

# ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ.

## ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 620:91: 697.1

DOI 10.20535/1813-5420.2.2024.303116

М.М. Шовкалюк<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-1898-3493

І.В. Кононенко<sup>1</sup>, магістр, ORCID 0009-0001-8846-0065

<sup>1</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ДЛЯ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ БАГАТОКВАРТИРНИХ БУДИНКІВ

*Актуальність використання енергії, отриманої від зовнішнього середовища за допомогою теплових насосів для енергозабезпечення будівель обумовлена зростанням витрат на централізоване енергозабезпечення; удосконаленням технологій і зниженням вартості впровадження подібних технічних рішень; активним розвитком даного напрямку в Європейському Союзі і зміною законодавчої бази в Україні для стимулювання більш широкого впровадження використання відновлюваних джерел енергії.*

*Об'єкт дослідження: процеси енергоспоживання та техніко-економічні показники комбінованого енергозабезпечення багатоквартирних будівель із застосуванням теплових насосів.*

*Предметом дослідження є методи та засоби для оцінювання ефективності застосування теплових насосів на потреби гарячого водопостачання та опалення багатоквартирних будівель з використанням теплового насосу та централізованого теплопостачання. Методи дослідження: аналітичні методи, системний аналіз, математичне моделювання, метод порівняльного і структурного аналізу. Дане дослідження проводилося в рамках виконання магістерської дисертації. Практичне значення результатів полягає в застосуванні розробленої математичної моделі для моделювання роботи теплового насосу з урахуванням динамічної зміни COP і водорозбору на прикладі багатоквартирних будівель.*

**Ключові слова:** будівля, тепловий насос, енергоспоживання, енергоефективність, моделювання, техніко-економічні показники.

#### Вступ

Розв'язання проблеми залежності від імпортованих енергоносіїв потребує комплексного підходу, тому в законодавчій базі України [1,2] передбачено заохочення широкого використання альтернативних та відновлювальних джерел енергії під час комплексної термомодернізації будівельного сектору та реконструкції інженерних мереж. Застосування теплових насосів (ТН) для опалення та гарячого водопостачання (ГВП) сприяє досягненню глобальних цілей сталого розвитку (№ 7 affordable and clean energy, № 8 decent work and economic growth; № 9 industry, innovation and infrastructure; № 13 climate action) та імплементації Європейської зеленої угоди. Країни Європи широко впроваджують теплові насоси в системах теплопостачання. Значного прогресу в цих питаннях досягли Швеція, Німеччина, Норвегія, Франція, Данія. Багато країн пропонують субсидії та податкові пільги для переходу на централізоване опалення з використанням ТН. У Швеції і Данії вже проведено подібні масштабні проєкти, у Німеччині існує програма KfW, яка фінансує до 30% вартості. Однак в Україні це обладнання поки не знайшло широкого застосування, передусім, через його високу вартість. Державний стандарт [3], присвячений використанню теплових насосів дещо застарілий та не враховує сучасних реалій. Ситуація з ринком теплових насосів в Україні на даний момент залишає бажати кращого. Частка теплових насосів у системах опалення значно менша, ніж у європейських країнах. Це пов'язано з низкою чинників: високою вартістю обладнання; недостатньому рівню державної підтримки і державних програм; недостатній інформованості; високою інертністю в прийнятті рішень. Однак перспективи зростання цього сегмента ринку досить обнадійливі з кількох причин:

-політичний фактор: Україна прагне знизити залежність від імпорту енергоресурсів, а ТН є альтернативою традиційним джерелам енергії;

-економічний фактор: незважаючи на високі початкові витрати, ТН окупаються завдяки низьким експлуатаційним витратам та тривалому строку експлуатації;

-екологічний фактор: використання ТН дозволить покращити стан якості повітря, що є актуальною проблемою для багатьох міст в Україні, з урахуванням ринку квот на викиди CO<sub>2</sub> надає додаткові економічні вигоди;

-технологічний фактор: розвиток технологій призводить до появи на ринку більш ефективних, надійних і дешевих ТН;

-соціальний фактор: зростає обізнаність населення про необхідність економії енергоресурсів та використання екологічно чистих технологій, що стимулює попит;

-інтеграція з іншими джерелами, що робить систему більш економічно привабливою.

Внаслідок повномасштабного вторгнення РФ в Україні було пошкоджено чи зруйновано значну кількість житлових та громадських будівель, постраждала критична інфраструктура, зокрема ТЕЦ, що забезпечували централізоване опалення та гаряче водопостачання. Відновлення та відбудову важливо здійснювати на засадах сталого розвитку та у співпраці з ЄС, використовуючи сучасні технології. Для житлових багатоквартирних будівель існує можливість утилізації теплоти вентиляційних викидів та використання теплоти для ТН. Зважаючи на достатньо високу вартість інвестиційних витрат на проекти із ТН для мешканців будівель постає питання щодо вибору потужності основного обладнання.

