

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.81>
УДК 697.9:621.577:621.472

Результати чисельного моделювання ефективності гібридної системи теплопостачання муніципального призначення для кліматичних умов Півдня України

Жайворон Оксана Сергіївна¹⁾

Д-р філософії, ст. викладач каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6750-2388>; zhaivoron.o.s@op.edu.ua

Бурдовіцин Микола Володимирович¹⁾

Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5858-3621>; 744160@stud.op.edu.ua

Картишов Іван Сергійович¹⁾

Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7451-3447>; kartyshov.8865224@stud.op.edu.ua

Тарба Владислав Юрійович¹⁾

Студент каф. Теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3155-2261>; tarba.8865238@stud.op.edu.ua

¹⁾ Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1. Одеса, 65044, Україна

АНОТАЦІЯ

Сучасний розвиток енергетичного сектору України визначається зростанням потреб у тепловій енергії та необхідністю скорочення використання викопних ресурсів, що актуалізує питання енергоефективності та інтеграції відновлюваних джерел у системи теплопостачання. Особливу увагу привертають гібридні рішення, які поєднують теплові насоси з ґрунтовими теплообмінниками та сонячні колектори, що дозволяє досягти балансу між надійністю, економічністю та екологічністю. Метою статті є обґрунтування доцільності застосування гібридної системи теплопостачання для адміністративної будівлі в місті Одеса, де поєднання високого рівня сонячної радіації та специфічних кліматичних умов створює унікальні можливості для ефективної роботи таких систем. Методологічна база дослідження включала аналітичні розрахунки, моделювання теплонасосного циклу, чисельне відтворення роботи геліосистем із застосуванням програмного забезпечення ЕКО-power, а також техніко-економічний аналіз варіантів. Проведене оцінювання підтвердило значний вплив термомодернізаційних заходів: утеплення фасадів, покрівлі та заміна вікон дозволили знизити теплові втрати будівлі більш ніж утричі, створюючи умови для стабільної роботи теплового насоса. Встановлення рекуператорів у системі вентиляції забезпечило щорічну економію понад 42 тис. кВт·год, що зменшило навантаження на джерела теплопостачання майже у п'ять разів. Розрахунки теплонасосного циклу з ґрунтовим теплообмінником показали його здатність стабільно покривати базові теплові навантаження з високим коефіцієнтом перетворення. Моделювання роботи сонячних колекторів підтвердило їхню ефективність у літній період та під час міжсезоння, проте висока вартість обладнання зумовлює тривалий термін окупності (понад 13 років), що робить їх доцільними переважно як допоміжне джерело теплоти. Техніко-економічний аналіз виявив, що використання ґрунтового теплового насоса забезпечує найкоротший строк окупності – близько 2,3 року – завдяки низьким експлуатаційним витратам та суттєвій економії природного газу. Отримані результати свідчать, що оптимальним рішенням є комбінована система: тепловий насос як базове джерело та сонячні колектори як додатковий елемент. Зроблено висновок, що впровадження гібридних систем теплопостачання у поєднанні з термомодернізацією та рекуперацією вентиляції дозволяє суттєво підвищити енергоефективність, знизити витрати та сприяти екологічній безпеці. Запропонована стратегія може бути масштабована для житлово-комунального та адміністративного секторів України.

Ключові слова: гібридна система теплопостачання; тепловий насос; сонячні колектори; геліосистема; термомодернізація; рекуперація теплоти; техніко-економічний аналіз; енергоефективність

Актуальність. Сучасний етап розвитку енергетики характеризується стрімким зростанням попиту на теплову енергію в житлово-комунальному та адміністративному секторах при одночасному зниженні доступності традиційних енергоресурсів. Підвищення тарифів на природний газ, необхідність скорочення викидів парникових газів та глобальні зобов'язання України в рамках Паризької кліматичної угоди роблять питання енергоефективності одним із ключових у державній політиці [1]. Важливим завданням стає не лише зменшення споживання викопних палив, а й інтеграція відновлюваних джерел енергії у систему централізованого і децентралізованого теплопостачання.

