

УДК 697.1

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВАРІАНТІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ І ТЕПЛООВОГО ЗАХИСТУ ОФІСНОЇ БУДІВЛІ

Д-р техн. наук В. І. Дешко, асп. О. С. Наумчук

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF THE OPTIONS FOR THE MODERNIZATION OF THE HEAT SUPPLY AND THERMAL PROTECTION OF THE OFFICE BUILDING

Dr. Sc. (Tech.) V. Deshko, PhD student O. Naumchuk

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.204.2023.283743>



**Анотація.** Концепція 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 направлені на досягнення цілей, викладених у Директиві Європейського Парламенту і Ради ЄС про енергетичну ефективність будівель, що говорить про вагомні кроки до підвищення енергоефективності будівельного сектору України. Згідно з вищевказаними нормативно-правовими документами, обов'язковою умовою цього будівництва та реконструкції існуючих будівель є забезпечення високого рівня теплового захисту будівлі та використання відновлювальних джерел для покриття необхідного енерговикористання. У роботі проведено техніко-економічне оцінювання модернізації офісної будівлі в місті Києві до рівня високоенергоефективної, що використовує тепловий насос для забезпечення необхідного теплозабезпечення. Оцінювання генерації необхідного теплозабезпечення будівлі тепловим насосом і використаної електричної енергії тепловим насосом базується на результатах моделювання у програмному середовищі GeoTSOL.

З метою оцінювання економічної привабливості проєкту модернізації існуючої будівлі до рівня високоенергоефективної, що використовує відновлювальні джерела для теплозабезпечення, проведено розрахунок потреби енергії на опалення у програмному середовищі Design Builder та інтегральних витрат на опалення будівлі при використанні відновлювальних і традиційних джерел енергії при різних рівнях теплового захисту. Отримані результати свідчать про привабливі як з економічної, так і екологічної точки зору можливості реалізації будівництва високоенергоефективної будівлі, що використовує для теплозабезпечення відновлювальні джерела енергії.

**Ключові слова:** високоенергоефективна будівля, джерело енергії, тепловий насос, nZEB, теплозабезпечення, енергозабезпечення, потреба енергії на опалення.

**Abstract.** The concept of implementation of the state policy in the field of ensuring the energy efficiency of buildings in terms of increasing the number of buildings with close to zero energy consumption and the National Plan for the increase in the number of buildings with close to zero energy consumption are aimed at achieving the goals set out in the Energy Performance of Building Directive, which indicates significant steps towards improving the energy efficiency of the Ukrainian construction sector. According to the above regulations, a prerequisite for new construction and renovation of existing buildings is to ensure a high level of thermal insulation of the building and the

*use of renewable sources to cover energy consumption. The work carried out a feasibility study of the modernization of an office building in the city of Kyiv to the level of a highly energy-efficient building using a heat pump to provide the necessary heat supply. Estimation of generation of required heat supply of the building by the heat pump and used electrical energy by the heat pump is based on the simulation results in the GeoTSOL software environment.*

*In order to assess the economic attractiveness of the project for upgrading an existing building to the level of a highly energy-efficient building using renewable sources for heat supply, the calculation of the energy demand for heating in the Design Builder software environment and the integral costs for heating the building using renewable and traditional energy sources at different levels of thermal protection was made. The results obtained indicate attractive, both from an economic and environmental point of view, the possibilities of implementing the construction of a highly energy-efficient building that uses renewable energy sources for heat supply.*

**Keywords:** high-energy efficient building, energy source, heat pump, nZEB, heat supply, energy supply, heating energy consumption.

**Вступ.** Енергоємність валового внутрішнього продукту є однією з фундаментальних характеристик економіки країни та характеризується рівнем витрат паливно-енергетичних ресурсів на одиницю виробленого валового внутрішнього продукту [1]. Історично країни, що є експортерами сировини, мають вищий показник енергоємності, тому у світовому рейтингу країн з найбільшою енергоємністю ВВП країни колишнього Радянського Союзу займають лідируючі позиції. Незважаючи на тенденцію зниження енергоємності валового внутрішнього продукту протягом років в Україні, український показник перевищує світові значення приблизно вдвічі [2, 3], що пояснюється різницею в економічній структурі та досягненнях у сфері енергоефективності [4]. Енергоефективність як напрям забезпечення посилення енергетичної безпеки та декарбонізації країни і світу в цілому, забезпечує економію енергії в різних сферах економіки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** За даними роботи [4], частка загального глобального кінцевого споживання енергії будівлями та будівельним сектором загалом складає 30 %. Разом з тим прямі та непрямі викиди від експлуатації будівель у 2021 році зросли на 5 %, порівняно з 2020 роком і на 2 %, порівняно з 2019 роком [5]. Відсоткова

частка глобальних енергетичних і технологічних викидів у 2021 році [5] є такою:

- 5,7 % – прямі викиди від експлуатації житлових будівель;
- 10,9 % – непрямі викиди від експлуатації житлових будівель;
- 2,7 % – прямі викиди від експлуатації нежитлових будівель;
- 7,6 % – непрямі викиди від експлуатації нежитлових будівель;
- 6,4 % – викиди від будівництва будівель;
- 6,6 % – викиди інших напрямків будівельної галузі;
- 30 % – викиди інших галузей промисловості;
- 21,8 % – викиди транспорту;
- 8,3 % – інші викиди.

Тобто 26,9 % загальних світових викидів пов'язані з експлуатацією будівель (використання викопного палива як основного теплоносія, несвідоме використання палива, недостатня обізнаність у питаннях енергозбереження та енергоефективності), 13 % глобальних викидів забезпечуються будівельним сектором ще на етапі будівництва. Загалом 39,9 % світових викидів у 2021 році покривала будівельна галузь. Виконання Глобальних цілей сталого розвитку [6] у частині декарбонізації секторів економіки

Європи, у тому числі будівельної галузі, відбувається відповідно до нормативно-правових документів, опублікованих Європейською Комісією: Директиви про енергетичну ефективність будівель [7], Директиви про енергоефективність [8], Європейської Зеленої угоди [9]. Виконання основних цілей [7-9] дасть змогу забезпечити екологічно чисте середовище для зростання майбутніх поколінь, більш чисту енергію та використання чистих технологічних інновацій різних галузей економіки, будівництво високоенергоефективних будівель і глобально конкурентоспроможну і стійку економіку.