Проблеми використання ТН для багатоквартирних будівель вивчалися в роботах [4-6]. В [4] сформульовано задачу вибору оптимальної встановленої потужності базового та пікового теплового джерела, в якості критерію оптимізації використано величину сумарних витрат (капітальних та експлуатаційних) за весь період експлуатації обладнання. В [5] розглядалося застосування повітряних теплових насосів для систем гарячого водопостачання (ГВП) при роботі в комплексі з когенераційною установкою. В [6] розроблено оптимізаційну модель тригенерації з використанням теплових насосів в громадській будівлі. В дослідженні [7] проведено аналіз термодинамічної ефективності теплонасосних схем теплопостачання і запропонована методика для визначення оптимальної глибини використання низькопотенційного тепла у випарнику теплового насоса. В публікації [8] розглядається задача використання теплових насосів, що працюють на альтернативних джерелах енергії для опалення та гарячого водопостачання будівель. Серед висновків дослідження – витрати на енергоносії при використанні теплових насосів – в декілька разів менша, у порівнянні з витратами на централізоване опалення, роботу газових або електричних котлів аналогічної потужності, а впровадження ТН – перспективний напрямок використання альтернативних джерел енергії для забезпечення потреб будівель в тепловій енергії. Також важливим висновком дослідження є доцільність поєднання експлуатації теплових насосів з піковим джерелом теплоти. В [9] проаналізовано можливості використання ТН різних типів, враховано залежність їх ефективності від температури зовнішнього повітря.

Аналіз технічних та економічних показників при виборі сценаріїв комбінованої роботи теплового насоса та централізованого енергозабезпечення є актуальною задачею на сьогоднішній день.

**Метою дослідження** є розвиток методів і засобів для оцінювання техніко-економічних показників проєктів впровадження теплових насосів для енергозабезпечення багатоквартирних будівель.

**Завдання дослідження:** виконати аналіз розвитку ринку теплових насосів із оглядом законодавчої бази та стимулюючих програм підтримки для житлового сектору; розробити модель для можливості оцінювання технічних та економічних показників проєктів із застосуванням різних типів теплових насосів залежно від ступеня забезпечення потреб споживачів у тепловій енергії та гарячій воді та інших впливових факторів; провести розрахунки за розробленою моделлю на прикладі декількох багатоквартирних будівель в різних містах України та оцінити як змінюються техніко-економічні показники за різних сценаріїв.

## **Матеріал і результати досліджень**

### **Розвиток європейського ринку теплових насосів**

Згідно з даними Eurostat, у 2019 році загальна встановлена потужність теплових насосів у ЄС становила близько 35 GWt, а кількість встановлених теплових насосів наближалася до 11 мільйонів. Ці цифри значно зросли порівняно з 2010 роком, що відображає зростаючий інтерес та інвестиції в цю технологію. За період з 2016-2022 р.р. ринок ТН у Європі значно розширився. Це зростання було зумовлене кількома факторами: посилення фокусу на екологічних технологіях, зростання цін на традиційні джерела енергії, покращення технологій теплових насосів, адже нові моделі стали ефективнішими, що знизило вартість їх експлуатації та підвищило привабливість для споживачів. Динаміка продажів і загальної кількості встановлених ТН за період від 2005 до 2022 року становить від 446 тис. до 3 млн. в рік, загалом за вказаний період продано 19,79 млн. ТН [10]. Багато країн ЄС внесли зміни в законодавчу і нормативну базу стосовно заохочення використання екологічно чистих технологій. Наприклад, у Німеччині було запропоновано субсидії та податкові пільги для встановлення теплових насосів, що привело до росту ринку теплових насосів на 28 % в 2021 році, і на 53 % в 2022-му [11]. З 2016 по 2022 р.р. попит на ТН в Європі зростав у середньому на 10-15% на рік (рис.1), загальна кількість підключених ТН в системах опалення становить близько 20 мільйонів, приблизно в 16 % житлових і комерційних будівель Європи. Країни Європи впроваджують теплові насоси в системи опалення різною мірою. Однак, є певні лідери, які зробили

значний прогрес у цій галузі, зокрема Швеція, Німеччина, Норвегія, Франція, Велика Британія. Швеція вважається одним із піонерів у використанні теплових насосів. Країна впровадила їх ще на початку 2000-х і з 2021 року близько 90 % нових будівель вже будуються з ТН. У Норвегії частка теплової енергії від ТН становить приблизно 50 %, у Франції цей показник становить близько 18 % [10].

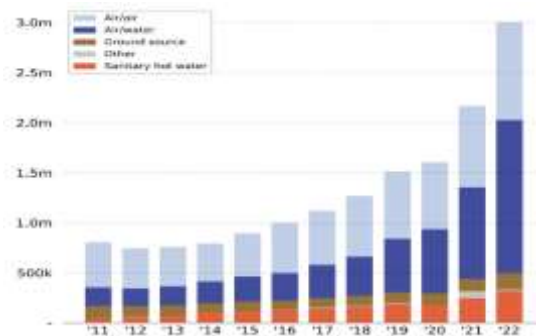


Рисунок 1 – Продажі теплових насосів в ЄС за категоріями, 2011-2022 р. [10]

Європейський союз останніми роками активно працює над переходом до зеленої енергетики. На рівні ЄС розроблено низку документів і стратегій, як-от «Зелений курс» і «Чиста планета для всіх», які передбачають значні інвестиції в поновлювані джерела енергії. Ще одним ключовим документом є стратегія «Energy Roadmap 2050», що акцентує увагу на використанні поновлюваних джерел енергії та технологій з низьким рівнем викидів. Кожна країна-член ЄС розробляє свої національні плани та стратегії, де передбачаються заходи для стимулювання використання теплових насосів.

Таким чином, тенденції у сфері теплопостачання з урахуванням прийнятих амбітних стратегічних планів в європейських країнах вказують на перспективи подальшого розвитку ринку теплових насосів як в ЄС, так і в Україні. Можна прогнозувати прискорений розвиток нових технологій, здешевлення теплових насосів і їх більш широке застосування для забезпечення тепловою енергією споживачів, в тому числі і багатоквартирних будинків. Задача оптимального вибору ТН для багатоквартирних будівель потребує додаткових розрахунків, техніко-економічних обґрунтувань. Тематика застосування теплових насосів у сфері теплопостачання є надзвичайно актуальною і потребує подальших досліджень.