У цьому контексті особливу увагу привертають гібридні системи, що поєднують різні за природою джерела енергії та дозволяють гнучко реагувати на сезонні коливання

навантажень і зміну зовнішніх кліматичних умов. Використання теплового насоса, який може відбирати теплоту з ґрунту чи повітря, забезпечує стабільне базове навантаження навіть у холодний період року, коли ефективність сонячних колекторів обмежена. Натомість у літній період саме геліосистеми здатні частково або повністю покривати потреби у гарячому водопостачанні та знижувати споживання електричної енергії на роботу компресорів теплового насоса. Така синергія сприяє оптимізації річного балансу енергоспоживання, зменшує залежність від викопних ресурсів і знижує експлуатаційні витрати [2].

Для адміністративних будівель, які мають значні площі і тривалу експлуатацію протягом доби, впровадження комбінованих систем є не лише технічно доцільним, але й економічно вигідним. В умовах міста Одеси, де спостерігається високий рівень сонячної радіації протягом року, потенціал використання геліосистем особливо значний. Водночас морський клімат з частими вітрами та перепадами температури створює додаткові виклики для збереження теплового комфорту, що вимагає використання надійних і стабільних джерел теплоти. Саме поєднання теплового насоса з ґрунтовим теплообмінником і сонячних колекторів дозволяє знайти компроміс між надійністю, економічністю та екологічністю системи [3, 4].

Таким чином, дослідження гібридних систем тепlopостачання є надзвичайно актуальним як для України в цілому, так і для окремих регіонів з помірно-континентальним кліматом. Воно відповідає стратегічним цілям енергетичної незалежності, підвищення ефективності використання ресурсів та інтеграції відновлюваних джерел у енергетичний баланс будівель [5, 6].

Метою роботи є дослідження можливості та доцільності застосування гібридної системи тепlopостачання з ТН (ґрунт) та сонячних колекторів для адміністративної будівлі.

Методичний підхід у роботі базувався на комплексному поєднанні аналітичних розрахунків, комп'ютерного моделювання та техніко-економічного аналізу. На першому етапі було визначено вихідні дані для розрахунків: площа будівлі, кількість поверхів, чисельність персоналу, а також кліматичні умови міста Одеси. Важливим завданням стало оцінювання теплових втрат огорожувальних конструкцій до та після проведення термомодернізації. Для цього застосовувалися нормативні методики, передбачені як українськими будівельними нормами, так і європейськими стандартами. Це дозволило порівняти результати та обґрунтувати доцільність додаткового утеплення фасадів, заміни віконних блоків і теплоізоляції покрівлі.

Другим етапом стала розробка системи вентиляції. Для адміністративних будівель характерні значні витрати теплоти на підігрів припливного повітря, що безпосередньо впливає на річне енергоспоживання. З цією метою було розраховано потреби у теплоті для системи вентиляції та обґрунтовано необхідність застосування рекуператорів. У результаті вдалося кількісно визначити економію енергії при використанні теплоутилізаторів та підібрати відповідне обладнання.

На наступному етапі було проведено розрахунок параметрів теплонасосного циклу. Використовуючи термодинамічні діаграми, було визначено робочі параметри компресора, конденсатора, випарника та дросельного пристрою. Особливу увагу приділено підбору та розрахунку ґрунтового теплообмінника, який є ключовим елементом системи, оскільки від його конструкції та довжини залежить стабільність роботи теплового насоса протягом року. Було розглянуто варіанти горизонтального та вертикального колекторів, оцінено їхню ефективність та умови монтажу.

Паралельно з цим виконано моделювання роботи сонячних колекторів за допомогою програмного забезпечення ЕКО-power. Це дало змогу оцінити річний потенціал генерації теплоти вакуумними та плоскими колекторами в кліматичних умовах Одеси, визначити сезонну нерівномірність їх роботи та спрогнозувати внесок геліосистеми у загальний баланс тепlopостачання будівлі.

