МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра промислового та цивільного будівництва

Кваліфікаційна робота

рівень вищої освіти _____Магістр_____
(рівень вищої освіти)

на тему: «Аналіз інноваційних енергоефективних технологій в будівництві»

Виконав: студент 2 курсу, групи: 8.1923– пцб-1_
_____Артемчук Віктор Васильович_____
(прізвище та ініціал)

спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія_
(код і назва спеціальності)

освітньої програми промислове і цивільне будівництво

Керівник професор, д.е.н. Анін В.І._
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент _____.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя – 2024 рік

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра ____Промислового та цивільного будівництва_____
Рівень вищої освіти _____магістерський _____
Спеціальність _____192 «Будівництво та цивільна інженерія»_____
(код таі назва)
Освітня програма ___«Промислове і цивільне будівництво» __
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри_____
«_____»_____20____року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

АРТЕМЧУК ВІКТОР ВАСИЛЬОВИЧ
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Аналіз інноваційних енергоефективних технологій у будівництві _____
керівник роботи _____Анін Віктор Іванович, д.е.н., проф._____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «____»_____20___року №_____

2 Строк подання студентом роботи _____

3 Вихідні дані до роботи нормативно-технічна документація, сучасні дослідження у сфері енергоефективності, дані про новітні технології та матеріали для зменшення енергоспоживання у будівлях _____

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Аналіз сучасних підходів до забезпечення енергоефективності у будівництві. 2. Дослідження новітніх матеріалів і технологій для підвищення енергозбереження. 3. Розробка рекомендацій щодо впровадження інноваційних рішень у будівництво на прикладі України. _____

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) _____8 листів _____

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	за пр
Розділ 1	Анін В.І.		
Розділ 2	Анін В.І.		
Розділ 3	Анін В.І.		

7 Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	
1	Сучасний стан та проблеми енергоефективності в будівництві	з 01.09.2024 по 30.09.2024	
2	Аналіз технологічних рішень для підвищення енергоефективності будівель	з 01.10.2024 по 30.12.2024	
3	Перспективи розвитку енергоефективного будівництва в Україні	з 01.11.2024 по 31.11.2024	

Студент _____ В.В. Артемчук
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) _____ В.І. Анін
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ Данкевич Н.О.
(підпис) (ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Артемчук Віктор Васильович. Аналіз інноваційних енергоефективних технологій в будівництві.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія, науковий керівник д.е.н., проф. Анін В.І. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні Запорізького національного університету, кафедра промислового та цивільного будівництва, 2024.

У роботі проаналізовано інноваційні енергоефективні технології в будівництві та сталому розвитку будівельної галузі. В представленій роботі проведено аналіз поточного стану енергоефективності в будівництві, існуючих технологій та перспективи їх впровадження в Україні. У першому розділі здійснено літературний огляд основних принципів енергоефективності та факторів, які впливають на її рівень, включаючи законодавче регулювання. Другий розділ присвячено аналізу технологій, таких як використання відновлюваних джерел енергії, сучасних теплоізоляційних матеріалів, енергоефективних систем HVAC та автоматизованих рішень для управління енергоспоживанням. У третьому розділі розглядаються перспективні напрями розвитку галузі в Україні, враховуючи сучасні виклики, зокрема необхідність відновлення зруйнованої інфраструктури. Особливу увагу приділено концепції будівель із майже нульовим споживанням енергії (NZEB) та інтеграції новітніх технологій у контексті післявоєнної відбудови.

Ключові слова: енергоефективність, будівництво, відновлювані джерела енергії, теплоізоляційні матеріали, інноваційні технології, енергозбереження, будівельна галузь

Список публікацій магістранта:

1. Artemchuk V.V., Krol O.V., Umnov P.V., Kuznetsov R.P. Energy management: key aspects and impact on sustainable development. *Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України:*

матеріали ІІІ Всеукраїнської наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 17-20 жовтня 2023 р. С. 27

2. Artemchuk V.V., Klymchuk D.V., Prokopenko D.V., Skliar V.I. Energy management and smart grids: navigating the future of electrical infrastructure. *Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України:* матеріали ІІІ Всеукраїнської наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 17-20 жовтня 2023 р. С. 29

3. Artemchuk V.V., Myliy O.V., Bandurenko I.I., Berezin O.O. Energy management in the educational process: theory and practice. *Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України:* матеріали ІІІ Всеукраїнської наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 17-20 жовтня 2023 р. С. 25

ABSTRACT

Artemchuk Viktor. Analysis of Innovative Energy-Efficient Technologies in Construction.