Конкретні завдання в частині будівництва високоенергоефективних будівель викладені в Директиві [7] та означають забезпечення майже нульового споживання енергії в усіх нових житлових будівлях до кінця 2020 року та для всіх нових громадських будівель після 31 грудня 2018 року. Так, забезпечення майже нульового споживання енергії будівлями встановлюється вимогами до огорожувальних конструкцій і використаних джерел енергії (переважно необхідне споживання енергії з відновлювальних джерел).

Ратифікація Угоди про асоціацію між Україною, з одного боку, і Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії та їхніми державами-членами, з іншого боку [10], у 2014 році означає виконання вимог Директиви [7], у тому числі у встановленні вимог до будівель з майже нульовим споживанням енергії (стаття 338, додаток XXVII [7]). Проєкт наказу Мінрегіону «Про затвердження Вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії» [11], Концепція реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії [12] і Національний план збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання

енергії [13], як основні нормативно-правові документи України в питанні підвищення енергоефективності будівельного сектору, містять зобов'язання знизити загальний показник постачання первинної енергії та викидів парникових газів в атмосферу, що призведе до збільшення частки високоенергоефективних будівель. Послідовна реалізація цих зобов'язань потребує техніко-економічних обґрунтувань відповідно до національних умов і особливостей експлуатації будівель різного призначення.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є техніко-економічне оцінювання модернізації офісної будівлі до рівня nZEB. Для виконання мети поставлено такі завдання:

1. Проаналізувати можливості покриття необхідного теплозабезпечення існуючої будівлі, а також будівлі, утепленої відповідно до вимог України та Швеції відновлювальним джерелом енергії.

2. Оцінити генерацію теплової енергії відновлювальним джерелом для різних рівнів теплового захисту будівлі з використанням динамічного моделювання.

3. Оцінити інтегральні витрати на опалення при різних рівнях теплового захисту будівлі при використанні різних джерел енергії – від традиційного джерела енергії, що працює на викопному паливі, до відновлювального джерела енергії.

**Основна частина дослідження.** За результатами дослідження, опублікованими Київською школою економіки наприкінці жовтня 2022 року [14], загальна сума задокументованих збитків житловій і нежитловій нерухомості, іншій інфраструктурі в результаті російсько-української війни склала понад 127 млрд дол. США (станом на вересень 2022 року). Загальна площа зруйнованих або пошкоджених об'єктів житлового сектору становить 74,1 млн кв. м. Разом з тим з початку війни пошкодження, повного зруйнування або «привласнення» російськими представниками зазнали щонайменше 616 адміні-

стративних будівель в Україні. Майбутнє відновлення пошкоджених будівель відбуватиметься відповідно до робіт [11-13] і вимог [15]. Це означає, що тепловий захист нових/реконструйованих будівель відповідає нормам чинного законодавства, а енергія, що використовується будівлею, – переважно з відновлювальних джерел (сонячна, вітру, геотермальна, гідроенергетика, океану, біомаси [16]). Слід зазначити, що будівництво за вимогами, описаними вище, знайшло своє практичне застосування у країнах Східної Європи. Наприклад, з метою підвищення лояльності громадськості та масштабування будівель з майже нульовим споживанням енергії в

Румунії подано пілотний проєкт модернізації середньої школи енергетичних технологій [17] до рівня nZEB. Загальний термін окупності проєкту [17] становить три з половиною роки, що у свою чергу створює перспективи розвитку будівель рівня nZEB.

Як приклад модернізації старих будівель до таких, що є енергонезалежними та забезпечують необхідну потребу в енергії відновлювальними джерелами, розглянемо для офісної будівлі в місті Києві [18]. Початковим етапом дослідження є створення моделі існуючої будівлі в середовищі DesignBuilder (рис. 1) з техніко-фізичними параметрами, поданими в табл. 1.

Таблиця 1

Техніко-фізичні параметри офісної будівлі в м. Києві

Тип огорожувальної конструкції		Термічний опір огорожувальної конструкції R, м <sup>2</sup> ·°C/Вт
Зовнішні стіни		1,36
Перекриття над проїздами та неопалювальними підвалами		0,37
Світлопрозорі конструкції	металопластикові	0,6
	склоблоки	0,4
Двері зовнішні	металопластикові	0,6
	металеві	0,3
Дах		0,4

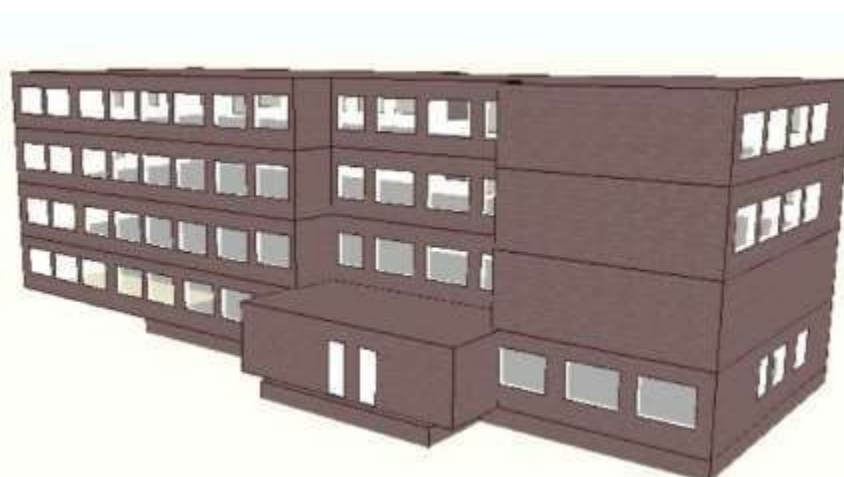


Рис. 1. Модель офісної будівлі в м. Києві

Покращення теплового захисту будівлі проводилось поетапно відповідно до вимог України [19] і Швеції [20] (як забезпечення «високоенергоєфективного» теплового захисту) з використанням теплоізолюючих матеріалів, описаних у роботі [18]. Так, розрахунок необхідного енергоспоживання в середовищі DesignBuilder проведено для трьох варіантів [18]:

1) існуюча ситуація – неутеплена будівля, значення термічних опорів огорожувальних конструкцій відповідають значенням табл. 1;

2) тепла оболонка будівлі покращена відповідно до вимог України [19];

3) тепла оболонка будівлі покращена відповідно до вимог Швеції [20].