Заключним етапом дослідження став техніко-економічний аналіз, у межах якого було зіставлено капітальні та експлуатаційні витрати різних варіантів системи. Було розраховано термін окупності інвестицій, визначено обсяги економії природного газу та електроенергії, а також оцінено вплив запропонованих рішень на загальну екологічну ситуацію. Такий підхід дозволив не лише порівняти варіанти між собою, але й сформулювати рекомендації щодо оптимальної стратегії впровадження комбінованої системи тепlopостачання для адміністративної будівлі.

У ході проведеного дослідження було отримано низку кількісних результатів, які дозволяють комплексно оцінити ефективність запропонованої гібридної системи тепlopостачання. Насамперед було визначено теплові втрати будівлі до та після термомодернізації. Для вихідного стану об'єкта, без утеплення огорожувальних конструкцій, сумарні втрати тепла склали приблизно 154,9 кВт, що є надзвичайно великим значенням для адміністративної споруди подібної площі. Це пояснюється недостатньою теплозахисною здатністю зовнішніх стін, значними втратами через покрівлю та високими витоками повітря через застарілі віконні блоки. Проведення термомодернізаційних заходів, зокрема утеплення стін шаром пінополістиролу товщиною 10-15 см, теплоізоляції покрівлі мінеральною ватою товщиною 25 см та встановлення енергоефективних вікон із подвійними склопакетами, дало змогу знизити сумарні втрати майже утричі. За розрахунками, за українськими нормами вони становили 52,5 кВт, тоді як за європейськими стандартами – близько 47 кВт. Це підтверджує доцільність модернізації, оскільки саме зменшення потреби в теплоті створює передумови для ефективної роботи відновлюваних джерел енергії.

Важливим елементом дослідження було оцінювання впливу системи вентиляції на річний енергетичний баланс будівлі. Для покриття потреб у свіжому повітрі необхідний підігрів значних обсягів припливного потоку. За умов відсутності теплоутилізації щорічні витрати теплоти на ці цілі сягали 54 868 кВт·год. Встановлення системи рекуперації дозволило зменшити це значення до 11 933 кВт·год, що означає економію приблизно 42 935 кВт·год щорічно. Таким чином, лише завдяки рекуператорам вдалося знизити навантаження на джерела теплоти майже у п'ять разів, що є значним аргументом на користь їх впровадження.

Дослідження роботи теплонасосної установки з ґрунтовим теплообмінником показало її високу ефективність як базового джерела тепlopостачання. Розрахунок термодинамічного циклу при максимальному навантаженні 110 кВт дозволив визначити оптимальні параметри компресора, конденсатора та випарника, а також розрахувати гідравлічний контур ґрунтового колектора. Виконаний аналіз підтвердив, що навіть за несприятливих температурних умов тепловий насос здатний забезпечувати необхідне теплове навантаження з високим коефіцієнтом перетворення.

Крім того, виконано чисельне моделювання ефективності сонячних колекторів з використанням прикладного програмного продукту ЕКО-power. Результати показали, що вакуумні колектори ефективніші в зимовий період, коли температура навколишнього середовища знижується, і втрати теплоти мінімальні завдяки конструктивним особливостям. Плоскі колектори, у свою чергу, демонструють добру продуктивність у літні місяці при вищій інтенсивності сонячної радіації. Загалом річна генерація теплоти двох типів колекторів відрізняється не більше ніж на 15 %, однак вартість вакуумних установок істотно вища. Це створює підстави для диференційованого підходу до вибору обладнання залежно від фінансових можливостей замовника.