Master's Degree Thesis for obtaining the qualification of higher education in the field of specialty 192 – Construction and Civil Engineering. Scientific advisor: Doctor of Economics, Prof. Anin V.I. Engineering Educational and Research Institute named after Yu.M. Potebnya, Zaporizhzhia National University, Department of Industrial and Civil Construction, 2024.

This thesis analyzes innovative energy-efficient technologies in construction and the sustainable development of the construction industry. The study evaluates the current state of energy efficiency in construction, existing technologies, and prospects for their implementation in Ukraine. The first chapter provides a literature review of the main principles of energy efficiency and the factors influencing its level, including legislative regulations. The second chapter is devoted to the analysis of technologies such as the use of renewable energy sources, modern thermal insulation materials, energy-efficient HVAC systems, and automated energy management solutions. The third chapter explores promising directions for the development of the construction sector in Ukraine, taking into account contemporary challenges, particularly the need for the restoration of damaged infrastructure. Special attention is paid to the concept of nearly zero-energy buildings (NZEB) and the integration of advanced technologies in the context of post-war reconstruction.

Keywords: energy efficiency, construction, renewable energy sources, thermal insulation materials, innovative technologies, energy saving, construction industry.

List of publications of the master's student:

1. Artemchuk V.V., Krol O.V., Umnov P.V., Kuznetsov R.P. Energy management: key aspects and impact on sustainable development. *Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України:*

матеріали ІІІ Всеукраїнської наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 17-20 жовтня 2023 р. С. 27

2. Artemchuk V.V., Klymchuk D.V., Prokopenko D.V., Skliar V.I. Energy management and smart grids: navigating the future of electrical infrastructure. *Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України:* матеріали ІІІ Всеукраїнської наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 17-20 жовтня 2023 р. С. 29

3. Artemchuk V.V., Myliy O.V., Bandurenko I.I., Berezin O.O. Energy management in the educational process: theory and practice. *Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України:* матеріали ІІІ Всеукраїнської наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 17-20 жовтня 2023 р. С. 25

ЗМІСТ

ВСТУП 9
1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В БУДІВНИЦТВІ 14
1.1 Основні принципи енергоефективності у будівництві 14
1.2 Фактори, що впливають на енергоефективність будівель 24
1.3 Законодавче регулювання енергоефективності у будівельній галузі 27
2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ 36
2.1 Матеріали, що використовують для енергозбереження 36
2.2 Використання відновлюваних джерел енергії в будівництві 51
2.3 Перспективи розвитку систем опалення 69
3 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО БУДІВНИЦТВА В УКРАЇНІ 79
3.1 Стан та виклики для енергоефективного будівництва в Україні 79
3.2 Перспективні напрямки розвитку енергоефективних технологій для будівельної галузі 83
3.3 Енергоменеджмент в контексті сталого розвитку енергоефективного будівництва 91
ВИСНОВКИ 98
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 100

Вступ

Актуальність теми. Протягом всієї історії людства будівництво було яскравим показником розвитку соціальних груп. Виконуючи на початку захисні функції з часом будівництво стало мистецтвом, а історичні епохи характеризуються різноманітними архітектурними стилями. Наявність житла є однією з базових потреб для людини і зараз окрім безпекових функцій багато й інших, а вираз « Мій дім – моя фортеця» є загальновідомим серед багатьох народів світу. Археологи, знаходячи місця стародавніх поселень, намагаються визначити характер будов і спосіб їх будівництва. Також наявність, наприклад, середньовічних будов в різних країнах є предметом гордості та місцем, що приваблює туристів.

Безумовно, не менш важливим є поява і розвиток різноманітних будівель нежитлового фонду, тобто промислових, службових, обслуговуючих об’єктів і т.д. Цілком природньо, що люди хочуть мати зручні і затишні умови для життя, роботи, навчання, лікування, обслуговування і т.п. Зростаючі потреби і науково-технічний прогрес породжували розробку нових будівельних матеріалів, технологій, організації будівництва, розвитку проектування та логістики.

Більш того, будівельну галузь можна справедливо назвати показником розвитку економіки, що можна пояснити декількома ключовими факторами, такими як інвестиційна активність, трудова зайнятість, покращення умов життя людей, розвиток суміжних галузей.