З метою виконання вимог [7, 9, 11] і виходячи з оцінювання географічних особливостей розміщення об'єкта дослідження в розрізі можливостей використання відновлювальних джерел енергії безпосередньо на об'єкті або поблизу [11] розглянуто варіант використання теплового насоса типу «повітря – вода» як основного джерела енергії для опалення будівлі. Тобто розглядається варіант використання теплового насоса для опалення громадської будівлі в місті Києві для трьох рівнів теплового захисту будівлі – неутеплена будівля, будівля, утеплена відповідно до вимог України [19], і будівля, утеплена відповідно до вимог Швеції [20]. Аналіз можливостей генерації енергії тепловим насосом для трьох вищеописаних варіантів виконувався в середовищі GeoTSOL [21]. Цей програмний продукт дає змогу оцінити енергозабезпечення об'єкта з використанням теплового насоса для теплозабезпечення будівлі з урахуванням таких параметрів:

- кліматичні дані (зовнішня температура повітря залежно від регіону розміщення будівлі);

- дані енергоспоживання будівлі на опалення;

- опалювальна площа будівлі;
- внутрішня температура;
- верхня межа зовнішньої температури, при якій працюватиме система опалення;

- проєктна зовнішня температура [22] (програма обмежується значеннями температури не нижче  $-19,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Разом з тим програма дає змогу здійснювати моделювання енергозабезпечення будівлі для різних режимів роботи: моновалентного, моноенергетичного та бівалентного. За роботою [21], моновалентний режим роботи характеризується використанням теплового насоса як єдиного джерела теплозабезпечення будівлі, моноенергетичний режим передбачає паралельну, альтернативну або частково паралельну роботу теплового насоса та додаткового нагрівача, бівалентний режим означає використання теплового насоса та котла при їхній паралельній, альтернативній і частково паралельній роботі.

Слід зазначити, що в роботі не розглядається можливість заміни інженерних систем теплопостачання та постачання гарячої води для потреб відвідувачів будівлі. Тобто вибір теплового насоса та режиму роботи теплового насоса виконується відповідно до гідравлічного режиму існуючої системи опалення та необхідного енергозабезпечення, отриманого в результаті динамічного моделювання будівлі в DesignBuilder для трьох варіантів теплового захисту будівлі. Врахованим є факт більш високої ефективності застосування теплового насоса для утепленої будівлі [23], тому теплозабезпечення неутепленої будівлі тепловим насосом у GeoTSOL розглядаємо лише для бівалентного режиму роботи. У програмі GeoTSOL обираємо систему «bivalent HPS with space heating and DHW», дані щодо споживання гарячої води приймаємо рівними нулю. Схема підключення котла і теплового насоса зображена на рис. 2.

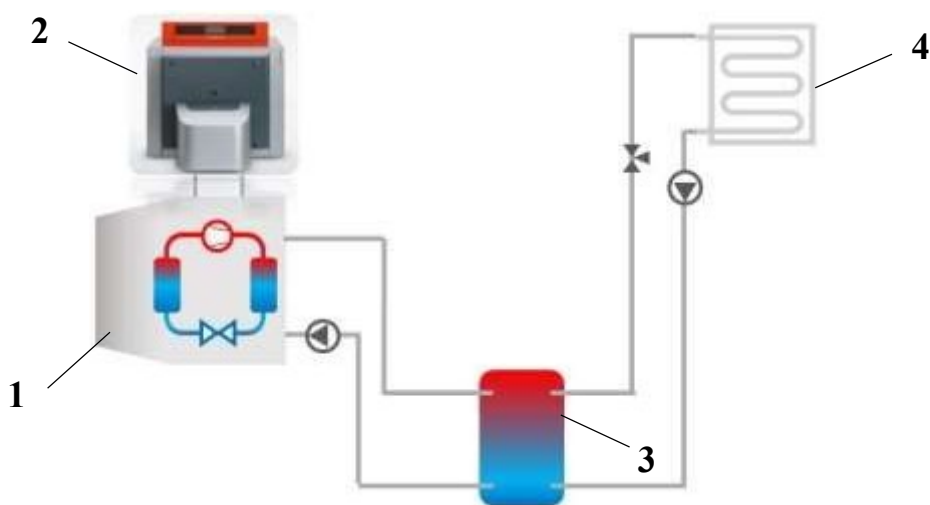


Рис. 2. Бівалентний режим роботи теплового насоса. Схема підключення котла і теплового насоса: 1 – тепловий насос типу «повітря – вода»; 2 – газовий котел; 3 – бак-накопичувач; 4 – радіатор системи опалення

Таблиця 2

Технічні параметри обладнання, що працюють у бівалентному режимі, для забезпечення необхідного теплопостачання неутепленої будівлі

Тип обладнання	Компанія-виробник	Модель	Рном., кВт	ККД котла, %	СОР теплового насоса	Об'єм бака-накопичувача, л
Тепловий насос типу «повітря – вода»	Waterkotte GmbH	EcoTouch Air Kaskade 5120.5	107,2	-	5,0	-
Котел, що працює на природному газі	Viessmann Werke GmbH & Co KG	Vitoradial 300-T	407,0	97	-	-
Бак-накопичувач (буферна ємність)	Viessmann Werke GmbH & Co KG	Vitocell 100-W	-	-	-	120

Щотижневі дані використання енергії протягом опалювального періоду при поетапному покращенні теплової оболонки будівлі від неутепленої до утепленої згідно з вимогами України [19] і Швеції [20] (дані

динамічного моделювання в DesignBuilder) і генерації теплової енергії неутепленої будівлі тепловим насосом (динамічне моделювання у GeoTSOL) подано на рис. 3.