Техніко-економічні розрахунки дозволили зробити остаточні висновки щодо доцільності впровадження різних варіантів системи. Для базового варіанта з використанням традиційного котельного обладнання капітальні витрати становили близько 2,90 млн грн, а щорічні експлуатаційні витрати – 132,7 тис. грн. У випадку застосування теплового насоса капітальні інвестиції були значно меншими – лише 0,17 млн. грн, тоді як експлуатаційні витрати скорочувалися до 1035 грн на рік. У результаті використання теплового насоса

дозволило зменшити споживання природного газу приблизно на 11 482 м³ щороку, а річна економія у грошовому еквіваленті склала близько 532 тис. грн. Це забезпечило надзвичайно короткий термін окупності – лише 2,3 роки, що для енергетичних проєктів вважається надзвичайно високим показником.

Для геліосистеми капітальні витрати були значно вищими й становили приблизно 1,21 млн. грн, тоді як щорічні експлуатаційні витрати склали близько 39,4 тис. грн. За отриманими даними, строк окупності геліосистеми досягав майже 13 років, що істотно перевищує відповідний показник для теплового насоса. Саме тому сонячні колектори доцільно розглядати не як основне джерело теплоти, а як допоміжне, здатне оптимізувати річний баланс системи та підвищити рівень енергетичної автономності.

Таким чином, узагальнені результати дослідження свідчать про те, що найбільш вигідним техніко-економічним рішенням для адміністративної будівлі в умовах Одеси є використання ґрунтового теплового насоса як основного джерела теплопостачання у поєднанні з геліосистемою, яка працюватиме у міжсезоння та літній період. Отримані числові показники переконливо підтверджують ефективність такого підходу, а також демонструють значний потенціал для впровадження аналогічних систем у масштабах житлово-комунального сектору України.

Отримані результати дослідження дозволяють зробити кілька важливих узагальнень щодо ефективності та доцільності впровадження гібридних систем теплопостачання. Насамперед слід відзначити, що тепловий насос із ґрунтовим теплообмінником продемонстрував найвищу економічну доцільність серед розглянутих варіантів. Завдяки низьким експлуатаційним витратам і суттєвій річній економії палива саме цей варіант забезпечує найкоротший строк окупності – лише близько 2,3 року. Для систем у сфері теплопостачання це надзвичайно вагомий показник, адже зазвичай подібні проєкти мають термін повернення інвестицій у межах 7-10 років. Таким чином, застосування теплового насоса можна вважати не тільки технічно можливим, але й економічно обґрунтованим рішенням.

У той же час результати моделювання сонячних колекторів виявили певні обмеження їхнього застосування. Хоча вакуумні колектори забезпечують вищу продуктивність у зимовий період, а плоскі – у літній, їхня річна ефективність виявилася порівняно нижчою від теплового насоса з огляду на високу вартість обладнання та тривалий термін окупності, що перевищує 13 років. Це свідчить про те, що використання геліосистем як основного джерела теплопостачання для адміністративної будівлі в умовах Одеси не є оптимальним варіантом. Проте їхня роль як допоміжного або сезонного джерела цілком виправдана, оскільки вони дозволяють розвантажити систему в період міжсезоння, зменшити пікове навантаження на тепловий насос і забезпечити покриття потреб у гарячому водопостачанні в літні місяці.

Особливу увагу варто звернути на результати аналізу системи вентиляції. Розрахунки продемонстрували, що впровадження рекуперації теплоти дає можливість скоротити щорічні витрати енергії майже у п'ять разів. Це означає, що навіть без значних капіталовкладень у генерацію тепла, можна досягти відчутної економії завдяки оптимізації споживання. Такий підхід підтверджує загальну концепцію енергоефективності, згідно з якою в першу чергу варто скорочувати потреби в енергії, а вже потім оптимізувати способи її виробництва.

Ще одним важливим аспектом обговорення є вплив термомодернізації на роботу системи. Як показали розрахунки, після утеплення будівлі сумарні теплові втрати скорочуються більш ніж утричі. Це не лише дозволяє обрати менш потужне і дешевше обладнання, але й підвищує стабільність роботи теплонасосної системи та скорочує необхідні довжини ґрунтових колекторів. Таким чином, заходи з модернізації огорожувальних конструкцій створюють сприятливі умови для інтеграції відновлюваних джерел і підвищують загальну ефективність системи.