Розглянемо коротко деякі фактори. Будівництво відображає рівень інвестиційної привабливості в країні: зростання кількості будівельних проєктів, особливо інфраструктурних (дороги, мости, промислові об'єкти), свідчить про високий рівень економічного розвитку та довіру до ринку.

Будівельна галузь забезпечує значну кількість робочих місць у різних секторах, від кваліфікованих інженерів до працівників фізичної праці. Рівень зайнятості в будівництві часто відображає загальний стан ринку праці.

Будівництво впливає на суміжні галузі, такі як виробництво будівельних матеріалів, транспорт, енергетика тощо. Тобто активність у будівельному секторі породжує попит на продукцію інших секторів економіки.

Розвиток інфраструктурних проєктів сприяє не тільки залученню інвестицій, але і підвищенню продуктивності та економічній інтеграції регіонів. А це створює основу для довгострокового економічного зростання.

Будівництво житлової нерухомості часто корелює з рівнем доходів громадян та рівнем їх добробуту. Зростання житлового будівництва свідчить про стабільність доходів і купівельної спроможності населення. Але тут треба бути обережним в оцінках, оскільки досвід деяких країн показує, що штучна підтримка і помилки у прийнятті управлінських рішень можуть привести до значних проблем в економіці в цілому. Інакше кажучи, пропозиції на ринку нерухомості мають бути у балансі з попитом і підкріплятися реальними доходами населення. Сказане про чутливість будівельної галузі до економічних циклів підтверджується активізацію будівництва у періоди підйому економіки і спадом у кризові часи, коли може відбуватися замороження будівництва. До речі, така чутливість будівельної галузі до економічних коливань є її слабкою стороною.

У той же час, будівельна галузь стає компіляцією багатьох досягнень науки і технологій. І дійсно, сучасний світ перебуває у стані глобальних змін, серед яких дедалі важливішу роль відіграють питання раціонального використання енергії та зменшення впливу людської діяльності на довкілля. У цьому контексті будівельна галузь, яка є одним із потужних споживачів енергоресурсів, зазнає трансформацій у бік впровадження інноваційних енергоефективних технологій. Ці зміни зумовлені більш жорсткими екологічними та енергетичними нормами та намаганнями забудовників бути більш конкурентноздатними.

Енергоефективне будівництво охоплює широкий спектр технологій, що спрямовані на зниження споживання енергії, підвищення ефективності використання природних ресурсів і мінімізацію екологічного впливу будівель.

Це передбачає, наприклад, впровадження новітніх матеріалів із покращеними теплоізоляційними властивостями, систем автоматизованого управління енергоспоживанням, використання відновлюваних джерел енергії, а також інтеграцію розумних технологій у будівельну інфраструктуру.

Тому, можна стверджувати, що розглядувана тема є актуальною для України, де значна частина наявного будівельного фонду не відповідає сучасним стандартам енергоспоживання, а енергетична залежність від викопних джерел становить виклик як з економічної, так і з екологічної точки зору. Крім того, будівельна та енергетична галузі в Україні зараз набули особливого значення через військову агресію росії проти України. Абсолютно очевидним фактом є терористичний і геноцидний характер війни, яку проти нашої країни веде росія. Країна-терорист, рф, веде цілеспрямований масований обстріл нашої території ракетами та дронами, руйнуючи житлові будинки, дитячі садочки, школи, лікарні, музеї, заклади вищої освіти, що цілком підтверджує ствердження про терористично-геноцидний характер російської військової агресії. Так, станом на кінець липня 2024 р. росія вже пошкодила та знищила понад 215 000 об’єктів, серед яких понад 143 000 приватних та 23000 багатоквартирних будинків [1], а за словами прем'єр-міністра України Д. Шмигаля, кількість пошкоджених та зруйнованих об’єктів сягнула відмітки 250 тис., серед яких приблизно 4 тис. шкіл і понад тисячу лікарень. За оцінкою Світового банку, станом на лютий 2024 р. на відбудову зруйнованих об’єктів потрібно буде майже 500 млрд. дол. Враховуючи високу інтенсивність бойових дій і масштаби ракетних, бомбових і дронових ударів по нашій території з боку росії, зазначені дані збільшуються майже кожного дня. Тому остаточних підрахунок таких об’єктів буде підрахований вже після нашої перемоги.

У той же час Міністерство розвитку громад та територій України разом із іншими міністерствами та світовими організаціями шукають рішення для відновлення і відбудови тисяч об’єктів [2]. Причому, за оцінкою спеціалістів, чимало пошкоджених об’єктів прийдеться зносити і будувати нові.