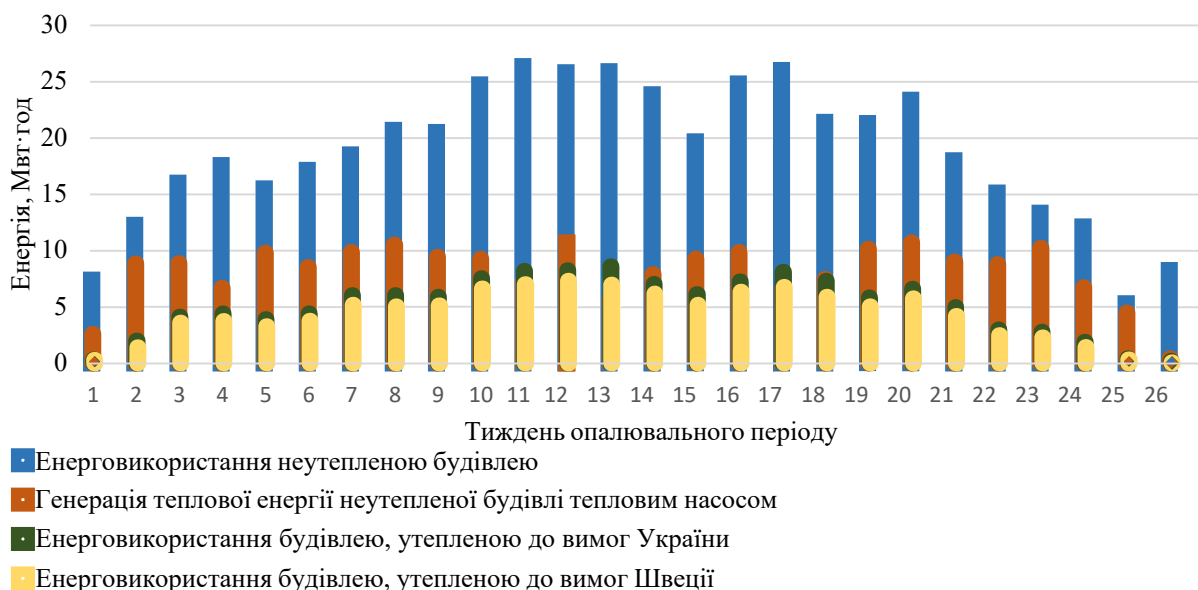


Рис. 3. Енерговикористання будівлею, що розглядається, за відсутності утеплення, при утепленні відповідно до вимог України і Швеції, а також генерація теплової енергії неутепленої будівлі тепловим насосом

Як видно з рис. 3, тепловий насос обраної потужності (табл. 2) генерує ліву частку необхідного енергозабезпечення неутепленої будівлі (43,36 %). Разом з тим графік ілюструє можливість використання теплового насоса як основного джерела енергії для утепленої відповідно до вимог України [19] і Швеції [20] будівлі. Для перевірки такого припущення динамічне моделювання енергозабезпечення утеплених будівель (за нормами України і Швеції) тепловим насосом у GeoTSOL розглянемо для моноенергетичного режиму. Умови моделювання для утепленої відповідно до

вимог України [19] і Швеції [20] будівлі щодо використання гарячої води незмінні (споживання гарячої води відвідувачами офісної будівлі забезпечене від інших джерел), місячна теплова потужність відповідає значенням необхідного енергозабезпечення для утепленої до вимог України і Швеції будівлі (отримано як результат моделювання утеплених будівель у DesignBuilder). Схема підключення теплового насоса при моноенергетичному режимі (моноенергетичний частково паралельний режим з використанням додаткового нагрівача) зображена на рис. 4.

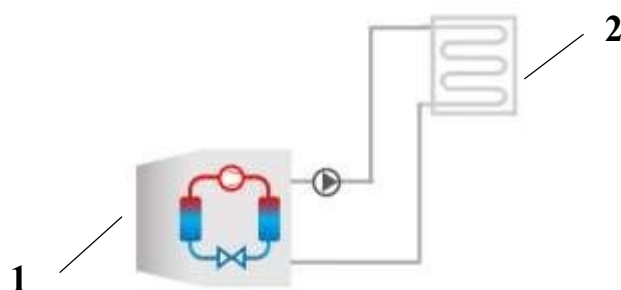


Рис. 4. Моноенергетичний режим роботи теплового насоса:  
1 – тепловий насос типу «повітря – вода»; 2 – радіатор системи опалення

Щотижневі дані генерації теплової енергії тепловим насосом протягом опалювального періоду при покращенні

теплової оболонки будівлі відповідно до вимог України [19] і Швеції [20] подані на рис. 5.

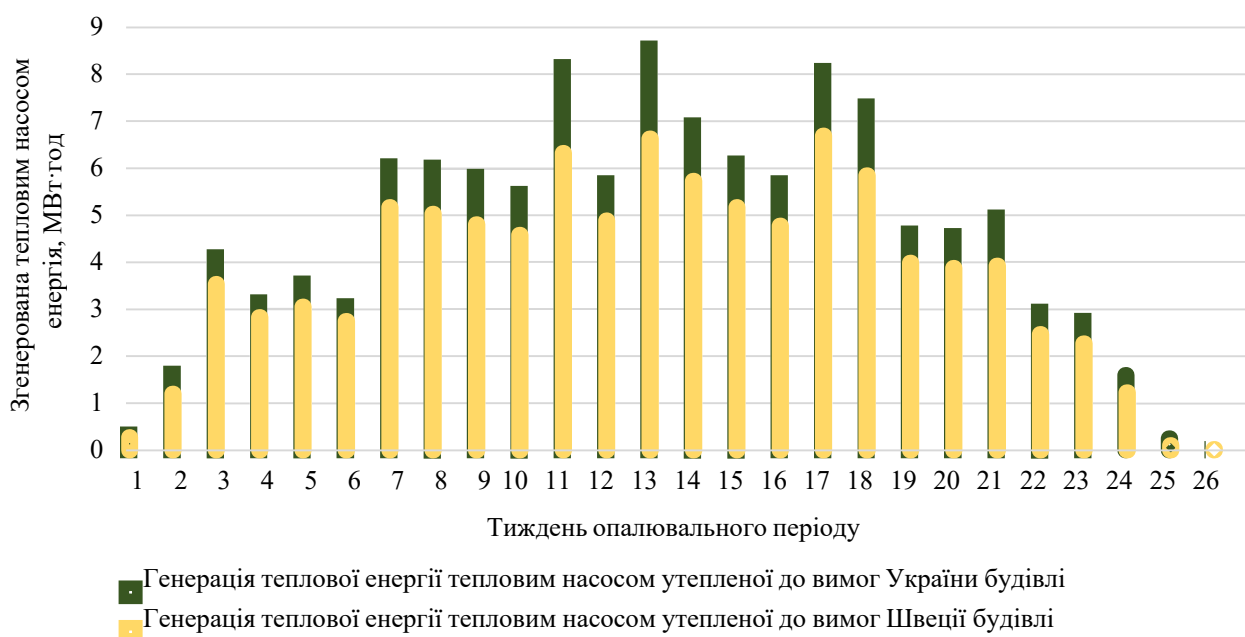


Рис. 5. Генерація теплової енергії тепловим насосом протягом опалювального періоду при покращенні теплової оболонки будівлі відповідно до вимог України і Швеції

Для забезпечення необхідного енерговикористання будівлею, утепленою відповідно до вимог України [19], тепловим насосом, що працює за умов моноенергетичного частково паралельного режиму з нагрівальним елементом, обрано тепловий насос компанії WATERKOTTE GmbH (модель EcoTouch Air Kaskade 5120.5 потужністю 107,2 кВт) і нагрівальний елемент потужністю 20 кВт. Генерація теплової енергії тепловим насосом і нагрівальним елементом при моноенергетичному режимі роботи в цьому випадку складає 117,31 МВт·год, причому нагрівальний елемент покриває сумарну генерацію теплової енергії на 10,6 %.