#### Розрахункові моделі для вибору теплових насосів

Існує ряд програмних продуктів для розрахунків проєктів з використанням теплових насосів та моделювання їх роботи, наприклад: GeoT\*SOL, Daikin Altherma Simulator, HyGCHP (Hybrid Ground-Coupled Heat Pumps), TRNSYS (Transient System Simulation Tool), EnergyPlus, HAP (Hourly Analysis Program) від Carrier, EES (Engineering Equation Solver), Ground Loop Design (GLD). Аналіз показав, що існуюче програмне забезпечення: переважно розроблялось в першу чергу для розрахунку теплових насосів для приватного будинку і має ряд обмежень, не дає можливості моделювати різні сценарії, що можуть виникати при інтеграції теплових насосів в централізовані системи теплопостачання, а також не враховують динаміку водорозбору на протязі доби.

По результатам аналізу не було виявлено програмного забезпечення, що мало достатню гнучкість для розв'язання задачі підбору потужності теплового насосу і теплоакumuлюючого баку для теплопостачання багатоквартирних житлових будинків, які б давали можливість: комбiнувати тепловий насос з ІТП, використовувати ТН для попереднього підігріву води для потреб ГВП, враховувати динамічний водорозбір на протязі доби, моделювання підігріву зворотного теплоносія системи опалення і теплоакumuлюючого баку з взаємною залежністю температур.

Для подальших досліджень було розроблено математичну модель в MS EXCEL.

Завданням моделі є: розрахунок оптимальної з економічної і технічної точки зору потужності теплового насоса та об'єму теплоакumuлювальних баків; оцінювання параметрів роботи теплового насоса; можливість урахування додаткових заходів, такі як термомодернізація огорожень до сучасних норм [12] та модернізація інженерних мереж будівлі. Блок-схема розробленої моделі наведена на рис.2.

Модель дозволяє:

- розрахувати окупність проєкту впровадження теплового насоса з обраними параметрами;
- розрахувати оптимальне співвідношення між потужністю теплового насоса та об'ємом теплоакumuлювального баку для даного об'єкта;
- урахування змін інвестиційної складової залежно від проєкту модернізації;
- моделювання роботи теплового насоса з урахуванням динамічно змінюваного COP внаслідок зміни погодних умов, температури води в теплоакumuлюючому баку, водорозбору, температурного графіка системи опалення.

Кожного місяця змінюються наступні вхідні параметри: температура зовнішнього повітря, що впливає на COP, усереднений добовий водорозбір, температура холодної води. Результатом помісячного моделювання роботи ТН є результати виробництва теплової енергії і споживанню електричної енергії тепловим насосом за кожен місяць року. Фінальним етапом розрахунків є визначення економічних параметрів проекту.