Враховуючи необхідність масової відбудови, вже зараз проводяться робочі дискусії щодо майбутніх забудов [3]. У цих обговореннях приймають участь фахівці різного профілю, представники міністерств, науковці, представники міжнародних організацій. Примітним і дуже позитивним трендом в Україні є прийняття вимог до будівель, відомим як будівля з енергоспоживанням близьким до нуля NZEB (Nearly-zero energy buildings). Врахування при будівництві нових вимог дозволить нашій країні підвищити енергетичну незалежність, покращити екологічні показники та залучити іноземні інвестиції.

Метою дослідження є виявлення перспективних енергоефективних технологій, оцінка їхнього впливу на будівельну галузь та визначення шляхів їх впровадження в Україні.

Задачі досліджень:

- проаналізувати поточний стан енергоефективності у будівництві;
- дослідити основні фактори, що впливають на енергоефективність будівель;
- зробити огляд сучасних технологій та матеріалів;
- дослідити можливості інтеграції відновлюваних джерел енергії у будівельну галузь.

Об’єкт дослідження – будівельна галузь України в контексті впровадження енергоефективних технологій.

Предмет дослідження – інноваційні енергоефективні технології, матеріали та підходи, спрямовані на підвищення енергетичної ефективності будівель.

Наукова новизна:

- в результаті проведеного комплексного аналізу сучасних енергоефективних технологій та їхнього застосування у будівництві визначено перспективи адаптації концепції NZEB для умов України, зокрема у контексті післявоєнного відновлення.

- Запропоновано підходи до інтеграції інноваційних рішень, таких як автоматизовані системи управління енергоспоживанням, використання відновлюваних джерел енергії та енергоефективних матеріалів.

Методи проведення дослідження. У ході дослідження використовувались методи порівняльного аналізу, синтезу інформації з наукових джерел, системний підхід для визначення взаємозв'язків між різними аспектами енергоефективності, спостереження.

Теоретична значимість: визначено теоретичні засади щодо впровадження енергоефективних технологій у будівництві, визначено особливості застосування концепції NZEB в Україні.

Практична значимість: Розроблено рекомендації для впровадження інноваційних рішень та надано рекомендації щодо використання енергоефективних технологій у післявоєнному відновленні інфраструктури України. Запропоновано підходи для зниження енергоспоживання та зменшення екологічного впливу будівель.

Структура і об'єм магістерської роботи. Магістерська робота складається з вступу, трьох розділів, виводів та списку використаних джерел. Повний об'єм магістерської роботи складає 105 сторінок тексту, у тому числі 29 рисунків, 8 таблиць. Список використаних джерел містить 46 найменувань.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В БУДІВНИЦТВІ

1.1. Основні принципи енергоефективності у будівництві

Для розгляду подальшого матеріалу представленої роботи необхідно дати декілька визначень.

Узагальнюючи існуючі знання про енергоефективність у будівництві можна дати таке визначення. Енергоефективність у будівництві – це комплекс заходів, технологій і принципів, спрямованих на зниження споживання енергії будівлями при збереженні або покращенні рівня комфорту для користувачів та включає оптимальне використання енергоресурсів під час проектування, будівництва, експлуатації та утилізації будівель.

До ключових аспектів енергоефективності можна віднести раціональне використання енергії, впровадження інноваційних технологій, зниження впливу на довкілля (зменшення викидів парникових газів та споживання викопних енергоресурсів).

Тобто енергоефективність у будівництві розглядається як складова концепції сталого розвитку, що охоплює екологічні, економічні та соціальні, а зараз і безпекові аспекти.

До основних принципів енергоефективності у будівництві можна віднести такі, як оптимізація енергоспоживання будівлі, теплоізоляція, пасивний дизайн, енергоефективні системи опалення, вентиляції та кондиціонування (HVAC), використання відновлюваних джерел енергії, розумні технології управління енергоспоживанням, життєвий цикл будівлі.

Оптимізація енергоспоживання будівлі передбачає раціональне використання енергоресурсів у процесі будівництва та експлуатації будівлі. Використання сучасних матеріалів для ізоляції стін, даху та підлоги, які мінімізують втрати тепла взимку та зменшують нагрівання приміщень влітку є одним із важливих аспектів енергозбереження.