Необхідне енергозабезпечення будівлі, утепленої відповідно до вимог Швеції [20], покривається тепловим насосом моделі EcoTouch Air Kaskade 5120.5 (Waterkotte GmbH) потужністю 107,2 кВт і нагрівальним елементом потужністю 5 кВт. Разом з тим генерація теплової енергії тепловим насосом і нагрівальним елементом при моноенергетичному режимі роботи становить 97,3 МВт·год, нагрівальний елемент покриває сумарну генерацію теплової енергії на 1,3 %.

Динаміка споживання електроенергії, необхідної для забезпечення роботи системи з тепловим насосом для двох вищевказаних варіантів утеплення будівлі, зображена на рис. 6.



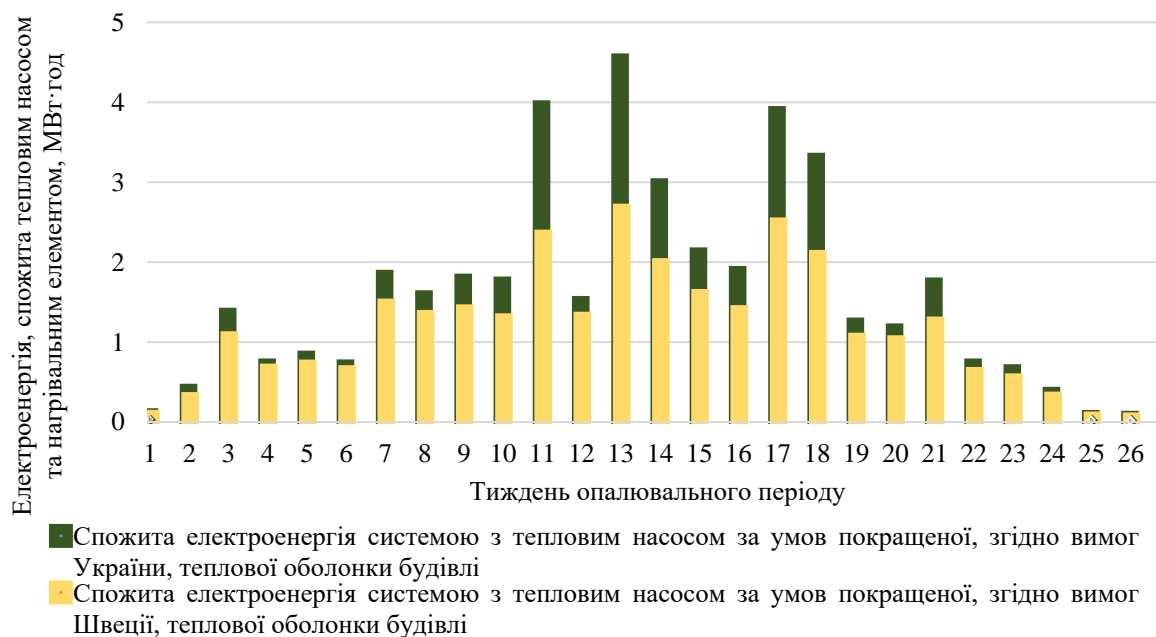


Рис. 6. Динаміка споживання електроенергії моноенергетичною системою теплового насоса і нагрівального елемента при покращеній відповідно до вимог України та Швеції теплової оболонці будівлі

Для оцінювання економічної привабливості модернізації громадської будівлі до рівня nZEB за роботою [11] проведено розрахунки інтегральної вартості витрат на опалення при покращенні теплової оболонки будівлі відповідно до

вимог [19, 20] і заміні джерела енергії з такого, що працює на природному газі, на таке, що є відновлювальним (тепловий насос типу «повітря – вода»). Розрахунок інтегральної вартості проводимо [23] за формулою

$$B = \sum_{t=0}^n \frac{B_t^{\text{експл}}}{(1+E)^t} + \sum_{t=0}^n B_t^{\text{енерг}} \cdot \frac{(1+l \cdot t)}{(1+E)^t} + I_0 + I_{\text{із}} + I_{\text{со}},$$

де  $B_t^{\text{енерг}}$  – річні витрати за спожиті енергоносії, грн;

$B_t^{\text{експл}}$  – інші витрати, грн;

$I_0$  – капітальні витрати на придбання теплогенерувального обладнання, грн;

$I_{\text{із}}$  – витрати, спрямовані на покращення теплового захисту будівлі, грн;

$I_{\text{со}}$  – витрати на придбання приладів опалення, грн;

$l$  – коефіцієнт, що враховує приріст цін на енергоносії;

$n$  – час, для якого визначаються інтегральні дисконтовані витрати, р.;

$E$  – ставка дисконтування.

Відповідно до наведеної формули проведено розрахунок основних статей витрат, що включають розрахунок вкладень для утеплення [18], придбання теплогене-

рувального обладнання, щорічних експлуатаційних витрат для забезпечення сталої та ефективної роботи систем, що розглядаються, і монтажних і пускорегулю-

вальних робіт (10 % вартості придбання теплогенерувального обладнання). У роботі, як згадано вище, заміну системи опалення не розглядаємо, у першому наближенні ставкою дисконтування та коефіцієнтом

приросту вартості на енергоносії нехтуємо. Для якісного оцінювання інтегральних витрат на опалення враховуємо витрати палива для кожного з варіантів порівняння і тарифи на енергоносії (табл. 3).

