

**ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ
ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЖИТЛОВОЇ БУДІВЛІ З ТЕПЛОВИМИ НАСОСАМИ
НА БАЗІ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

І. О. Суходуб, кандидат технічних наук, доцент

В. І. Шкляр, кандидат технічних наук, доцент

В. В. Дубровська, кандидат технічних наук, доцент

О. І. Яценко, доктор філософії

П. Ю. Сердечний, аспірант (науковий керівник І. О. Суходуб)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

E-mail: i.sukhodub@kpi.ua

Анотація. У статті наведено аналіз енергетичної ефективності системи теплопостачання односімейного житлового будинку з інтеграцією теплового насосу (ТН) для кліматичних даних м. Києва. Для цього використовувалися спеціалізовані програмні комплекси для розрахунку (GeoT*SOL), динамічного енергетичного моделювання (DesignBuilder/EnergyPlus) та техніко-економічного обґрунтування впровадження систем з ТН (RETScreen). Аналіз проводився для двох типів ТН: повітря-вода (повітряний) та розсіл-вода (грунтовий) та різних температурних режимів внутрішньобудинкової системи опалення. За результатами моделювання визначено, що для ТН типу повітря-вода з номінальною потужністю 7 кВт середньосезонний показник ефективності може мати значення близько 3,6 для самого ТН та 2,7 для системи в цілому. Для ТН типу розсіл-вода з номінальною потужністю 6 кВт значення середньосезонного показника ефективності 4,7 для самого ТН та 3,75 для системи в цілому. Загальне споживання електричної енергії коливається в межах 4800 – 5700 кВт·год для повітряного ТН та 3200 – 4300 кВт·год для грунтового ТН. В залежності від потужності ТН частка покриття енергопотреби на опалення змінюється в межах 85-98 % для ТН типу розсіл-вода та 79-98 % для ТН типу повітря-вода. Простий термін окупності системи теплопостачання на базі ТН порівняно з електричними конвекторами складає 15,2-17,0 років.

Ключові слова: *енергоефективність, енергетичне моделювання будівель, кліматичні дані, тепловий насос, будівлі з близьким до нульового рівнем споживання енергії*

Актуальність. Останнім часом Україна робить значні кроки з імплементації директиви ЄС щодо енергоефективності будівель [1]. У рамках імплементації директиви в Україні був прийнятий Закон України «Про енергетичну ефективність

будівель» [2]. Цей закон також супроводжується рядом наказів профільного міністерства, що регулюють питання порядку проведення сертифікації енергетичної ефективності та форми енергетичного сертифікату, методики визначення енергетичної ефективності та мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель. Також було приведено у відповідність вимоги ДБН «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» [3].

На додаток до мінімальних вимог щодо питомого енергоспоживання на опалення та охолодження будівель, мінімального класу енергетичної ефективності на рівні «С» для проектів нового будівництва та приведення опору теплопередачі різних типів огорожувальних конструкцій, прийнято Концепцію реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії та Національний план збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії, відповідно до яких документу енергонезалежні будинки повинні відповідати класу енергетичної ефективності не нижче класу «А», не перевищувати максимальних показників питомого споживання первинної енергії та використовувати енергію переважно з відновлюваних джерел (ВДЕ). Також, починаючи з 2026 року, будівлі державної та комунальної форми власності, а з 2028 року, всі будівлі, що приймаються в експлуатацію, повинні відповідати вимогам до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії (Nearly zero energy buildings, NZEB).

Для досягнення класу енергетичної ефективності «А» для житлових будівель на додаток до забезпечення або перевищення нормативних вимог щодо приведення опору теплопередачі різних типів огорожувальних конструкцій, необхідно передбачити заходи з підвищення рівня енергетичної ефективності інженерних систем. Застосування теплових насосів (ТН) різних типів для теплозабезпечення будівель може в значній мірі допомогти зі зниженням як питомого кінцевого енергоспоживання, так і споживання первинної енергії та викидів CO₂ та інших шкідливих речовин. Доцільність застосування та потенціал економії також доводиться за допомогою фактичного досвіду в умовах України [4]. При цьому

проекти з впровадження ТН можуть бути екологічно та економічно життєздатними як на рівні мереж централізованого тепло- та холодопостачання для покращення показників енергетичної ефективності та декарбонізації [5, 6], так і на рівні енергозабезпечення окремих будівель [4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Аналіз показників ТН може виконуватися з використанням спрощених методів розрахунку відповідно до стандартів та динамічних моделей систем [7]. Для моделювання ТН за допомогою динамічних програм зазвичай використовуються два підходи:

- моделі з урахуванням карт продуктивності (залежність теплової потужності та електроспоживання / COP від параметрів джерела та навантаження);
- термодинамічні моделі (розрахунок циклу ТН).

У роботах науковців для моделювання ТН використовуються регресійні залежності параметрів на виході та COP [8], імітаційні моделі у програмному середовищі MATLAB/SIMULINK, які відслідковують значення температури навколишнього середовища і видають значення теплової потужності, яку здатен забезпечити ТН за поточних умов [9].

Для аналізу систем тепlopостачання на базі ТН можна також використовувати програми для динамічного енергетичного моделювання будівель та інженерних систем, такі як DOE-2, eQuest, EnergyPlus, DesignBuilder, IDA ICE, IES VE, TRNSYS та ін. У подальшому для енергетичного аналізу будівлі та інженерних систем планується використовувати програмний комплекс DesignBuilder, що є графічним інтерфейсом до розрахункового ядра EnergyPlus. Опис процесу, вихідних даних та результатів динамічного моделювання будівель з системами тепlopостачання на базі ТН для різних кліматичних умов в програмі EnergyPlus та DesignBuilder наведені в роботах [10-12].