Пасивний дизайн означає такі архітектурні рішення, які спрямовані на максимальне використання природних джерел енергії, таких як сонячне світло та природна вентиляція.

До енергоефективних систем опалення, вентиляції та кондиціонування (HVAC) відносять системи з низьким енергоспоживанням, таких як теплові насоси, рекуператори, а також їх інтеграція в будівельну інфраструктуру.

Використання відновлюваних джерел енергії є дуже перспективним напрямком для підвищення енергоефективності будівель. Інтеграція в будівлі сонячних панелей, вітрогенераторів, геотермальних систем для забезпечення власних енергетичних потреб дозволяє значно економити викопні ресурси.

Розумні технології управління енергоспоживанням (системи автоматизації та IoT (Інтернет речей)) застосовують для оптимального керування освітленням, опаленням та кондиціонуванням залежно від потреб користувачів.

Перераховане збігається з прийнятими вимогами до будівель із близьким до нульового рівня споживання енергії (Nearly-zero energy buildings, NZEB), які закріплені європейською Директивою про енергетичні характеристики будівель EU/31/201 та передбачають високий рівень енергоефективності та низьке енергоспоживання будівель, а також використання значної частки відновлених джерел енергії (ВДЕ).

В Україні зараз активно розробляються механізми реалізації цих вимог, а також методологія визначення їх показників [4]:

- клас енергоефективності;
- показник споживання первинної енергії;
- частка енергії, виробленої з ВДЕ;
- теплотехнічні характеристики огороджувальних конструкцій та теплопровідних включень;
- герметичність оболонки будівлі;
- наявність сонячних теплових або електричних панелей, сонцезахисних пристроїв, систем вентиляції з рекуперацією тепла;

- ефективність управління інженерними системами тощо.

До речі, 12.03.24 р. парламент ЄС затвердив нову редакцію Директиви про енергетичну ефективність будівель [5]. Ця Директива є ключовим документом, який визначає екологічні стандарти для будівель в країнах Європейського союзу і спрямований на виконання цілей Європейського кліматичного закону, Зеленого курсу та пакету «Fit for 55», метою якого є скорочення викидів парникових газів на 55% до 2030 року порівняно з рівнем 1990 року. Директива окреслює стратегію реконструкції будівельного фонду ЄС із метою досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року.

Основні нововведення документа зосереджуються на прискоренні реконструкції будівель із низькими показниками енергоефективності. Держави-члени ЄС повинні до 2030 року зменшити споживання первинної енергії житловими будівлями на 16 %, а до 2035 року – на 20…22 %. Значна частина цього скорочення має бути забезпечена через оновлення найменш ефективних житлових будівель. Кожна країна самостійно визначає, які будівлі підлягають реконструкції, а також способи її здійснення. Для нежитлових будівель встановлено мінімальні стандарти енергоефективності, які передбачають реконструкцію 16 % таких об’єктів до 2030 року та 26 % до 2033 року. Певні категорії будівель, як-от історичні споруди або дачі, звільнені від цих вимог.

Нові будівлі мають відповідати стандарту нульових викидів вуглецю, який набуде чинності з 2028 року для державних будівель і з 2030 року для всіх інших. Планується повна відмова від систем опалення та охолодження на викопному паливі до 2040 року. Крім того, нові будівлі повинні бути пристосовані для встановлення сонячних панелей без значних додаткових витрат.

Важливим нововведенням стало врахування викидів вуглецю протягом усього життєвого циклу будівель (Whole Life Carbon, WLC). Для цього застосовуватиметься показник Потенціал глобального потепління впродовж життєвого циклу (GWP), що розраховуватиметься для нових будівель площею

понад 1000 м² з 2028 року, а з 2030 року – для всіх нових споруд. Країни ЄС до 2027 року мають подати дорожні карти впровадження цих стандартів, враховуючи кліматичні зони та типи будівель [5].

В Україні 29.12.23 року була затверджена стратегія термомодернізації будівель, яка направлена на поетапну реалізацію заходів із підвищення енергоефективності [3]. Зокрема, з 2025 року планується щорічно модернізувати 1% існуючих будівель, а також будувати понад 100 нових об'єктів за стандартами NZEB (будівлі з майже нульовим споживанням енергії). Починаючи з 2030 року, планується збільшити темпи термомодернізації до 3 % на рік та повністю перейти на нове будівництво за стандартом NZEB. До 2050 року Україна планує досягти декарбонізації всього будівельного фонду.

