highly efficient heating systems in which geothermal heat pumps with multiloop ground fields represent one of the most promising solutions. Given the high seasonal and daily variability of thermal loads in modern campuses and the significant heterogeneity of geological conditions, there is a demand for scientifically grounded design and operational parameters for such systems.

The aim of the article is to substantiate the engineering principles of designing and operating geothermal heat pumps with multiloop ground fields, taking into account the thermophysical properties of the soil, the dynamic thermal load of the campus, and energy efficiency requirements.

The research methods include a systematic analysis of the thermophysical characteristics of soil masses, long term temperature field modeling, structural and technological analysis of heat pump performance under variable operating modes, and evaluation of the technical and operational conditions for integrating geothermal systems into campus heating networks. The study applies analytical comparisons of multiloop field configurations and their interaction parameters with heat pumps, as well as an examination of global best practices in the operation of similar systems.

The results reveal the governing patterns in the formation and evolution of temperature fields in multiloop ground masses and demonstrate the fundamental role of thermal conductivity, soil moisture, and loop geometry in maintaining stable heat extraction. The study substantiates the critical influence of inlet fluid temperature, hydraulic balancing, and the dynamics of soil thermal resistance on the seasonal efficiency of heat pumps. It also identifies the technical and operational conditions required for successful integration of geothermal systems into campus thermal infrastructure and outlines key challenges to the long term stability of multiloop fields, including heat potential degradation, geological heterogeneity, and spatial constraints.

The conclusions confirm that combining a multiloop ground field structure with intelligent control strategies, redundancy of critical components, and the use of low temperature internal heating networks creates the necessary conditions for autonomous, stable, and energy efficient campus heat supply over the long term.

Future research prospects include advancing thermohydrodynamic models of soil masses, improving methods for determining optimal borehole density in constrained areas, and integrating geothermal systems into next generation multisource energy complexes.

Key words: *campus geothermal energy, multiloop ground systems, seasonal thermal efficiency, soil thermohydrodynamics, intelligent thermal control.*

Дата надходження статті: 24.11.2025

Дата прийняття статті: 17.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025