Для моделювання ТН «повітря-вода» у програмі EnergyPlus/DesignBuilder використовують залежності теплової потужності та COP від витрати та вхідної температури води і повітря. Змінні, які впливають на продуктивність ТН «вода-вода», включають температуру та витрату води з боку навантаження і джерела.

Такі моделі ТН дозволяють врахувати як змінні параметри оточуючого середовища, так і зміну теплового навантаження будівлі при динамічному енергетичному моделюванні будівлі та її інженерних систем.

Мета дослідження – порівняння різних підходів до оцінки енергетичної ефективності систем тепlopостачання житлової будівлі з ТН з використанням спеціалізованих програмних продуктів та показників для ТН різних типів і параметрів внутрішньобудинкової системи опалення.

Для досягнення мети дослідження були поставлені наступні завдання:

- 1) вибір об'єкту аналізу та кліматичних даних для моделювання;
- 2) проведення моделювання системи тепlopостачання житлової будівлі з ТН в програмі GeoT*SOL;
- 3) проведення динамічного енергетичного моделювання житлової будівлі з ТН в програмі DesignBuilder/EnergyPlus;
- 4) порівняння результатів моделювання в різних програмних продуктах;
- 5) техніко-економічне обґрунтування впровадження систем з ТН в програмі RETScreen.

Матеріали і методи досліджень. Об'єктом аналізу і моделювання є приватна двоповерхова житлова будівля, опалювальною площею 216 м^2 та опалювальним об'ємом – 648 м^3 , розрахункова потужність системи опалення – $9,75 \text{ кВт}$, річна енергопотреба на опалення – близько $15\,000 \text{ кВт}\cdot\text{год/рік}$. 3D модель будівлі з програми DesignBuilder/EnergyPlus наведена на рис. 1. Коефіцієнти теплопередачі огорожувальних конструкцій (ОК): зовнішня стіна – $0,264 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, перекриття неопалювального горища – $0,235 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, світлопрозорі ОК – $1,333 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, підлога по ґрунту – $0,35 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$. В моделі враховувалися внутрішні теплові надходження: від 4 людей, 2 Вт/м^2 для освітлення та 2 Вт/м^2 для обладнання, графік використання – 112 год/тиждень . Природна вентиляція задавалася на рівні $0,5 \text{ год}^{-1}$, задана температура опалення – $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Як кліматичні дані використовувався файл Meteororm з погодинними величинами для м. Києва та вбудовані помісячні значення з програми RETScreen, так як вони є найближчими до значень відповідно до нормативів, що застосовуються для енергетичних розрахунків будівель [13].

В якості інженерних систем моделювалася система теплопостачання будівлі з використанням ТН та додаткового електричного нагрівача для покриття пікових навантажень.

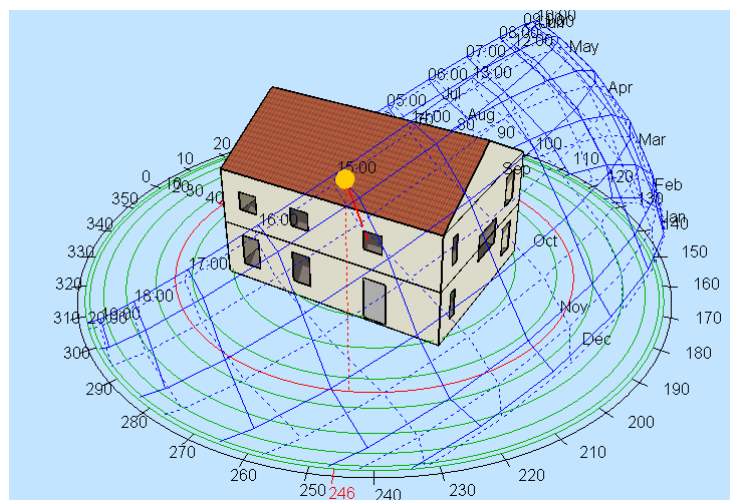


Рис. 1. 3D модель житлової двоповерхової будівлі

Моделювання проводилось з використанням спеціалізованих програм:

- для аналізу систем теплопостачання на базі ТН – GeoT*SOL;
- для динамічного енергетичного моделювання будівлі, включаючи інженерні системи – DesignBuilder / EnergyPlus;
- програма для техніко-економічного розрахунку систем теплопостачання з ТН – RETScreen.

Моделювання та розрахунки проводилися для двох типів ТН: «повітря – вода» (air sourced heat pump) та «розсіл-вода» (ground sourced heat pump). Також проводився аналіз впливу параметрів системи опалення (низько- та високотемпературна) на точку бівалентності системи та середньосезонні показники ефективності як самого ТН, так і системи в цілому (включаючи додатковий електричний нагрівач для покриття пікових навантажень). Моделювання в програмі DesignBuilder/EnergyPlus проводилося для перевірки та порівняння результатів програми GeoT*SOL. Обидві програми дозволяють врахувати змінність теплопродуктивності та COP ТН в залежності від параметрів джерела низькопотенційної теплової енергії та споживача (системи опалення). У зв'язку з тим, що програма RETScreen застосовує доволі спрощений підхід до розрахунку

системи теплопостачання з ТН та не враховує залежність теплопродуктивності та COP від умов експлуатації, розрахунок проводився тільки з врахуванням середньосезонного показника ефективності ТН/системи, що був отриманий в програмі GeoT*SOL.