Таблиця 3

Капітальні витрати при модернізації будівлі

Заходи енергоефективності	Витрати палива, тис. м <sup>3</sup> /р., [кВт·год/р.]	Вен*, млн грн	Із, млн грн [18]	Іо, млн грн/джерело даних	В експл., млн грн
1	2	3	4	5	6
Існуюча неутеплена будівля	47,12	2,4	-	-	0,04
Неутеплена будівля, джерело енергії – тепловий насос і котел, що працює на природному газі (бівалентний режим роботи)	25,84, [72, 126]	1,41	-	2,67 / [24-26]	0,27
Будівля, утеплена відповідно до вимог України, джерело енергії – котел, що працює на природному газі	12,71	0,55	3,33	0,49 / [27]	0,05
Будівля, утеплена відповідно до вимог України, джерело енергії – тепловий насос і нагрівальний елемент (моноенергетичний режим роботи)	[41 153]	0,16	3,33	1,89 / [26, 28]	0,18
Будівля, утеплена відповідно до вимог Швеції, джерело енергії – котел, що працює на природному газі	8,04	0,35	5,07	0,22 / [29]	0,02
Будівля, утеплена відповідно до вимог Швеції, джерело енергії – тепловий насос і нагрівальний елемент (моноенергетичний режим роботи)	[28 514]	0,11	5,07	1,85 / [26, 28]	0,18

Примітка. \*Розраховано з урахуванням середньорічного тарифу 2022 року на природний газ [30] та електричну енергію (тариф за комерційною пропозицією вартості електроенергії) для юридичних осіб.

Зміну інтегральної вартості витрат на опалення будівлі при різних показниках утеплення та використаного джерела енергії

(табл. 3, стовпець 1) розглянемо для 40 років (рис. 7).

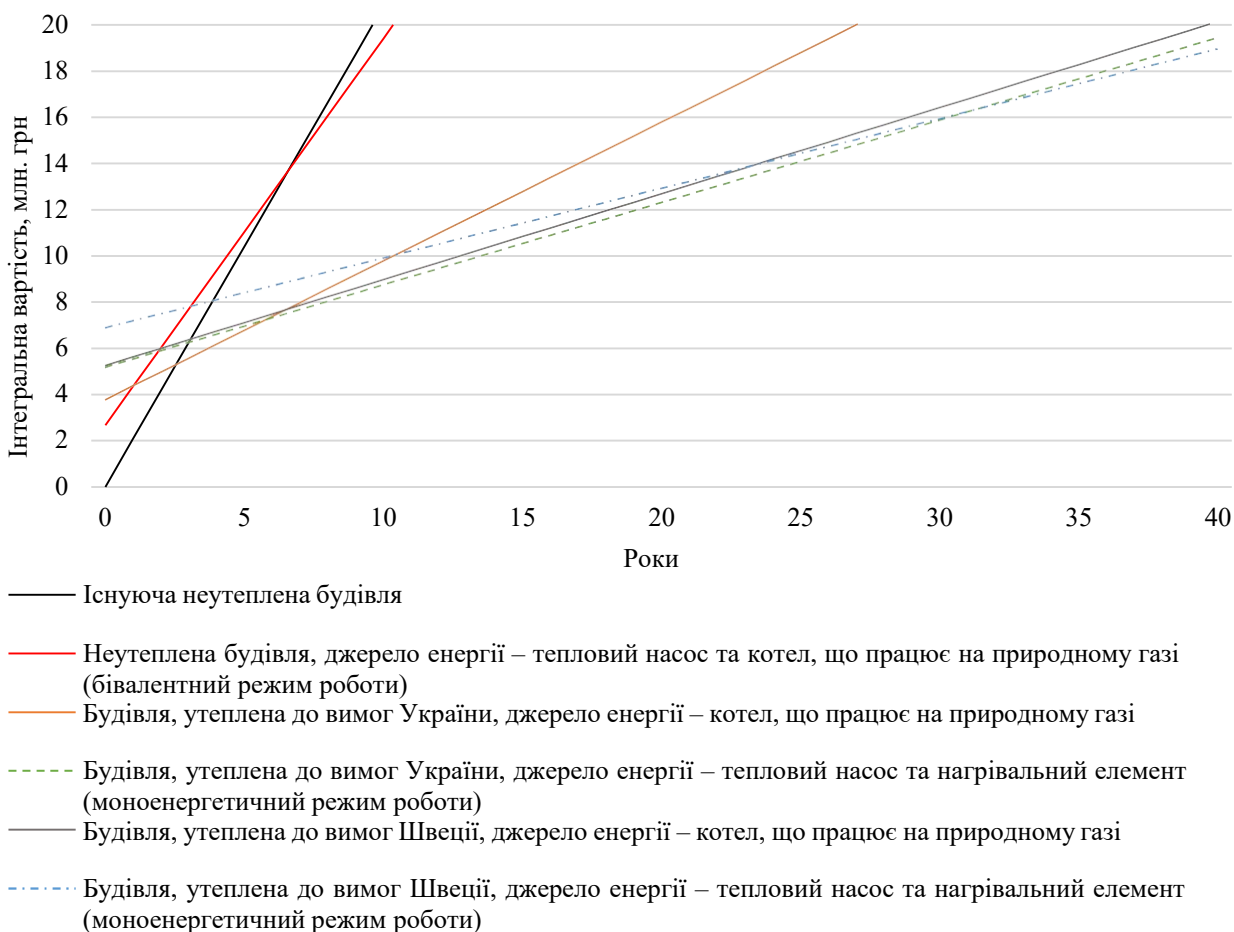


Рис. 7. Зміна інтегральних витрат на опалення будівлі при різних показниках утеплення та використаному джерелі енергії

З урахуванням витрат на енергоносії, вартості утеплення огорожувальних конструкцій будівлі та придбання теплогенерувального обладнання та динаміки інтегральних витрат на опалення будівлі (рис. 6) можемо зробити висновок про економічну привабливість модернізації системи енергозабезпечення неутепленої будівлі. Так, термін окупності заміни котла на природному газі на тепловий насос і газовий котел (бівалентний частково паралельний режим роботи) для неутепленої будівлі (фізико-технічні характеристики огорожувальних конструкцій відповідають даним табл. 1) становить близько семи років. З точки зору економічної доцільності, такий крок зменшення витрат викопного палива

розцінюється як прийнятний і привабливий, проте розглядати таку заміну джерела енергії будівлі в розрізі nZEB недоцільно – будівля не є високоенергоєфективною, а частка використаної з відновлювальних джерел енергії становить менше 50 % [11]. Разом з тим рис. 6 демонструє термін окупності системи теплозабезпечення утепленої відповідно до вимог України будівлі [19] з тепловим насосом (що працює в моноенергетичному частково паралельному режимі з нагрівальним елементом) при встановленні такої системи замість котла, що працює на природному газі. Так, за умови відповідності теплової оболонки будівлі вимогам законодавства [19] тепловий насос уже на шостий рік експлуатації виглядає більш привабливим

варіантом порівняно з котлом на природному газі. Дещо інша ситуація для випадку заміни джерела теплоти з котла на тепловий насос при покращеній відповідно до вимог Швеції [20] теплової оболонці будівлі. Як видно з рис. 6, термін окупності системи теплозабезпечення з тепловим насосом за умов утепленої відповідно до вимог Швеції будівлі [20] становить 23 роки. За роботою [31], життєвий цикл теплового насоса становить від 15 до 20 років. Це означає, що заміна котла на природному газі тепловим насосом при високому тепловому захисті будівлі (за вимогами Швеції) є мінімально доцільною при існуючих тарифах на енергоносії, вартості обладнання та експлуатації.