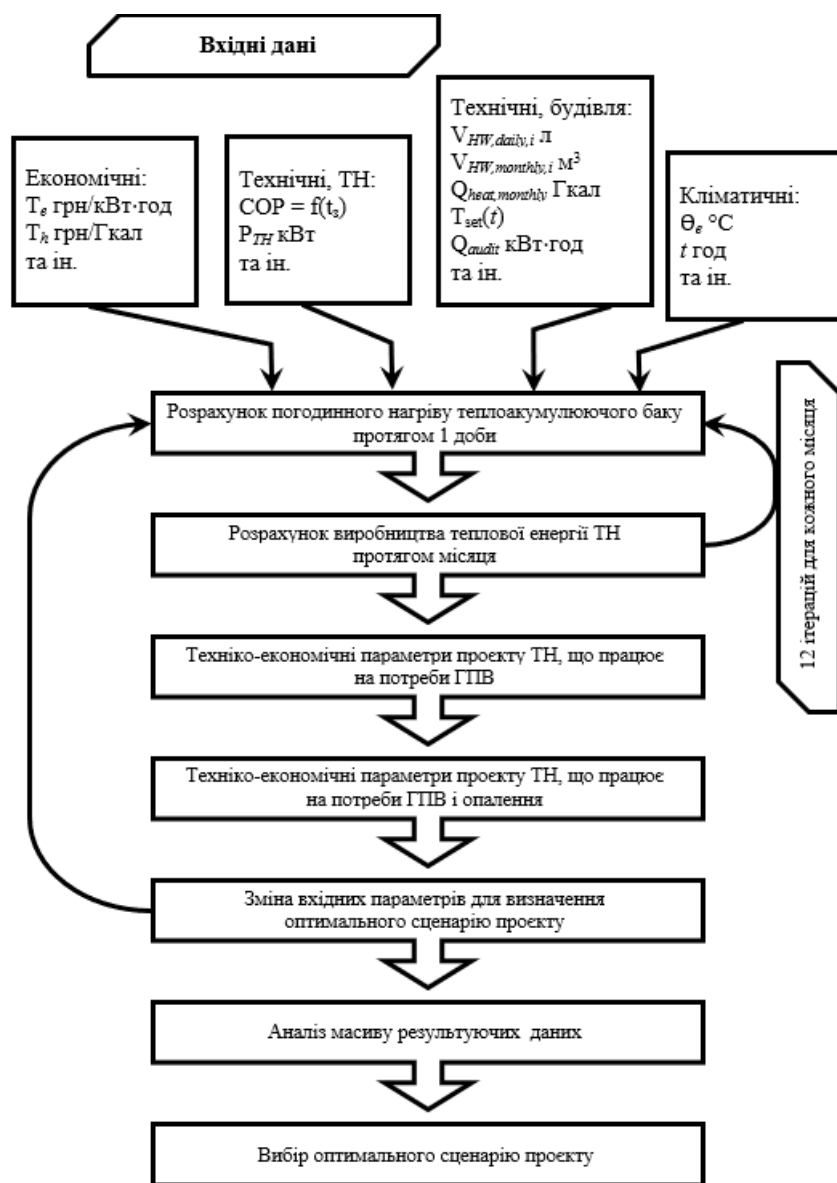


Рисунок 2 – Блок-схема розробленої математичної моделі

### Техніко-економічні показники проектів комбінованого енергозабезпечення будівель

На основі розробленої математичної моделі було проведено оцінку оптимальних сценаріїв використання теплових насосів – це є важливим кроком для визначення найбільш ефективних в коротко- і середньостроковій перспективі сфер застосування теплових насосів. Для проведення такого аналізу, було обрано ряд об'єктів різного типу і параметрів, щоб проаналізувати, в яких сценаріях теплові насоси можуть показати кращі перспективи застосування.

Для кожного об'єкту був проведений помісячний розрахунок кількості теплової енергії, що може бути вироблена тепловими насосами різної потужності, з урахуванням зміни COP теплового насосу в залежності від зміни температури навколишнього середовища (зовнішнього повітря – для теплових насосів типу повітря-вода, і ґрунту – для геотермальних теплових насосів). Обмежувочими факторами виступали: енергопотреба будівель; економічна доцільність проектів; діапазони температур, підігріву теплоносія, що доцільні для використання теплових насосів; коефіцієнт використання встановленої потужності ТН.

В розрахунках використовуються ринкові тарифи на електроенергію і природний газ. Дані тарифи близькі до середньоєвропейських, і прогнозується перспектива, що з часом, тарифи, в тому числі і для населення, будуть наблизитися до тарифів на енергоносії в ЄС. В різних містах відрізняється доля вартості газу в виробництві теплової енергії, відповідно, відрізняється і її, розрахована відповідно до ринкової вартості газу, вартість.

#### **Використання ТН для існуючої житлової багатоповерхової серійної будівлі в м. Київ**

Об'єкт дослідження - житловий 5-поверховий будинок, побудований в 1965 р., типовий зразок радянської забудови (типовий проект 1-480-19А), проведено утеплення, встановлено ІТП, налаштування ІТП оптимальні, температурний графік – оптимізовано. В будинку по декілька місяців не було доступне централізоване ГВП, що робить питання надійного постачання ГВП максимально актуальним. Даний об'єкт було обрано через наявність автоматизованої системи енергетичного моніторингу з датчиками в ІТП, що надає можливість побудувати фактичний графік водорозбору гарячої води.

Передбачається встановлення теплового насосу типу "повітря-вода" і теплоакumuлюючих баків з теплообмінниками і сепараторами. Дана система інтегрується з ІТП в підвалі будинку. Теплоакumuлюючий бак підключається до трубопроводу подачі холодної води на ГВП, і, таким чином, тепловий насос працює на попередній підігрів води для ГВП. Тепловий насос налаштовується на підігрів води в баку на 55 градусів. З урахуванням змінної температури повітря, режимів водорозбору і інших факторів, температура води на виході з баку в певні періоди буде менше 55 градусів, і її догрів буде відбуватися на теплообміннику ГВП в ІТП. Об'єм теплоакumuлюючого баку приймаємо виходячи із 40-50 % добового споживання гарячої води в січні (об'єм баку 2000 л), тепла потужність ТН 16 кВт; електрична потужність ТН - 4,57 кВт. Результати помісячних розрахунків представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Результати моделювання роботи ТН за кожен місяць року

Місяць року	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Споживання гарячої води за місяць ГВП, м <sup>3</sup>	148,9	146,7	142,2	133,3	120,4	82,8	88,1	89,9	97,6	127,7	110,9	122,0
Споживання Гкал на ГВП, з урахуванням циркуляції, Гкал	10,19	10,07	9,85	8,74	7,56	6,05	6,26	6,34	6,64	8,49	8,28	8,84
Середньомісячний COP	3,31	3,40	3,68	3,85	4,19	4,18	4,25	4,23	4,06	4,15	3,67	3,40
Середня температура теплоакumuлюючого баку °С	54,3	53,7	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0	55,0
Споживання електроенергії, кВт·год	2797	2628	2443	1795	1512	1092	1139	1164	1293	1967	1949	2302
Виробництво теплової енергії, кВт·год	9246	8926	8992	6913	6335	4567	4837	4921	5251	8159	7157	7827

З проведених розрахунків можна зробити наступні висновки, що потужності теплового насоса і об'єму теплоакumuлюючого баку в цілому достатньо для забезпечення потреб в ГВП протягом року, за винятком січня і лютого, коли середня температура в баку знижується до 54,3 °С і 53,7 °С відповідно, при підігріві системи циркуляції ГВП - теплоносієм, що надходить централізовано. Влітку тепловий насос здатний забезпечувати і потреби системи ГВП, що дозволить зекономити теплову енергію, покращити комфорт мешканців, і не буде необхідності користуватися електричними водонагрівачами.

Подальше моделювання дозволило зробити наступні висновки: використання теплового насоса комбіновано на потреби опалення і ГВП більш економічно доцільне (табл.2), ніж виключено на потреби ГВП, при заданих параметрах. Чим нижча температура подачі і зворотки системи опалення, тим більш доцільно використовувати тепловий насос для забезпечення потреб в опаленні.

При тарифах на електроенергію 6,2 грн/кВт·год і на теплову енергію 3959,45 грн/Гкал простий строк окупності такого проєкту складе 4,5 років.