Результати дослідження та їх обговорення. Загальний вигляд систем теплопостачання з ТН різних типів в програмах GeoT*SOL та DesignBuilder/EnergyPlus наведені на рис. 2 та 3.

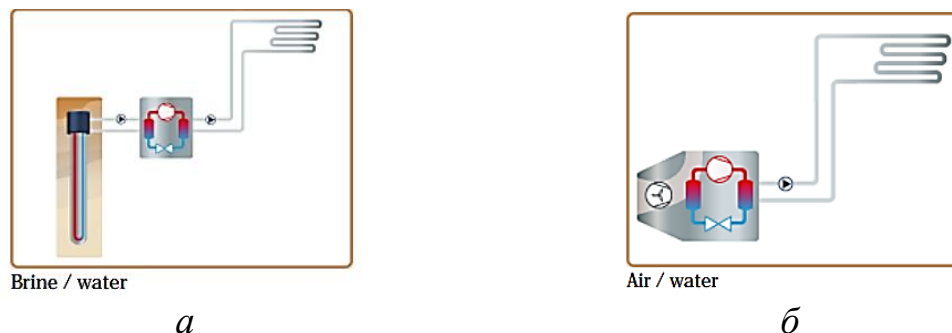


Рис. 2. Загальний вигляд системи теплопостачання з ТН «розсіл-вода» (а) та «повітря – вода» (б) в програмі GeoT*SOL

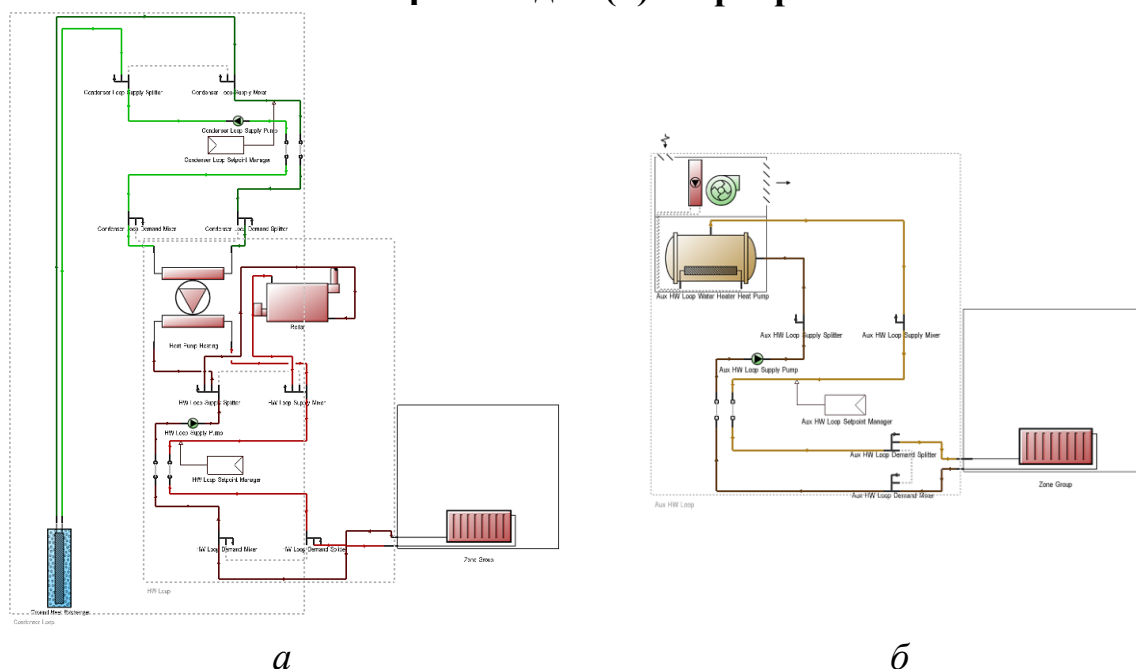


Рис. 3. Загальний вигляд системи теплопостачання з ТН «розсіл-вода» (а) та «повітря – вода» (б) в програмі DesignBuilder/EnergyPlus

Параметри ТН при «стандартних» умовах наводяться в табл. 1. При цьому для ТН «розсіл-вода» використовується температура розсолу 0°C та температура води 35°C (B0/W35), а для ТН «повітря-вода» використовується температура повітря 2°C та температура води 35°C (A2/W35).

1. Параметри ТН

Параметр	ТН «розсіл-вода»	ТН «повітря-вода»
Теплова потужність, кВт	6,2 (B0/W35)	7,0 (A2/W35)
Електрична потужність, кВт	1,378	1,790
COP	4,50	3,91

Для врахування залежності теплопродуктивності та COP ТН від температури повітря/розсолу та води в програмі GeoT*SOL використовуються «тестові» точки відповідно до EN 14511, наведені на рис. 4 та 5.

