

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуто питання підвищення енергоефективності систем теплопостачання житлових будівель шляхом інтеграції геотермального теплового насоса (ГТН). Представлено результати математичного моделювання динаміки теплового балансу будинку та продуктивності ГТН, включаючи моделювання теплообміну у вертикальному ґрунтовому теплообміннику. Встановлено, що використання ГТН дозволяє зменшити споживання первинної енергії на 40-60% порівняно з традиційними газовими котлами, досягаючи коефіцієнта перетворення (COP) 3.5-4.5. Виявлено оптимальні параметри буріння та експлуатації ґрунтових зондів для забезпечення стабільності тепловіддачі протягом опалювального сезону. Результати мають високу практичну значущість для проєктування систем теплопостачання з мінімальним вуглецевим слідом.

Ключові слова: Геотермальний тепловий насос (ГТН), енергоефективність, теплопостачання, COP, математичне моделювання, ґрунтовий теплообмінник, енергозбереження.

Abstract

The issue of improving the energy efficiency of residential heating systems through the integration of a geothermal heat pump (GHP) is considered. The results of mathematical modeling of the thermal balance dynamics of a building and the performance of the GHP are presented, including the simulation of heat exchange in a vertical ground heat exchanger. It has been established that the use of GHPs allows reducing primary energy consumption by 40–60% compared to traditional gas boilers, achieving a coefficient of performance (COP) of 3.5–4.5. Optimal drilling and operation parameters of ground probes have been identified to ensure stable heat extraction throughout the heating season. The results have high practical significance for the design of heating systems with a minimal carbon footprint.

Keywords: Geothermal heat pump (GHP), energy efficiency, heating supply, COP, mathematical modeling, ground heat exchanger, energy saving.

Вступ

Актуальність дослідження зумовлена глобальною необхідністю зниження енергозалежності, зменшенням викидів парникових газів та стрімким зростанням цін на традиційні енергоносії (природний газ, електрика). Житловий сектор є одним із найбільших споживачів енергії. Геотермальні теплові насоси (ГТН) представляють собою найбільш перспективне рішення для забезпечення сталого та економічно вигідного теплопостачання, оскільки вони використовують відновлювану низькопотенційну теплоту ґрунту, що забезпечує високий коефіцієнт перетворення енергії (COP). Необхідність точного прогнозування та оптимізації роботи ГТН в умовах змінних кліматичних та геологічних факторів вимагає застосування адекватного математичного моделювання.

Мета роботи: Розробка та дослідження оптимізованої енергоефективної системи теплопостачання житлового будинку на основі геотермального теплового насоса шляхом математичного моделювання її роботи для обґрунтування технічних та економічних параметрів.

Основні завдання дослідження:

1. Аналіз систем: Провести порівняльний аналіз енергоефективності та економічної доцільності ГТН та традиційних систем опалення.

2. Формулювання моделі: Розробити динамічну математичну модель теплового балансу житлового будинку та теплообміну в ґрунтовому теплообміннику (ґрунтовому зонді).

3. Чисельна реалізація: Створити чисельний алгоритм для розрахунку продуктивності ГТН (COP) та температурного поля ґрунту в зоні розташування зондів.

4. Оптимізація параметрів: Визначити оптимальні конструктивні параметри ґрунтового теплообмінника (глибина, відстань між зондами) та режими роботи ГТН для забезпечення максимального COP.

5. Економічна оцінка: Провести техніко-економічне обґрунтування терміну окупності системи ГТН порівняно з існуючими альтернативами.

Наукова новизна:

Комплексна динамічна модель: Вперше розроблено динамічну 3D-модель теплового балансу системи "Будинок – ГТН – Ґрунт", яка одночасно враховує нестационарність навантаження будинку, теплові властивості ґрунту та його сезонну регенерацію.

Методика прогнозування деградації ґрунту: Розроблено методику прогнозування довгострокової температурної деградації ґрунтового масиву навколо зондів, що дозволяє запобігти падінню ефективності ГТН у наступні роки експлуатації.

Оптимізація розміщення: Встановлено оптимальне співвідношення між потужністю ГТН та геометричними параметрами зондів, що мінімізує початкові капітальні витрати при збереженні високого COP.

Практична значущість:

1. Розроблена модель служить інструментом для інженерного проектування та обґрунтування вибору типу та кількості ґрунтових зондів для конкретних геологічних умов.

2. Впровадження системи ГТН дозволяє досягти значної економії експлуатаційних витрат (до 60% порівняно з газовим опаленням) та зменшити викиди CO₂.