Оскільки коефіцієнт ефективності роботи ТН є функцією від температур зовнішнього середовища і теплоносія, що нагрівається, зниження температури останнього дозволяє підвищити ефективність роботи ТН, а отже – економічні показники. Перехід на низькотемпературні системи опалення потребують додаткових капіталовкладень. Розроблена математична модель дозволяє розраховувати сценарії з різним

температурним графіком для оцінки доцільності таких заходів. Для даного моделювання було використано ТН з тепловою потужністю 30 кВт. З отриманих результатів можна зробити висновок, зміна температурного графіку суттєво впливає на окупність проекту. Так, в неутепленому будинку без ІТП, або з не налаштованим ІТП, з температурами в системі опалення в середньому на 17 градусів вищою, ніж в досліджуваному об'єкті, строк окупності складатиме при тих же параметрах 8,36 років проти 6,21 роки в досліджуваній будівлі. Модель дозволяє оцінити як економічну доцільність реконструкції системи опалення, так і кумулятивний ефект, що виникає при одночасній термомодернізації будівлі, встановленні і налаштуванні ІТП, що дозволяють знизити температурний графік, при встановленні ТН.

Таблиця 2 – Економічні параметри впровадження ТН на потреби опалення і ГВП

Інвестиції, грн	832 000
Річна економія теплової енергії, кВт·год	102 164
Річна витрата електроенергії, кВт·год	26 530
Річна економія, грн (при існуючих тарифах)	74 232
Проста окупність, років (при існуючих тарифах)	11,2

### Установка ТН в центральному тепловому пункті у м. Луцьк

Об'єктом дослідження є центральний тепловий пункт в м. Луцьк (рис.3.18) зі встановленою тепловою потужністю 1,482 Гкал/год, що забезпечує будинки району тепловою енергією на потреби опалення і ГВП. Оператор центрального теплостачання модернізує центральні теплові пункти (ЦТП), замінює теплообмінники, циркуляційні насоси та впроваджує системи автоматизації. Запропонований проект має на меті встановлення ТН типу "повітря-вода" тепловою потужністю 210 кВт для забезпечення більш ефективного та екологічно чистого рішення для нагріву гарячої води (рис.2). Це допоможе знизити витрати енергоносіїв на підготовку гарячої води. Цілодобово користувачами послуги з постачання гарячої води буде 21 житловий будинок, КП «Луцький клінічний пологовий будинок», дитячий садок №27 «Незабудка, Волинський обласний ліцей з посиленою військово-фізичною підготовкою, військова частина та КЗ «Луцька міська бібліотека». Реалізація проекту передбачає встановлення ТН типу повітря-вода з тепловою потужністю 210 кВт для попереднього підігріву гарячої води. Для акумулювання тепла передбачається встановлення 8 теплоакumuлюючих баків об'ємом по 5000 л. Схема підігріву аналогічна підготовці гарячої води в ІТП багатоквартирних будинків – підігріта в баках вода при водорозборі направляється на теплообмінник ГВП в ЦТП, де догрівається до нормативної температури гарячої води (55 °С) і направляється споживачам. На рисунку 3 представлена доля теплової енергії, що буде вироблятися тепловим насосом по відношенню до кількості необхідної теплової енергії на потреби ГВП.

В таблицях 3-4 представлено узагальнені результати розрахунків.

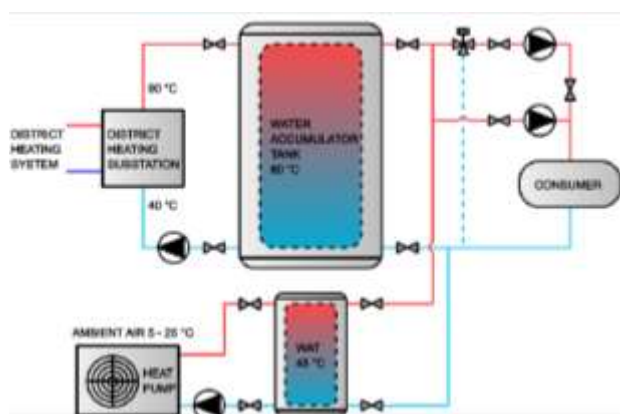


Рисунок 2 – Принципова схема включення ТН в ЦТП

Таким чином, розраховано, що проекти з використанням теплових насосів з інтеграцією в ЦТП, для попереднього підігріву ГВП доцільний і економічно обґрунтований захід.

### Використання теплових насосів типу «грунт-вода» для автономного забезпечення тепловою енергією житлового комплексу у м. Хмельницький (містечко для переселенців)

Об'єктом дослідження є житловий комплекс, що проектується (рис.4). На етапі проектування прораховується можливість встановлення теплових насосів. Зібрані вхідні дані, що характеризують загальну енергопотребу містечка і параметри окремих його будівель (табл.5). Згідно результатів

моделювання, після проведення розрахунків енергопотреби будівель, для гарантованого забезпечення нормативної температури в будинках при  $t_{p.o.}$  температури зовнішнього повітря і ГВП, повністю виключно тепловими насосами, необхідно забезпечити теплову потужність з урахуванням тепловтрат в мережах – 400 кВт. Був проведений аналіз геології ґрунтів ділянки і, з урахуванням їх властивостей, розраховано необхідну довжину скважин, їх кількість, за умови, що глибина скважин – 50 м, оптимальну відстань між скважинами і площу ділянки для буріння (табл.6)