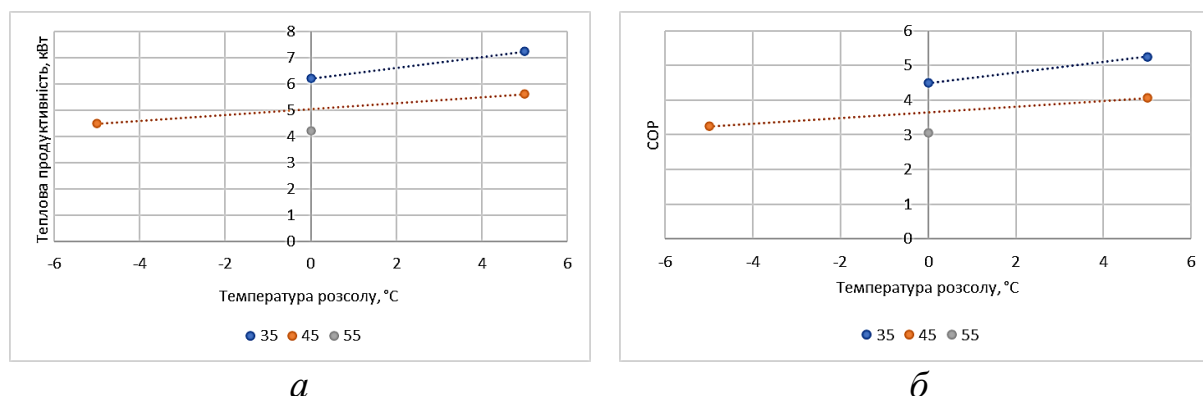


Рис. 4. Залежність теплової продуктивності (а) та COP (б) ТН «розсіл-вода» від температури розсолу та температури води на подачі

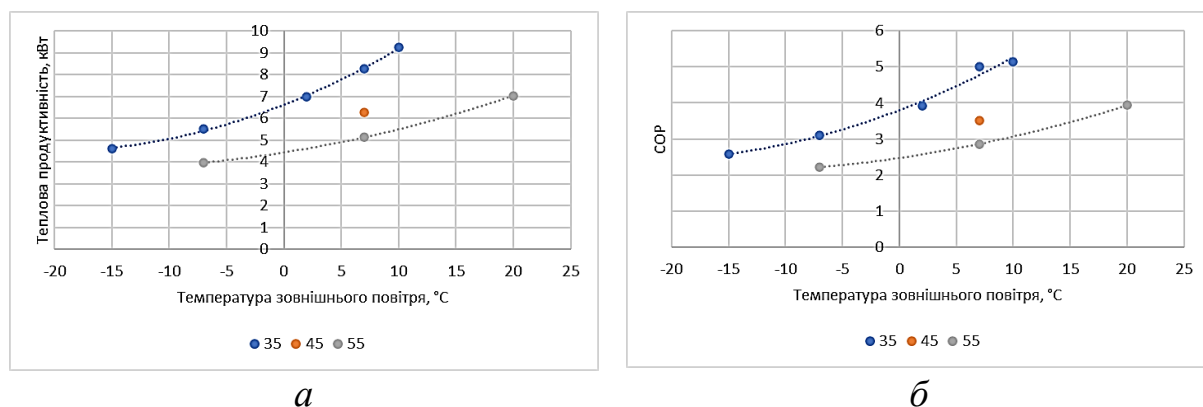


Рис. 5. Залежність теплової продуктивності (а) та COP (б) ТН «повітря-вода» від температури зовнішнього повітря та температури води на подачі

У програмному продукті GeoT*SOL є можливість задавати відсоток системи опалення будівлі, що відноситься до «низькотемпературних» систем (35/28 °C) та до «виськотемпературних» систем (50/35 °C) у діапазоні від 0 % до 100 %. Тому розрахунки в програмі проводилися в залежності від відсотків низькотемпературної системи опалення будівлі. У зв'язку з тим, що розрахункова потужність системи

опалення будівлі складає 9,75 кВт, система моделювалася з додатковим електричним нагрівачем, який «вмикався» нижче певної температури, яка задавалася індивідуально для кожної з конфігурацій / параметрів системи (моноенергетичний паралельний режим).

Результати моделювання в програмному продукті GeoT*SOL наводяться на рис. 6 та 7. Розглядається залежність середньосезонних показників ефективності (seasonal performance factor - SPF) як для самого ТН, так і системи в цілому (з врахуванням електричного нагрівача) та енергоспоживання та «точки бівалентності» від параметрів системи опалення, а саме відсотків низькотемпературної системи опалення в будівлі.

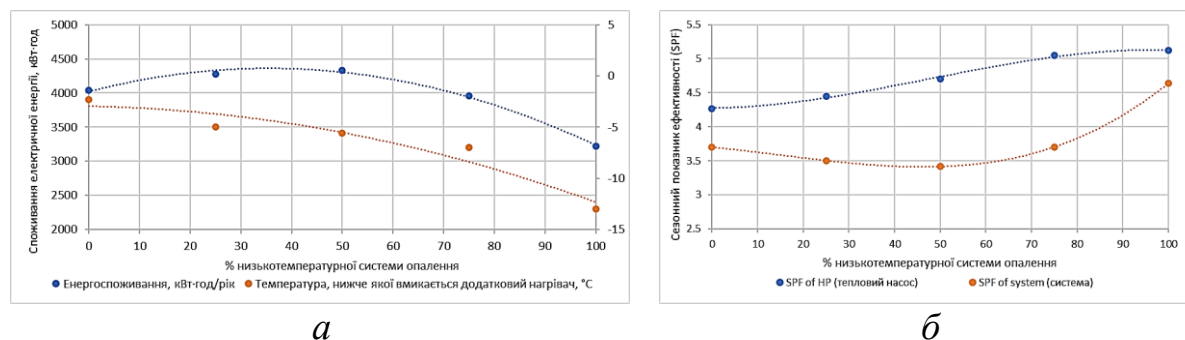


Рис. 6. Залежність середньосезонних показників ефективності (SPF) для ТН типу «розсіл-вода», системи в цілому (б) та енергоспоживання та точки бівалентності (а) від параметрів системи опалення