Узагальнюючи, можна стверджувати, що найкращий результат досягається при комплексному підході, коли тепловий насос використовується як базове джерело, сонячні

колектори – як додаткове, а термомодернізація та рекуперація вентиляції зменшують початкові енергетичні потреби. Така синергія дозволяє отримати стабільну, економічно вигідну та екологічно безпечну систему теплопостачання.

На основі проведеного дослідження можна сформулювати низку практичних рекомендацій щодо впровадження гібридної системи теплопостачання. По-перше, пріоритетним слід вважати застосування теплового насоса з ґрунтовим теплообмінником як основного джерела теплоти. Цей елемент забезпечує найбільш вигідне співвідношення між інвестиційними витратами та економічним ефектом, а також гарантує стабільність роботи системи протягом усього року незалежно від кліматичних умов.

По-друге, доцільно розглядати сонячні колектори не як окреме джерело, здатне забезпечити всі потреби будівлі, а як допоміжний елемент. Їхнє використання для підігріву гарячої води в літній період або для часткового покриття навантаження в міжсезоння дасть змогу знизити споживання електроенергії тепловим насосом і скоротити витрати на експлуатацію. При виборі конкретного типу колекторів варто враховувати баланс між початковими інвестиціями та очікуваним ефектом: плоскі колектори є дешевшими і простішими в обслуговуванні, тоді як вакуумні демонструють кращу ефективність узимку.

По-третє, перед впровадженням інноваційних технологій доцільно здійснити комплексну термомодернізацію будівлі. Утеплення фасадів, покрівлі та заміна вікон дозволяють знизити теплові втрати до рівня, що робить застосування теплового насоса технічно більш виправданим і здешевлює систему загалом. Крім того, менші теплові навантаження скорочують довжину ґрунтових колекторів і вартість їх монтажу.

По-четверте, важливою умовою енергоефективності є впровадження припливно-втяжної вентиляції з рекуперацією теплоти. Використання рекуператорів дозволяє значно зменшити навантаження на систему теплопостачання, а також покращує мікроклімат у приміщеннях за рахунок забезпечення свіжим повітрям без додаткових витрат енергії.

Нарешті, раціональним є поетапне впровадження запропонованих заходів. На першому етапі слід здійснити термомодернізацію та встановити рекуператори. Це одразу зменшить потребу в енергії. На другому етапі доцільно змонтувати тепловий насос як базове джерело тепла. Третім етапом може бути встановлення сонячних колекторів, коли економічні можливості дозволять здійснити відповідні інвестиції. Така поетапність мінімізує фінансові ризики та дає змогу поступово досягати поставлених цілей.

Таким чином, практичні рекомендації зводяться до реалізації комплексного підходу, де зниження потреб у теплі поєднується з використанням ефективних джерел і сучасних систем утилізації енергії. Це дозволить створити надійну, економічну та екологічну систему теплопостачання, яка може слугувати прикладом для подібних проектів у житлово-комунальному та адміністративному секторах України.

Отже, саме ці заходи зменшують початкові потреби в теплі й роблять можливим ефективне використання відновлюваних джерел. У комплексі запропоноване рішення дозволяє сформувати сучасну, економічно вигідну та екологічно безпечну систему теплопостачання, придатну для масштабного застосування в адміністративному та житловому секторі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mykhailo, Ukrainian Research Group. “Advancing Heat Pump Adoption in Ukraine’s Low-Carbon Energy Transition”. *Energies*, 2024; 17 (23): 6110.
2. Denysova A., Zhaivoron O.. “Modelling the efficiency of the combined heat pump system with tank accumulator for permanent and intermittent heating modes of the public buildings”. / *Proceedings of Odessa Polytechnic University*. 2023; 1 (67): 35–48. DOI: <https://doi.org/10.15276/opu.1.67.2023.05>.