Загалом проєкт модернізації існуючої неутепленої будівлі, що використовує природний газ для теплозабезпечення, до рівня високоенергоєфективної будівлі, теплозабезпечення якої покривається за рахунок відновлювального джерела енергії (тепловий насос «повітря – вода») є досить привабливим при розглянутих тарифах на енергоносії. Так, при покращенні теплової оболонки будівлі відповідно до вимог України [19] і Швеції [20] і використанні теплового насоса для забезпечення необхідного енерговикористання споживання енергії будівлею можна вважати таким, що близьке до нуля. Власне, термін окупності реалізації вищеприписаної модернізації становить чотири та три роки відповідно для утеплення згідно з нормами України та Швеції.

**Висновки.** Розглянуто можливості теплозабезпечення відновлювальним джерелом енергії (тепловим насосом) з використанням динамічного моделювання в середовищі GeoTSOL для трьох варіантів утеплення офісної будівлі в місті Києві: неутеплена будівля, будівля, утеплення якої виконано за вимогами України [19], будівля, утеплення якої виконано за вимогами Швеції [20]. Енерговикористання будівлі для кожного з описаних варіантів є результатом динамічного моделювання у

програмі DesignBuilder та одним з ключових параметрів, що впливає на вибір системи з тепловим насосом. Так, урахувавши європейський досвід і напрацювання щодо nZEB, оцінено ефективність модернізації теплозабезпечення для різних режимів роботи системи з тепловим насосом при різних рівнях теплового захисту будівлі:

1) неутеплена будівля – бівалентний частково паралельний режим роботи теплового насоса типу «повітря – вода» і котла, що працює на природному газі. Термін окупності заміни існуючого котла на природному газі становить сім років;

2) утеплена за вимогами України [19] будівля – моноенергетичний частково паралельний режим роботи теплового насоса з додатковим нагрівачем. Термін окупності модернізації неутепленої будівлі з котлом на природному газі до енергоєфективної будівлі з тепловим насосом – чотири роки, маємо також суттєвий екологічний ефект. Термін окупності заміни джерела енергії з котла на природному газі на тепловий насос для вже покращеної відповідно до вимог України теплової оболонки будівлі – 5,8 року;

3) утеплена відповідно до вимог Швеції [20] будівля – моноенергетичний частково паралельний режим роботи теплового насоса з додатковим нагрівачем. Термін окупності модернізації неутепленої будівлі з котлом на природному газі до високоенергоєфективної будівлі з тепловим насосом – три роки, маємо також суттєвий екологічний ефект. Термін окупності заміни джерела енергії з котла на природному газі на тепловий насос уже покращеної відповідно до вимог Швеції теплової оболонки будівлі – 23 роки.

Отримані результати свідчать про привабливі можливості модернізації неенергоєфективної будівлі до рівня nZEB як з економічної, так і екологічної точки зору. Використання відновлювальних джерел енергії для забезпечення необхідного енергоспоживання при існуючій динаміці тарифів на енергоносії є

більш ніж реальним для юридичних та побутових споживачів. У подальших дослідженнях слід урахувати діючу в Україні ставку дисконтування та приріст цін на енергоносії з метою більш детального оцінювання інтегральних витрат на опалення при модернізації будівлі до рівня

такої, споживання енергії якою близьке до нуля, провести екологічне оцінювання розглянутих варіантів модернізації та проаналізувати шляхи забезпечення необхідного охолодження будівлі відновлювальними джерелами.

### Список використаних джерел

1. Енергоемність ВВП – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Енергоемність\\_ВВП#Світ](https://uk.wikipedia.org/wiki/Енергоемність_ВВП#Світ).
2. World Development Indicators-Google Public Data Explorer. *Wayback Machine*. URL: [https://web.archive.org/web/20160304205851/http://www.google.com.ua/publicdata/explore?ds=d5bncppjof8f9\\_&met\\_y=ny\\_gdp\\_mktp\\_cd&tdim=true&dl=en&hl=en&q=world+gdp](https://web.archive.org/web/20160304205851/http://www.google.com.ua/publicdata/explore?ds=d5bncppjof8f9_&met_y=ny_gdp_mktp_cd&tdim=true&dl=en&hl=en&q=world+gdp).
3. GDP; PPP (US dollar) in Ukraine. *Wayback Machine*. URL: <https://web.archive.org/web/20111018052033/http://tradingeconomics.com/ukraine/gdp-ppp-us-dollar-wb-data.html>.
4. Energy intensity of GDP | Global Energy Intensity Data | Enerdata. *World Energy Statistics | Enerdata*. URL: <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-energy-intensity-gdp-data.html>.
5. Buildings – Topics - IEA. *IEA*. URL: <https://www.iea.org/topics/buildings>.
6. Цілі сталого розвитку | United Nations Development Programme. *UNDP*. URL: <https://www.undp.org/uk/ukraine/tsili-staloho-rozvytku/affordable-and-clean-energy>.
7. Energy performance of buildings directive. [Online]. URL: [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en). [Accessed: 2018].
8. Directive 2012/27/EU. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC (Text with EEA relevance)Text with EEA relevance. Official edition. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:02012L0027-20210101>.
9. A European Green Deal. *European Commission*. URL: [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en).
10. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони : Угода між Україн. та Європ. Союзом про асоц. від 21.03.2014 р. № 984\_011. URL: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984\\_011/ed20140321#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011/ed20140321#Text)
11. Про затвердження Вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії : проект наказу Мінрегіону від 30.12.2020 р. URL: <https://www.minregion.gov.ua/base-law/grom-convers/elektronni-konsultatsiyi-z-gromadskisty/proekt-nakazu-minregionu-pro-zatverdzhennya-vymog-do-budivel-z-blyzkym-do-nulovogo-rivnem-spozhyvannya-energiyi/>
12. Про схвалення Концепції реалізації державної політики у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель у частині збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії та затвердження Національного плану збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.01.2020 р. № 88-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/88-2020-p#n11>.