Для реалізації цих завдань, як вже зазначалося вище, наразі розробляється Державна цільова програма термомодернізації будівель. Державна підтримка проєктів з енергоефективності та відновлюваної енергетики забезпечується через кілька основних програм:

- Програма «ГрінДІМ» від Фонду енергоефективності. Ця програма компенсує до 70 % витрат, включно з компенсацією до 3 млн грн на встановлення теплових насосів та сонячних електростанцій для ОСББ і ЖБК;
- Урядова програма для приватних домогосподарств. За даною програмою можна отримати кредити під 0 % на термін до 10 років для придбання обладнання, що генерує електроенергію з альтернативних джерел;
- Кредитна програма «5-7-9». Програма направлена на фінансування придбання сонячних панелей, інверторів, накопичувачів енергії та супутнього обладнання для ОСББ, ЖБК та підприємств.

Окрім цього, для стимулювання розвитку відновлюваної енергетики було запроваджено пільги, які передбачають звільнення від мита та ПДВ на обладнання, пов'язане із сонячною та вітровою енергетикою [3].

Додамо ще деякі поняття, які стосуються енергоефективності будівель на підставі Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» [6].

Будівля з близьким до нульового рівнем споживання енергії – будівля з рівнем енергетичної ефективності, що перевищує встановлені мінімальні вимоги, в якій для формування належних умов проживання та/або життєдіяльності людей використовується енергія переважно з відновлюваних джерел [6].

Економічно доцільний рівень – рівень енергетичної ефективності будівлі, за якого досягаються найнижчі витрати (у тому числі експлуатаційні та ліквідаційні витрати) протягом нормативних строків експлуатації будівлі (огороджувальних конструкцій, інженерних систем) з урахуванням вкладених інвестицій та доходу від генерації енергії (за технічної можливості інженерної системи) [6].

Енергетична ефективність будівлі – властивість будівлі, що характеризується кількістю енергії, необхідної для створення належних умов проживання та/або життєдіяльності людей у такій будівлі [6].

Енергозбереження – використання меншого обсягу енергії для надання послуги або продукту [6].

Енергетичний сертифікат – електронний документ встановленої форми, в якому зазначено показники та клас енергетичної ефективності будівлі, наведено сформовані у встановленому законодавством порядку рекомендації щодо його підвищення, а також інші відомості щодо будівлі, її відокремлених частин, енергетичну ефективність яких сертифіковано [6].

Заходи із забезпечення (підвищення рівня) енергетичної ефективності будівель – будівельні роботи, результатом виконання яких є підвищення теплотехнічних показників огороджувальних конструкцій будівель та/або показників споживання енергетичних ресурсів інженерними системами [6].

Звіт про результати обстеження інженерних систем – документ установленої форми, в якому визначено показники енергетичної ефективності інженерних систем будівлі, житлового або нежитлового приміщення,

рекомендації щодо їх підвищення (за необхідності), а також інші відомості про інженерні системи будівлі, житлових або нежитлових приміщень, енергетичну ефективність яких обстежено [6].

Клас енергетичної ефективності будівлі – розрахунковий рівень енергетичної ефективності будівлі або її відокремлених частин, визначений за інтервалом значень показників енергетичної ефективності, що встановлюються відповідно до вимог законодавства з урахуванням гармонізованих стандартів Європейського Союзу у сфері енергетичної ефективності будівель [6].

Мінімальні вимоги до енергетичної ефективності – сукупність вимог до огороджувальних конструкцій будівлі, інженерних систем та їх елементів (у тому числі обладнання), результатом дотримання яких є забезпечення належних умов проживання та/або життєдіяльності людей у такій будівлі протягом нормативного строку експлуатації будівлі при нормативно допустимому рівні витрат енергії [6].

Сертифікація енергетичної ефективності – вид енергетичного аудиту, під час якого здійснюється аналіз інформації щодо фактичних або проектних характеристик огороджувальних конструкцій та інженерних систем, оцінюється відповідність розрахункового рівня енергетичної ефективності встановленим мінімальним вимогам до енергетичної ефективності будівель та надаються рекомендації щодо підвищення рівня енергетичної ефективності будівель, що враховують місцеві кліматичні умови, є технічно та економічно обґрунтованими [6].