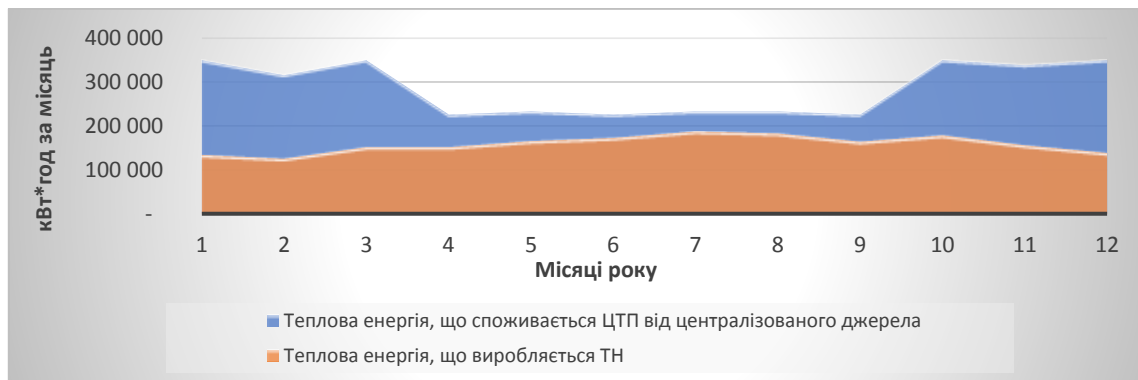


Рисунок 3 – Розподіл частки теплової енергії на ГВП між централізованим джерелом та ТН

Таблиця 3 – Техніко-економічні характеристики проекту

Технічні показники:	
Встановлена теплова потужність ТН, кВт	210
Встановлена електрична потужність ТН, кВт	60
Об'єм теплоакуюлюючих ємностей, що встановлюються, м <sup>3</sup>	40
Середньорічний SCOP роботи теплового насосу	3,625
Середня температура догріву води в опалювальний сезон, °С	37
Середня температура догріву води в неопалювальний сезон, °С	49
Розрахункове покриття енергопотреби ГВП ТН в неоп. сезон	74%
Розрахункове покриття енергопотреби ГВП ТН в оп. сезон	44%

Таблиця 4 – Фінансові характеристики проекту

Фінансові показники:	
Інвестиції, грн	13 800 000
Річна витрата електричної енергії, кВт·год	538 560
Річна економія теплової енергії, Гкал	1 640
Річна економія теплової енергії, кВт·год	1 906 992
Економія коштів, грн/рік	2 692 356
Проста окупність, років (при ринкових тарифах)	5,13



Рисунок 4 – Схема містечка

Таблиця 5 – Вхідні дані про містечко

Кількість будівель	10	Кількість мешканців на будинок	33
Габарити будівель	Д/Ш/В– 25/14,7/9,4 м	Розрахункова енергопотреба на 1 будівлю	33 кВт
Поверховість	3	Споживання ГВП на людину	1,6 м <sup>3</sup>
Утеплення будівель	за ДБН В.3.6-31:2021	Загальна теплова потужність ТН	400 кВт
Централізоване опалення і ГВП	Передбачене	Необхідна електрична потужність	140 кВт

Таблиця 6 – Технічні характеристики проекту

Загальна потужність ТН, кВт	400
Необх. ел. потужність, кВт	140
Загальна довжина скважин, м	5285,8
Кількість скважин	106
Відстань між скважинами, м	7,5
Площа ділянки для скважини, м <sup>2</sup>	5962,5

Було проведено декілька моделювань для різних сценаріїв з урахуванням встановлення газової котельної в якості резервного джерела для температур зовнішнього повітря нижче -4 С. Змінним параметром був температурний графік системи опалення – для системи опалення з радіаторами в якості опалювальних приладів в квартирах температурний графік 40/60, для системи з теплими підлогами – 26/35. Для сценарію з наявним резервним джерелом – загальна теплова потужність ТН і довжина геотермальних скважин були знижені на 40 %. Результати розрахунків представлені в таблицях 7,8.

Таблиця 7 – Фінансові характеристики проекту з ТН в якості єдиного джерела опалення

Грунт - вода - автономно, без резервного джерела		
Показник	Радіатори	Тепла підлога
Вартість електроенергії, грн/кВт·год	6,12	
Вартість природного газу, грн/м <sup>3</sup>	18,5	
Вартість встановленої теплової потужності ТН, \$/кВт	1500	
Курс \$	40	
Інвестиції, грн	28 800 000	26 520 000
Річна витрата електричної енергії, кВт·год	233362	198757
Річна економія теплової енергії, кВт·год	834779,4	834779,4
Економія коштів, грн/рік	1 407 060	1 821 359
Проста окупність, років	18,85	14,56

Таблиця 8 – Фінансові характеристики проекту з ТН в комбінації з резервним джерелом

Грунт - вода - в комбінації з резервним джерелом		
Показник	Радіатори	Тепла підлога
Вартість електроенергії, грн/кВт·год	6,12	
Вартість природного газу, грн/м. куб.	18,5	
Вартість встановленої теплової потужності, \$/кВт	1500	
Інвестиції, грн	18 600 000	17 340 000
Річна витрата електричної енергії, кВт·год	211 694	188 819
Річна економія теплової енергії, кВт·год	762098,4	887449,3
Економія коштів, грн/рік	1 292 815	1 858 550
Проста окупність, років	13,41	9,33

\*Витрати на встановлення резервного джерела тепла не враховуються.



По результатам виконаних досліджень і розрахунків, з урахуванням заданих параметрів, аналіз результатів показує, що використання теплових насосів типу «грунт-вода» – ефективний спосіб забезпечити автономне і економічне опалення для житла, при умові наявності достатньої площі ґрунту для буріння скважин і фінансових ресурсів для здійснення капітальних витрат. На відміну від теплових насосів «повітря-вода», при використанні ґрунту в якості джерела тепла можливо ефективно забезпечити енергопотребу в опаленні навіть в найбільш морозну погоду.