13. Національний план збільшення кількості будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29.01.2020 р. № 88-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/88-2020-p#n172>.
14. Загальна сума збитків, завдана інфраструктурі України, складає понад \$127 млрд – звіт KSE Institute станом на вересень 2022 року. *Kyiv School of Economics*. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zagalna-suma-zbitkiv-zavdana-infrastrukturii-ukrayini-skladaye-ponad-127-mlrd-zvit-kse-institute-stanom-na-veresen-2022-roku/>.
15. 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, 2022.
16. What is renewable energy? *United Nations. Climate Action*. URL: <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy#:~:text=Renewable%20energy%20is%20energy%20derived,plentiful%20and%20all%20around%20us>.
17. Premiere in Romania: 'Elie Radu' Energy Technology High School Rehabilitated at NZEB Standard. *Energy Industry Review*. URL: <https://energyindustryreview.com/energy-efficiency/premiere-in-romania-elie-radu-energy-technology-high-school-rehabilitated-at-nzeb-standard/>.
18. Економічна оцінка підвищення теплового захисту громадських будівель до сучасних європейських вимог / В. Дешко та ін. *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. 2022. № 2. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.2.2022.261277>.
19. Ministerstvo rehional'noho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo – komunal'noho hospodarstva Ukrayiny, 2017. *DBN V.2.6-31:2016. Teplova izolyatsiya budivel'*. Kyiv.
20. Boverket. 2022. *Boverket's building regulations – mandatory provisions and general recommendations, BBR*. [online] URL: <https://www.boverket.se/en/start/publications/publications/2019/boverkets-building-regulations--mandatory-provisions-and-general-recommendations-bbr/>.
21. GeoT\*SOL | Calculation and simulation software for heat pump systems. *Valentin Software | Planungs- und Simulationsssoftware für erneuerbare Energien*. URL: <https://valentin-software.com/en/products/geotsol/>.
22. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. На заміну СНиП 2.01.01-82 ; чинний від 2011-11-01. Вид. офіц. Київ, 2011. 127 с. URL: [https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu\\_b\\_v\\_1\\_1\\_27\\_2010/5-1-0-929](https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_b_v_1_1_27_2010/5-1-0-929).
23. Буяк Н. Оцінювання ефективності енергетичної системи будівлі в умовах теплового комфорту : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.01. Київ, 2017. 214 с. URL: [https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/21401/1/diss\\_Buiak.pdf](https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/21401/1/diss_Buiak.pdf).
24. Конденсаційний котел Vaillant ecocraft exclusiv. *Modernsys. Сучасні інженерні системи*. URL: <https://modernsys.com.ua/uk/kondensatsionnyj-napolnyj-kotel-vaillant-ecocraft-exclusiv-vkk2806-3-e-ru.html>.
25. WINDHAGER ACK4000. *Original Hersteller Preislisten und Rabatte*. URL: <http://www.heizungs-discount.de/rabatt-portal/preisvergleich-windhager/windhager/windhager-speicher-und-behaelter/windhager-ack4000-psm4000-waermespeiche-ack4000.html>.
26. ООО Смарт Климат Групп. *Smart Climate*. URL: [https://smartclimate.com.ua/prod28766-geothermalnii\\_teplovoi\\_nasos\\_ecotouch\\_ds\\_50905dt.html](https://smartclimate.com.ua/prod28766-geothermalnii_teplovoi_nasos_ecotouch_ds_50905dt.html).
27. Газовый котел Viessmann Vitorond 200 125 кВт с Vitotronic 200. *Строительный магазин супермаркет Инстал Украина*. URL: <https://in-ua.com/products/viessmann-vitorond-200-125-kvt-s-vitotronic-200-s-gazovoj-gorelkoj-otdelnyj-segment>.
28. Нагрівальний тен для бойлера. *Modernsys. Сучасні інженерні системи*. URL: <https://modernsys.com.ua/uk/nagrevatelnyy-ten-dlya-boylera-drazice-tpk-210-12-3-6kw-10352-ru.html>.

29. Газовый котел Viessmann Vitorond 100 100 кВт. *Строительный магазин супермаркет Инстал Украина*. URL: <https://in-ua.com/products/viessmann-vitorond-100-100-kvt-s-vitotronic-200-s-gorelkoj-otdelnyj-segment>.

30. Тарифні плани. *Нафтогаз України. Газопостачальна компанія*. URL: <https://gas.ua/uk/business/tariffs>.

31. ДСТУ EN 15459-1:2017. Енергоефективність будівель. Процедура економічного оцінювання енергетичних систем будівлі. Частина 1. Процедури розрахунку. На заміну ДСТУ Б EN 15459:2014; чинний від 2018-07-01. Вид. офіц. 2017. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=76040](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=76040).

---

Дешко Валерій Іванович, доктор технічних наук, професор кафедри теплової та альтернативної енергетики, Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Інститут технічної теплофізики НАН України, ORCID iD: 0000-0002-8218-3933. Тел.: 044- 204- 82-50. E-mail: [te@kpi.ua](mailto:te@kpi.ua).

Наумчук Олена Сергіївна, аспірант кафедри теплової та альтернативної енергетики, Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ORCID iD: 0000-0002-7059-8867. Тел.: +38 (068) 959-96-84. E-mail: [lenanaumchuk13@gmail.com](mailto:lenanaumchuk13@gmail.com).

Deshko Valerii, Dr. of Tech. Sc., prof. of Department of Thermal and Alternative Energy of the Educational and Scientific Institute of Nuclear and Thermal Energy of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Institute of Technical Thermal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine, ORCID iD: 0000-0002-8218-3933. Tel. : 044-204-82-50. E-mail: [te@kpi.ua](mailto:te@kpi.ua).

Naumchuk Olena, Ph. D. student of Department of Thermal and Alternative Energy of the Educational and Scientific Institute of Nuclear and Thermal Energy of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ORCID iD: 0000-0002-7059-8867. Tel.: +38 (068) 959-96-84. E-mail: [lenanaumchuk13@gmail.com](mailto:lenanaumchuk13@gmail.com).

Статтю прийнято 16.05.2023 р.