3. Zurian O., Matyah S., et al. “Heat Pump-Based Energy Cluster Control System”. *Vidnovluvana energetika*, 2023; 2 (73): 92–99.
4. Shapoval, S., Pryshliak Y., Ivashchyshyn F., Gulai B., Kasynets M., Mysak S. “Efficiency of Hybrid Solar Collectors Application in Building Heating Systems”. *Energy Engineering and Control Systems*. 2024; 10 (1): 7–12.
5. Shapoval S., Matiko H., Mysak S. “Simulation of Hybrid Solar Collector Operation in Heat Supply System”. *Energy Engineering and Control Systems*. 2023; 9 (2): 61–68.
6. “New energy efficiency requirements for buildings have been introduced in Ukraine – the NZEB standard is now in effect!” *Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України*. 2025.

DOI: <https://doi.org/10.15276/ict.02.2025.81>
UDC 697.9:621.577:621.472

Results of numerical modeling of the efficiency of a hybrid municipal heating system for the climatic conditions of Southern Ukraine

Oksana S. Zhaivoron¹⁾

PhD., Senior Lecturer of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6750-2388>; zhaivoron.o.s@op.edu.ua

Mykola V. Burdovitsyn¹⁾

Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5858-3621>; 744160@stud.op.edu.ua

Ivan S. Kartyshov¹⁾

Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7451-3447>; kartyshov.8865224@stud.op.edu.ua

Vladislav Yu. Tarba¹⁾

Student of the Department of Theoretical General and Nonconventional Power Engineering
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3155-2261>; tarba.8865238@stud.op.edu.ua

¹⁾ Odesa Polytechnic National University, 1, Shevchenko Ave. Odesa, 65044, Ukraine

ABSTRACT

The current development of Ukraine's energy sector is defined by the growing demand for thermal energy and the urgent need to reduce the use of fossil fuels, which highlights the importance of energy efficiency and the integration of renewable sources into heating systems. Particular attention is drawn to hybrid solutions that combine heat pumps with ground heat exchangers and solar collectors, enabling a balance between reliability, cost-effectiveness, and environmental sustainability. The aim of this study is to substantiate the feasibility of applying a hybrid heating system for an administrative building in Odesa, where the combination of high solar radiation and specific climatic conditions creates unique opportunities for the efficient operation of such systems. The methodological framework included analytical calculations, modeling of the heat pump cycle, numerical simulation of solar thermal systems using EKO-power software, and a techno-economic assessment of design options. The evaluation confirmed the significant impact of thermal modernization measures: insulating façades and roofs, as well as replacing windows, reduced the building's heat losses more than threefold, creating favorable conditions for stable heat pump operation. The installation of heat recovery units in the ventilation system provided annual energy savings of over 42,000 kWh, decreasing the heating load nearly fivefold. Calculations of the heat pump cycle with a ground heat exchanger demonstrated its ability to reliably cover the base heating demand with a high coefficient of performance. Modeling of solar collectors confirmed their efficiency in summer and during transitional seasons; however, the high equipment cost results in a long payback period (over 13 years), making them more suitable as auxiliary rather than primary heat sources. The techno-economic analysis revealed that the use of a ground-source heat pump ensures the shortest payback period – approximately 2.3 years – due to low operating costs and substantial natural gas savings. The findings suggest that the optimal solution is a combined system with the heat pump as the primary source and solar collectors as a supplementary element. It is concluded that the implementation of hybrid heating systems, combined with thermal modernization and ventilation heat recovery, significantly enhances energy efficiency, reduces operating costs, and contributes to environmental sustainability. The proposed strategy can be scaled to both residential and administrative sectors of Ukraine.

Keywords: Hybrid heat supply system; heat pump; solar collectors; solar thermal system; energy efficiency