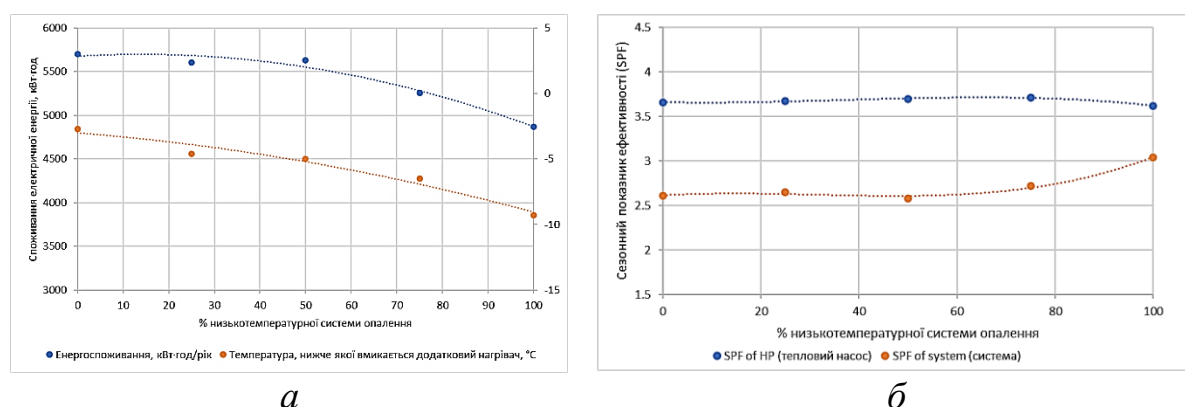


Рис. 7. Залежність середньосезонних показників ефективності (SPF) для ТН типу «повітря-вода», системи в цілому (б) та енергоспоживання та точки бівалентності (а) від параметрів системи опалення

За результатами моделювання визначено, що для ТН типу повітря-вода з номінальною потужністю 7 кВт за стандартних умов, середньосезонний показник ефективності може мати значення близько 3,6 для самого ТН, та 2,7 для системи в

цілому. Для ТН типу розсіл-вода з номінальною потужністю 6 кВт за стандартних умов середньосезонний показник ефективності може мати значення близько 4,7 для самого ТН, та 3,75 для системи в цілому. Загальне споживання електричної енергії може коливатися в межах 4800 – 5700 кВт·год для повітряного ТН та 3200 – 4300 кВт·год для ґрунтового ТН.

Для врахування впливу теплової продуктивності проводилося моделювання ТН різної встановленої потужності. Результати для ТН типу «розсіл-вода» та «повітря-вода» наводяться на рис. 8 та 9 відповідно. Розглядалися залежності постачання енергії від ТН та електричного нагрівача, а також загального енергоспоживання та показників ефективності системи в цілому від теплової продуктивності ТН (для низькотемпературної системи).

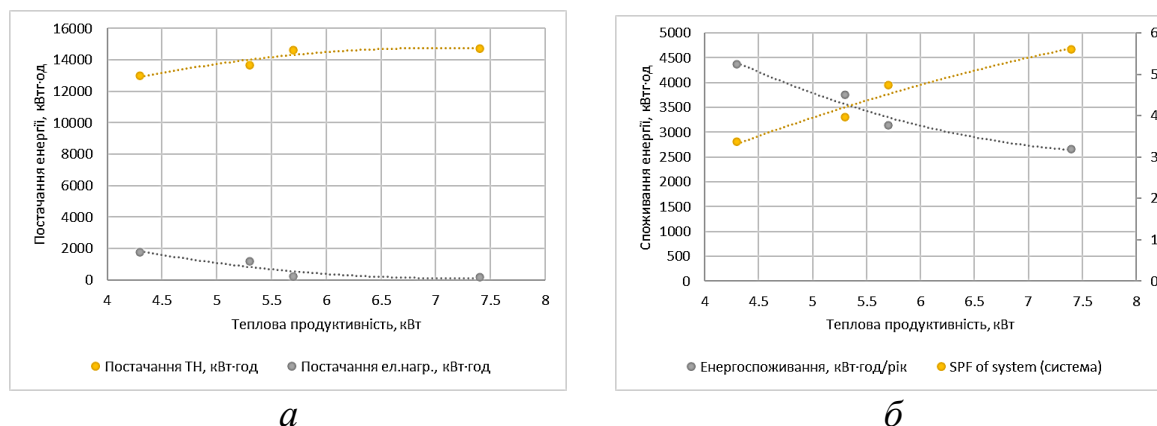


Рис. 8. Залежність постачання енергії від ТН та електричного нагрівача для системи з ТН типу «розсіл-вода» (а), енергоспоживання та показників ефективності системи в цілому (б) від теплової продуктивності ТН