При цьому, є наступні шляхи оптимізації проекту, які значно покращать економічні показники:

1. Розглянути можливість використовувати резервне джерело тепла. Це може бути газова котельня, або, найбільш простий спосіб – електроТЕНи. Це дозволить значно зменшити необхідну встановлену потужність теплового насосу, що скоротить інвестиційні витрати на 30-40 %, і значно покращить економічні показники проекту, але в той же час потребуватиме підведення додаткових мереж.

2. Використання "теплої підлоги" (кращий варіант) значно скоротить поточні витрати на електроенергію, оскільки ефективність роботи теплових насосів тим вища, тим нижча температура теплоносія в системі опалення.

3. Використання централізованої системи кондиціювання влітку – оптимальний варіант для ґрунтових теплових насосів.

Основні фактори, що впливають на окупність проектів:

- температурний графік теплоносія в системі опалення;
- проведення комплексної термомодернізації будівель з модернізацією системи опалення дозволить суттєво скоротити потужність і вартість ТН;
- використання теплових насосів в тому числі на потреби ГВП (доцільно відновлювати централізоване ГВП навіть там, де воно було відключено раніше);
- доля потреби в опаленні, яку необхідно забезпечити тепловим насосом.
- співвідношення ціни на газ і електроенергію (чим більша вартість газу по відношенню до вартості електроенергії – тим більш вигідний тепловий насос по відношенню до газового/централізованого опалення та централізованого ГВП).

Дане дослідження було проведено в рамках виконання магістерської дисертації [13-15].

#### **Висновки**

В роботі проведено аналіз існуючого стану ринку теплових насосів і огляд існуючих наукових досліджень, що підтверджує актуальність теми. Тестування функцій існуючих програмних продуктів показало, що вони мають недостатню гнучкість для розв'язання задачі підбору потужності теплового насосу і теплоакumuлюючого баку для теплопостачання багатоквартирних житлових будинків. Було розроблено математичну модель, що дозволяє моделювати роботу теплового насосу на забезпечення тепловою енергією для ГВП і опалення багатоквартирних будівель, з можливістю урахування погодинної динаміки зміни температури в теплоакumuлюючому баці, впливу водорозбору, різні схеми приєднання ТН для існуючих і нових багатоквартирних житлових будівель. Модель дозволяє визначити фінансово-економічні показники проектів з урахуванням заданих вартостей обладнання і тарифів на енергоносії.

Розроблена модель дозволяє визначити також наступні технічні параметри:

- оптимальну для об'єкту потужність встановлюваного ТН і об'єм теплоакumuлюючого баку з урахуванням температурного графіку системи опалення;
- кількість теплової енергії, що може бути зекономленою завдяки роботі теплового насосу, та кількість електричної енергії, що буде затрачуватися тепловим насосом;
- вплив на економічні показники проектів змінних факторів (оцінка ризиків).

Досвід країн ЄС показав, що використання ТН в системах опалення і ГВП житлових будівель є доцільним з урахуванням впровадження комплексних проектів утеплення огорожувальних конструкцій і модернізації інженерних систем будівель для зменшення інвестиційних витрат.

#### **Список використаної літератури**

1. Закон України «Про теплопостачання» № 2633-IV, ред. від 31.03.2023, 2849-IX. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text>
2. Закон України «Про енергетичну ефективність» №1818-IX, ред. від 27.07.2023, 3220-IX. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>
3. ДСТУ Б В.2.5-44:2010 Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування систем опалення будівель з тепловими насосами (EN 154550:2007, MOD)
4. Nikitin E. Technical and Economic Efficiency of Air Thermal Pumps with Drive from Gas and Piston Cogeneration Installations of Hot Water Supply Systems / Энерготехнологии и ресурсосбережение, 2011, №4. С.19-24.
5. Нікітін Е.Е. Оптимальне розподілення встановленої потужності в системах опалення з базовим та піковим джерелом теплової енергії / Промислова теплотехніка, 2010, т. 32, №3. с.64-72.

6. A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex. P. Arcuri, G. Florio, P. Fragiaco / Energy 32 (2007). P. 1430–1447.
7. Безродний М.К., Притула Н.О. Термодинамічна ефективність теплонасосних схем теплопостачання [Електронний ресурс] / «Вісник Вінницького політехнічного інституту», №3. – 2013. – Режим доступу: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1079/1078>
8. Босий М.В., Кузик О.В. Теплові насоси для опалення та гарячого водопостачання [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/217/5889/12305-1>
9. Григорчук Г.В., Григораш Ю.В., Олійник А.П. Оцінка можливості використання теплових насосів різних типів в енергозберігаючих технологіях / Міжнар. науковий журнал «Грааль науки», №29. С.174-184. – 2023. – Режим доступу: <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/article/view/1440>
10. European Heat Pump Market and Statistics Report 2023 [Електронний ресурс] / European Heat Pump Association (EHPA). – Режим доступу: [https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2023/06/EHPA\\_market\\_report\\_2023\\_Executive-Summary.pdf](https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2023/06/EHPA_market_report_2023_Executive-Summary.pdf)
11. Wärmepumpenabsatz 2022: Wachstum von 53 Prozent gegenüber dem Vorjahr [Електронний ресурс] / Der Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. – 2023. – Режим доступу: <https://www.waermerpumpe.de/presse/news/details/waermerpumpenabsatz-2022-wachstum-von-53-prozent-gegenueber-dem-vorjahr/>
12. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель
13. Шовкалюк М.М., Кононенко І.В. Економічні показники проєктів комбінованого енергозабезпечення багатоквартирної будівлі з використанням теплового насосу та централізованого теплопостачання // Збірник матеріалів XV науково-техн. конф. «Енергетика. Екологія. Людина», присвячена 125-річчю КПІ [16-18 травня 2023] – К.: НН ІЕЕ, 2023. С.62-66. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/63408>
14. Шовкалюк М.М., Кононенко І.В. Енергозабезпечення багатоквартирних будинків в новому містечку для переселенців за допомогою теплових насосів. // Збірник наук. праць IX міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'2023». [Київ, 22-24 листопада 2023 р.] – С.138-140.
15. Кононенко І.В. Дослідження ефективності роботи теплових насосів для енергопостачання багатоквартирних будівель з урахуванням водорозбору. – К.КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2023. 137 с.