Термомодернізація будівель – комплекс робіт, спрямованих на підвищення теплотехнічних показників огороджувальних конструкцій будівель, показників споживання енергетичних ресурсів інженерними системами та забезпечення енергетичної ефективності будівель на рівні не нижчому, ніж встановлено мінімальними вимогами щодо енергетичної ефективності будівель, що здійснюється під час виконання робіт з реконструкції, капітального чи поточного ремонту будівель або робіт, які не

потребують документів, що дають право на їх виконання, та після закінчення яких об’єкт не підлягає прийняттю в експлуатацію [6].

Згідно із зазначеного закону енергетична ефективність будівель визначається за методикою, яка враховує законодавчі акти Європейського Союзу, положення Енергетичного Співтовариства та гармонізовані європейські стандарти у сфері енергетичної ефективності. Затвердження цієї методики здійснюється центральним органом виконавчої влади, відповідальним за державну політику в будівельній сфері.

Методика для оцінки енергоефективності встановлює стандартизовані підходи, враховуючи такі параметри, як теплові втрати, споживання енергії системами опалення, охолодження, вентиляції, освітлення тощо. Для проведення розрахунків дозволено використовувати спеціалізовані програми, які відповідають вимогам методики. Усі елементи такого програмного забезпечення повинні бути гармонізовані з методикою, а їх застосування регулюється відповідними нормативними документами. Центральний орган виконавчої влади затверджує як методику, так і правила використання програмного забезпечення, забезпечуючи узгодженість розрахунків у національному масштабі.

При цьому до основних параметрів, що враховуються під час визначення енергетичної ефективності будівель, входять [6]:

- технічні характеристики інженерних систем (враховуються характеристики систем опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та енергозабезпечення, які визначають рівень енергоспоживання будівлі);
- функціональне призначення та архітектурно-планувальні рішення (враховується призначення будівлі (житлова, громадська, промислова тощо), її планування та конструктивні рішення, які визначають енергоефективність об’єкта;

- місцеві кліматичні умови (аналіз погодних умов регіону, зокрема температурного режиму, рівня сонячного освітлення, вітрових характеристик тощо);
- геометричні та теплотехнічні характеристики. Особлива увага приділяється геометрії будівлі, включаючи площу та орієнтацію огороджувальних конструкцій; теплотехнічним параметрам (теплопровідність, теплоізоляція); енергетичному балансу (співвідношення споживання і генерації енергії);
- інтеграція технологій, використання ВДЕ, пасивних сонячних систем (наприклад, теплових колекторів), систем захисту від сонця, когенераційних установок (спільне виробництво тепла й електроенергії);
- нормативні санітарно-гігієнічні та мікрокліматичні умови (забезпечення комфортного рівня температури, вологості, чистоти повітря та освітлення відповідно до нормативів);
- строк експлуатації огороджувальних конструкцій і систем (довговічність конструктивних елементів, обладнання та інженерних систем будівлі, які впливають на тривалість ефективного функціонування).

Зауважимо, що екологічна складова життєдіяльності людей стає все більш важливою через загрозливі зміни клімату. Тому у цивілізованому світі роблять оцінку вуглецевого сліду будівель (Carbon Footprint), що є ключовим елементом сучасного підходу до енергоефективності та сталого розвитку. Вона дозволяє аналізувати і кількісно оцінювати викиди парникових газів, пов'язані з будівлею протягом усього її життєвого циклу. Цей підхід забезпечує більш комплексний погляд на екологічний вплив будівель та сприяє прийняттю певних рішень для його мінімізації.

Вуглецевий слід будівлі охоплює сукупність викидів вуглекислого газу (CO_2) та інших парникових газів (ПГ), пов’язаних із будівництвом, експлуатацією, реконструкцією та демонтажем об’єкта. Вуглецевий слід

поділяють на втілений, експлуатаційний та утилізвційний вуглець. Втілений вуглець (Embodied Carbon) пов’язаний з виробництвом, транспортуванням і монтажем будівельних матеріалів, а експлуатаційний вуглець (Operational Carbon) – з викидами, які виникають під час експлуатації будівлі (споживання енергії для опалення, охолодження, освітлення тощо). Вуглецевий слід на етапі утилізації пов’язаний з викидами, які виникають під час демонтажу будівлі, утилізації матеріалів або їх вторинної переробки.

Основний внесок у викиди CO_2 на етапі будівництва дають цемент, сталь, алюміній та інші матеріали, виробництво яких є енергоємним. Наприклад, на виробництво цементу припадає близько 7 % глобальних викидів CO_2.