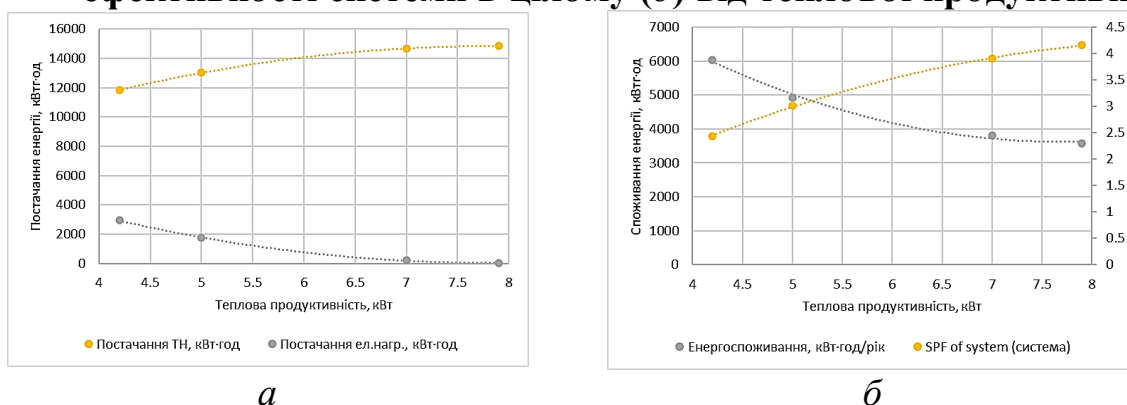


Рис. 9. Залежність постачання енергії від ТН та електричного нагрівача для системи з ТН типу «повітря-вода» (а), енергоспоживання та показників ефективності системи в цілому (б) від теплової продуктивності ТН

У залежності від потужності ТН частка покриття енергопотреби на опалення за рахунок ТН може коливатися в межах 85-98 % для ТН типу розсіл-вода та 79-98 % для ТН типу повітря-вода. При цьому загальне енергоспоживання системи може коливатися в межах 3600 – 6000 кВт·год для повітряного ТН та 2700 – 4400 кВт·год для ґрунтового ТН.

У програмному продукті DesignBuilder/EnergyPlus моделювання повітряного ТН виконувалося при зміні температури подачі теплоносія зі сторони навантаження та температури «відключення» компресора ТН (-10 °С та -15 °С). Для ґрунтового ТН враховувалася тільки зміна температури подачі теплоносія зі сторони навантаження. Результати моделювання наводяться на рис. 10. Отримані показники загального енергоспоживання системи є близькими до результатів моделювання в програмі GeoT*SOL, що підтверджує можливість використання обох програм для деталізованого аналізу систем теплопостачання будівель на базі ТН.

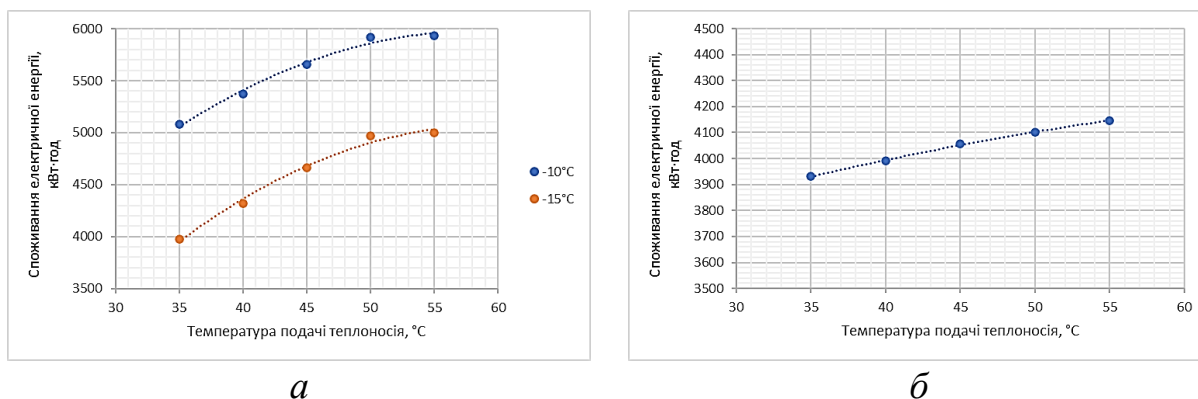


Рис. 10. Залежність енергоспоживання для ТН типу «повітря-вода» (а) та для ТН типу «розсіл-вода» (б) від параметрів системи опалення

Як вказано вище, програма RETScreen використовує спрощений підхід до аналізу систем теплопостачання на базі ТН і не може використовуватися для деталізованого аналізу / моделювання. Саме тому в даному випадку проводився аналіз тільки техніко-економічних показників з врахуванням середньосезонного показника ефективності ТН/системи, що був отриманий в програмах GeoT*SOL.

Вартість впровадження системи розраховувалася з використанням питомих показників на одиницю теплової потужності системи. Для базової системи опалення були використані електричні конвектори. Тариф на електричну енергію приймався на рівні 2,64 грн/кВт·год (для населення).

Відповідно до проведеного техніко-економічного розрахунку вартість впровадження системи теплопостачання на базі ТН може становити 360-480 тис. грн, а простий термін окупності у порівнянні з електричними конвекторами може коливатися в межах 15,2-17,0 років. Також можна очікувати на зниження викидів CO₂ на рівні 10-12 т CO₂/рік.