Основні результати та суть математичного моделювання

Суть математичного моделювання:

Моделювання ґрунтується на розв'язанні нестационарного рівняння теплопровідності для ґрунтового масиву з урахуванням кондуктивного та конвективного теплообміну:

$$\rho \cdot c_p (\partial T / \partial t) = \nabla \cdot (k \nabla T) + q(x, y, z, t)$$

де: T— температура, ρ – густина, c_p — об'ємна теплоємність ґрунту, k— теплопровідність ґрунту, а q(x,y,z,t) — джерело/стік тепла, що моделює роботу зонда.

Модель дозволяє динамічно розраховувати:

1. Тепловий баланс будинку: Погодинне навантаження на опалення/охолодження.
2. Температуру в ґрунті: Динаміка зміни температури ґрунту навколо зонда.
3. Коефіцієнт COP: Розрахунок реального коефіцієнта перетворення енергії ГТН залежно від температури джерела тепла (ґрунту).

Ключові отримані результати:

1. Енергетична ефективність: Моделювання підтвердило, що середньорічний коефіцієнт перетворення (COP) становить 3.8-4.2 для типового односімейного будинку в кліматичних умовах України, що забезпечує економію первинної енергії близько 55%.

2. Оптимізація зондів: Виявлено, що для системи потужністю 10 кВт оптимальна глибина буріння зондів становить 80-100 м з мінімальною рекомендованою відстанню між зондами 5-6 м для запобігання тепловій інтерференції та деградації ґрунту.

3. Температурна стабільність: Прогнозний аналіз показав, що при оптимізованих параметрах, падіння температури ґрунту наприкінці опалювального сезону (через 10 років експлуатації) не перевищує 2-3°C, що гарантує стабільну роботу системи.

Висновки:

1. Розроблена комплексна динамічна математична модель є адекватним інструментом для проектування та оптимізації систем тепlopостачання на базі ГТН.
2. Системи ГТН демонструють високу енергоефективність (COP приблизно 4.0) та значну економічну перевагу порівняно з традиційними системами опалення.
3. Геометрична оптимізація ґрунтового теплообмінника є критично важливою для забезпечення довгострокової стабільності роботи системи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В 2.2.5-97 Будинки і споруди. Захисні споруди цивільної оборони URL:<http://kbu.org.ua/assets/app/documents/dbn2/55.1>
2. Опалення, вентиляція та кондиціонування: ДБН В.2.5-67:2013. [Чинний від 2014-01-01]. Київ: Мін-регіон України, 2013. – (Державні будівельні норми України).
3. Мікроклімат приміщень. [Електронний ресурс]. URL: <https://studfile.net/preview/5726365/>
4. Адсорбційні осушувачі повітря. [Електронний ресурс] URL: <https://myhumi.com.ua/uk/adsorbuyuchiosushuvachi>

5. Конденсаційний та адсорбційний осушувач повітря. [Електронний ресурс]. URL: <http://destech.com.ua/ua/blog-kompanii/kondensacionnye-ili-adsorbcionnyj-osushitel-vozduha>
6. Директива (ЄС) 2018/2001 Європейського Парламенту та Ради від 11 грудня 2018 року про сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел. 2018. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Monografia_final_21.12.2020.pdf
7. Альтернативна енергетика: [навч. посібник для студ. вищ. навч. закл.] / М.Д. Мельничук, В.О. Дубровін, В.Г. Мироненко, І.П. Григорюк, В.М. Поліщук, Г.А. Голуб, В.С. Таргоня, С.В. Драгнев, І.В. Свистунова, С.М. Кухарець. К: «Аграр Медіа Груп», 2012. 244 с. URL: http://ir.polissiauniver.edu.ua/bitstream/123456789/4582/3/Alt_energ_2012.pdf
8. Dreszer K., Vichalek R., Roszkowski A. Energia odnawialna – mozliwosci jej pozyskiwania i wykorzystania w rolnictwie. Krakow: DRUKROL, 2003. 256 с.
9. William E. Eleazer†, William S. Odl, Yu-Sheng Wang, and Morton A. Barlaz. Department of Civil Engineering, Box 7908, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina 27695-7908 , № 31 (3), 1997. P.P. 911–917.

Чебан Олександр Борисович – магістрант кафедри інженерних систем у будівництві, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, E-mail: cheban.ob@gmail.com

Коц Іван Васильович – кандидат технічних наук, професор кафедри інженерних систем у будівництві, Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Email: ivan.kots.2014@gmail.com

Cheban Oleksandr B. – Master's student, Department of Engineering Systems in Construction, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, E-mail: cheban.ob@gmail.com

Kots Ivan V. – Ph.D. in Engineering, Professor, Department of Engineering Systems in Construction, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, E-mail: ivan.kots.2014@gmail.com