**M. Shovkaliuk**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-1898-3493

**I. Kononenko**<sup>1</sup>, master student, ORCID 0009-0001-8846-0065

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## **STUDY OF THE EFFICIENCY OF HEAT PUMPS FOR ENERGY SUPPLY OF APARTMENT BUILDINGS**

*The relevance of using energy obtained from the external environment with the help of heat pumps for energy supply of buildings is due to the increase in costs for centralized energy supply; improving technologies and reducing the cost of implementing similar technical solutions; active development of this direction in the European Union and changes in the legislative framework in Ukraine to stimulate the wider implementation of the use of renewable energy sources.*

*Research object: energy consumption processes and technical and economic indicators of combined energy supply of multi-apartment buildings using heat pumps.*

*The subject of the study is methods and tools for evaluating the effectiveness of heat pumps for the needs of hot water supply and heating of multi-apartment buildings using a heat pump and centralized heat supply. Research methods: analytical methods, system analysis, mathematical modeling, the method of comparative and structural analysis. This study was carried out as part of a master's thesis. The practical significance of the results lies in the application of the developed mathematical model for simulating the operation of the heat pump taking into account the dynamic change of COP and water distribution on the example of multi-apartment buildings.*

**Keywords:** building, heat pump, energy consumption, energy efficiency, modeling, technical and economic indicators.

### **References**

1. Law of Ukraine "On Heat Supply" No. 2633-IV, ed. dated 31.03.2023, 2849-IX. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text>.
2. Law of Ukraine "On Energy Efficiency" No. 1818-IX, ed. dated 07/27/2023, 3220-IX. Access mode:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>.

3. DSTU B V.2.5-44:2010 Engineering equipment of buildings and structures. Design of building heating systems with heat pumps (EN 154550:2007, MOD)

4. Nikitin E. Technical and Economic Efficiency of Air Thermal Pumps with Drive from Gas and Piston Cogeneration Installations of Hot Water Supply Systems / *Energy technologies and resource conservation*, 2011, №4. C.19-24.

5. Nikitin E.E. Optimal distribution of installed power in heating systems with a base and peak source of thermal energy / *Promyslova teplotekhnika*, 2010, vol. 32, No. 3. pp. 64-72.

6. A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex. P. Arcuri, G. Florio, P. Fragiaco / *Energy* 32 (2007). P. 1430–1447.

7. Bezrodnyi M.K., Prytula N.O. Thermodynamic efficiency of heat pump schemes of heat supply [Electronic resource] / "Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute", No. 3. – 2013. – Access mode: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1079/1078>

8. Bosiy M.V., Kuzyk O.V. Heat pumps for heating and hot water supply [Electronic resource] / Access mode: <http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/view/217/5889/12305-1>

9. Hryhorchuk G.V., Hryhorash Yu.V., Oliynyk A.P. Assessment of the possibility of using heat pumps of various types in energy-saving technologies [Electronic resource] / *International scientific journal "Grail of Science"*, No. 29. P.174-184. – 2023. – Access mode: <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/article/view/1440>

10. European Heat Pump Market and Statistics Report 2023 / European Heat Pump Association (EHPA). – Access mode: [https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2023/06/EHPA\\_market\\_report\\_2023\\_Executive-Summary.pdf](https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2023/06/EHPA_market_report_2023_Executive-Summary.pdf)

11. Wärmepumpenabsatz 2022: Wachstum von 53 Prozent gegenüber dem Vorjahr [Електронний ресурс] / Der Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V. – 2023. – Access mode: <https://www.waermepumpe.de/presse/news/details/waermepumpenabsatz-2022-wachstum-von-53-prozent-gegenueber-dem-vorjahr/>

12. DBN V.2.6-31:2021 Thermal insulation and energy efficiency of buildings

13. Shovkalyuk M.M., Kononenko I.V. Economic indicators of projects of combined energy supply of multi-apartment buildings using a heat pump and centralized heat supply // *Collected materials XV scientific and technical. conf. [May 16-18, 2023] K.: 2023. P.62-66.* – Access mode: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/63408>

14. Shovkalyuk M.M., Kononenko I.V. Energy supply of multi-apartment buildings in a new town for immigrants with the help of heat pumps. // *Collection of Sciences. Proceedings of the IX International science and technology and teaching method. conf. "Energy management: status and development prospects - PEMS'2023". [Kyiv, November 22-24, 2023]* – P.138-140.

15. Kononenko I.V. Study of the efficiency of heat pumps for power supply of multi-apartment buildings, taking into account water separation. - *K.KPI named after Igor Sikorskyi, 2023. 137 p.*

Надійшла: 17.04.2024

Received: 17.04.2024