2. Техніко-економічні показники системи з ТН

<i>Параметр</i>	<i>ТН «розсіл-вода»</i>	<i>ТН «повітря-вода»</i>
<i>Теплова потужність, кВт</i>	6,2	7,0
<i>Вартість впровадження системи, грн</i>	480000	360000
<i>Вартість оплати споживання енергії (базовий сценарій), грн/рік</i>	39600	39600
<i>Вартість оплати споживання енергії (запропонований сценарій), грн/рік</i>	11314	15840
<i>Простий термін окупності, роки</i>	17,0	15,2
<i>Зниження викидів CO₂, кг/рік</i>	11880,1	9979,2

Висновки і перспективи. Розглянуто моделювання та аналіз показників ефективності / енергоспоживання для системи теплопостачання 2-поверхового приватного житлового будинку на базі ТН типу «повітря-вода» та «розсіл-вода» з використанням спеціалізованих програмних комплексів GeoT*SOL, DesignBuilder/EnergyPlus та RETScreen. На основі проведеного моделювання було встановлено, що для повітряного ТН з номінальною тепловою потужністю 7 кВт при стандартних умовах середньосезонний коефіцієнт ефективності може становити близько 3,6 для самого ТН та 2,7 для всієї системи (з урахуванням додаткового електричного нагрівача). Для ґрунтового ТН типу з номінальною тепловою потужністю 6 кВт за стандартних умов середньосезонний коефіцієнт ефективності може становити близько 4,8 для самого ТН та 3,75 для всієї системи (з урахуванням додаткового електричного нагрівача). Значення температури точки бівалентності та покриття потреб в опаленні значно залежать від параметрів системи опалення (низько- та високотемпературна/температура подачі теплоносія системи опалення). Загальне річне споживання електроенергії системою опалення може коливатися в

межах 4800–5700 кВт·год для повітряного ТН та 3200–4300 кВт·год для ґрунтового ТН. В залежності від потужності ТН частка покриття енергопотреби в опаленні складає 85–98 % для ТН типу розсіл-вода та 79–98 % для ТН типу повітря-вода. Простий термін окупності системи теплопостачання на основі ТН порівняно з електричними конвекторами 15,2–17,0 років. Отримані результати можуть бути використані при виборі та обґрунтуванні доцільності встановлення ТН в системі опалення житлових будівель.

Список використаних джерел

1. Директива Європейського Парламенту і Ради 2010/31/ЄС від 19 травня 2010 року про енергетичні характеристики будівель. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011-10#Text
2. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 р. №2118-VIII. Голос України. 2017. 22 липня. (№134). Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0825-18#n16>
3. ДБН В.2.6–31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. На заміну ДБН В.2.6–31:2016; чинний від 2022-09-01. Вид. офіц. Київ: Держ. підприємство “Укрархбудінформ”, 2021. 23 с
4. Модернізація системи опалення будівлі з використанням теплового насоса типу "повітря-рідина" / Б.І. Басок, О.М. Недбайло, М.В. Ткаченко, І.К. Божко, О.М. Лисенко, А.О. Луїна. Промышленная теплотехника. 2015. Т. 37, № 5. С. 68-74. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.08>
5. Gaur, A.S.; Fitiwi, D.Z.; Curtis, J. Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. Energy Res. Soc. Sci. 2021, 71, 101764. [CrossRef]
6. Marguerite, C.; Geyer, R.; Hangartner, D.; Lindahl, M.; Pedersen, S.V. IEA Heat Pumping Technologies Annex 47. 2019. Available online: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex47/wp-content/uploads/sites/54/2019/03/task3-report.pdf> (accessed on 21 March 2021)
7. Afjei, Thomas & Dott, Ralf. (2011). Heat pump modelling for annual performance, design and new technologies. Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association. Available online: https://www.researchgate.net/publication/267705775_Heat_pump_modelling_for_annual_performance_design_and_new_technologies
8. Чирін Д.А., Іродов В.Ф. Математичне та комп’ютерне моделювання системи теплопостачання від сонячних плівкових колекторів з тепловим насосом, Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського, серія: Технічні науки. 2020. №5. С. 135–140.
9. Головка В.М., Міхалін В.І. Система опалення приватного будинку на основі теплового насоса та фотоелектростанції. Енергетика і автоматика. 2023. №2, с. 63–70.

10. He, M.; Rees, S.; Shao, L. Simulation of a domestic ground source heat pump system using a three-dimensional numerical borehole heat exchanger model. *J. Build. Perform. Simul.* 2011, 4, 141–155, doi:10.1080/19401493.2010.513739.

11. Ashfaqe Ahmed Chowdhury, M. G. Rasul, M. M. K. Khan. Modelling and simulation of building energy consumption: a case study on an institutional building in central Queensland, Australia. *Building Simulation*, 2007, Beijing, China. Available online: <https://www.aivc.org/resource/modelling-and-simulation-building-energy-consumption-case-study-institutional-building>.

12. Priarone, & Silenzi, Federico & Fossa,. (2020). Modelling Heat Pumps with Variable EER and COP in EnergyPlus: A Case Study Applied to Ground Source and Heat Recovery Heat Pump Systems. *Energies*. 13. 794. 10.3390/en13040794.

13. Суходуб І. О., Шкляр В. І., Дубровська В. В. Аналіз фактичних, типових та нормативних кліматичних даних в контексті енергетичного моделювання будівель. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2022. № 2. С. 35–40. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261367>.

References

1. European Parliament and Council Directive 2010/31/EU of 19 May 2010 on the energy performance of buildings. Retrieved from: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011-10#Text

2. On Energy Efficiency of Buildings: Law of Ukraine dated 22.06.2017 No. 2118-VIII. *Holos Ukrainy*. 2017. July 22. (No. 134). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0825-18#n16>

3. State Building Codes V.2.6–31:2021. Thermal insulation and energy efficiency of buildings. Replaces State Building Codes V.2.6–31:2016; effective from 2022-09-01. Official ed. Kyiv: State Enterprise "Ukrarhbudinform", 2021. 23 p.

4. Basok, B.I., Nedbaylo, O.M., Tkachenko, M.V., Bozhko, I.K., Lysenko, O.M., & Lunina, A.O. (2015). Modernizatsiia systemy opalennia budivli z vykorystanniam teplovoho nasosa typu "povitria-ridyna" [Modernization of building heating system using air-liquid heat pump]. *Promyshlennaya Teplotekhnika*, 37(5), 68-74. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.31472/ihe.5.2015.08>

5. Gaur, A.S., Fitiwi, D.Z., & Curtis, J. (2021). Heat pumps and our low-carbon future: A comprehensive review. *Energy Research & Social Science*, 71, 101764. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101764>

6. Marguerite, C., Geyer, R., Hangartner, D., Lindahl, M., & Pedersen, S.V. (2019). IEA Heat Pumping Technologies Annex 47. Retrieved from: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex47/wp-content/uploads/sites/54/2019/03/task3-report.pdf>

7. Afjei, Thomas, & Dott, Ralf. (2011). Heat pump modelling for annual performance, design and new technologies. *Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*. Available at: https://www.researchgate.net/publication/267705775_Heat_pump_modelling_for_annual_performance_design_and_new_technologies.

8. Chirin, D.A., & Irodov, V.F. (2020). Matematychnе ta komp'uterne modeliuvannia systemy teplopostachannia vid soniachnykh plivkovykh kolektoriv z teplovym nasosom [Mathematical and computer modeling of a heating system from solar film collectors with a heat pump]. Scientific Notes of V.I. Vernadsky Tavria National University, Technical Sciences Series, 5, 135–140.
9. Golovko, V.M., & Mikhaylin, V.I. (2023). Systema opalennia pryvatnoho budynku na osnovi teplovoho nasosu ta fotoelektrostantsii [Heating system of a private house based on a heat pump and a photovoltaic power station]. Energy and Automation, 2, 63–70. .
10. He, M., Rees, S., & Shao, L. (2011). Simulation of a domestic ground source heat pump system using a three-dimensional numerical borehole heat exchanger model. Journal of Building Performance Simulation, 4, 141–155. <https://doi.org/10.1080/19401493.2010.513739>
11. Ashfaque Ahmed Chowdhury, M. G. Rasul, M. M. K. Khan. (2007). Modelling and simulation of building energy consumption: a case study on an institutional building in central Queensland, Australia. Building Simulation, Beijing, China. Retrieved from <https://www.aivc.org/resource/modelling-and-simulation-building-energy-consumption-case-study-institutional-building>.
12. Priarone, F., Silenzi, Federico, & Fossa, G. (2020). Modelling Heat Pumps with Variable EER and COP in EnergyPlus: A Case Study Applied to Ground Source and Heat Recovery Heat Pump Systems. Energies, 13, 794. <https://doi.org/10.3390/en13040794>
13. Sukhodub, I.O., Shklyar, V.I., & Dubrovskа, V.V. (2022). Analiz faktychnykh, typovykh ta normatyvnykh klimatychnykh danykh v konteksti enerhetychnoho modeliuvannia budivel [Analysis of actual, typical and normative climatic data in the context of energy modeling of buildings]. Energy: Economics, Technologies, Ecology, 2, 35–40. [In Ukrainian]. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261367>

EVALUATION OF THE ENERGY EFFICIENCY OF HEAT SUPPLY SYSTEMS OF A RESIDENTIAL BUILDING WITH HEAT PUMPS BASED ON COMPUTER SIMULATION

I. Sukhodub, V. Shklyar, V. Dubrovskа, O. Yatsenko, P. Serdechnyi

Abstract. *This article presents an analysis of the energy efficiency of the heating system of a single-family residential building with the integration of a heat pump (HP) using climate data for Kyiv city. Specialized software complexes for calculation (GeoT*SOL), dynamic energy modeling (DesignBuilder/EnergyPlus), and techno-economic justification of HP systems implementation (RETScreen) were used for this purpose. The analysis was conducted for two types of HPs: air-to-water (air-based) and ground-source (ground-based), considering various temperature regimes of the indoor heating system. Based on the modeling results, it was determined that for an air-to-water HP with a nominal capacity of 7 kW, the average seasonal efficiency rating could be approximately 3.6 for the HP itself and 2.7 for the overall system. For a ground-source HP with a nominal capacity of 6 kW, the average seasonal efficiency rating is 4.7 for the HP itself and 3.75 for the overall system. The total electricity consumption varies within the range of 4800–5700 kWh for air-based HP and 3200–4300 kWh for ground-based HP.*

Depending on the HP capacity, the share of heating energy coverage ranges from 85-98% for ground-based HP and 79-98% for air-based HP. The simple payback period of the HP-based heating system compared to electric convectors is 15.2–17.0 years.

Key words: *energy efficiency, building energy modeling, climate data, heat pump, nearly zero-energy buildings*