Основними джерелами викидів на етапі експлуатації є використання енергії для опалення, охолодження, освітлення та інших систем. Термін експлуатації будівлі зазвичай найбільше впливає на загальний вуглецевий слід, що пов’язано з масовістю та довготривалістю даного етапу.

Важливим аспектом є здатність матеріалів до вторинної переробки. Використання таких підходів, як кругова економіка може суттєво знизити викиди на цьому етапі завдяки вторинній переробці будівельних матеріалів і дозволить зменшити відходи та мінімізувати викиди на етапі утилізації.

Одним із можливих варіантів зниження вуглецевого сліду є використання екологічно чистих матеріалів, наприклад, використання низьковуглецевого бетону, деревини або перероблених матеріалів. Також встановлення систем із високим ККД, наприклад, теплових насосів, рекуператорів та перехід на відновлювані джерела енергії дозволять у значній мірі вирішити дану проблему.

Набирає популярність у світі модульність будівель. Головною ідеєю такого рішення є можливість використання таких будівель для різних цілей, можуть навіть легко збиратись/розбиратись і бути реконструйовані за необхідністю.

Зниження викидів CO_2 сприяє боротьбі з глобальним потеплінням та досягненню цілей Паризької угоди, а використання енергоефективних рішень і відновлюваних джерел енергії дозволяє зменшити витрати на експлуатацію будівель.

Саме тому оцінка вуглецевого сліду будівель отримала статус обов'язковості. Така оцінка дозволяє ідентифікувати джерела викидів, впроваджувати заходи з їх скорочення та планувати будівлі, які відповідають встановленим вимогам.

Якщо звести сказане вище до спрощеної форми у виглядів переліку показників енергетичної ефективності будівель, то запишемо це у вигляді:

- питома енергопотреба на опалення, охолодження, постачання гарячої води;
- питоме енергоспоживання при опаленні;
- питоме енергоспоживання при охолодженні;
- питоме енергоспоживання при постачанні гарячої води;
- питоме енергоспоживання систем вентиляції;
- питоме енергоспоживання при освітленні;
- питоме енергоспоживання первинної енергії;
- питоме енергоспоживання викидів парникових газів.

Енергоспоживання визначається як енергопотреби плюс регулярні неутилізовані тепловтрати систем та додаткова енергія. Сумарні регулярні тепловтрати системи складаються з втрат теплоти при виробленні (генеруванні), акумулюванні, транспортуванні, регулюванні, розподіленні та тепловіддачі.

Таким чином, енергоефективність у будівництві – це комплексна проблема, яка включає технічні, управлінські та екологічні аспекти і потребує комплексного підходу, врахування місцевих умов та використання передових технологій.

1.2. Фактори, що впливають на енергоефективність будівель

Енергоефективність будівлі залежить від широкого спектра факторів, які включають архітектурні, технічні, природні, економічні, експлуатаційні та інші аспекти. Всі ці фактори працюють у комплексі, і оптимізація кожного з них сприяє зменшенню енергоспоживання, покращенню комфорту та екологічних показників.

Одним із важливих факторів, що треба враховувати при проектуванні є кліматичні умови, в яких буде експлуатуватися будівля. Зрозуміло, що у холодному кліматі велике значення мають теплоізоляційні властивості будівлі, тоді як у теплому – охолоджувальні системи. Проблемним питанням також є температурні коливання, які впливають на міцність конструкції і, відповідно, теж потребують уваги. При сучасному проектуванні враховують середній рівень сонячного випромінювання, що може використовується для пасивного обігріву або живлення сонячних панелей. Також враховують вітрові умови, оскільки вітер впливає на тепловтрати через огороджувальні конструкції. Тому проектувальники враховують природний ландшафт і захист будівлі від вітру. Карта кліматичних зон, яка використовуються для теплотехнічних розрахунків показано на рисунку 1.1 [7]. Поділ на зони I та II забезпечує адаптацію вимог до реальних кліматичних умов кожного регіону, що є критично важливим для енергоефективного будівництва.

Архітектурно-планувальні рішення враховують орієнтацію будівель. Розташування вікон, стін та покрівлі щодо сонця може зменшити витрати на освітлення, опалення чи охолодження. Наприклад, південна орієнтація у північній півкулі дозволяє максимально використовувати природне освітлення та тепло. Форма будівлі також має вплив, наприклад, компактні будівлі з меншою поверхнею зовнішніх огороджувальних конструкцій сприяють зниженню тепловтрат. У зонах з високою густиною вітрів має сенс будувати будинки обтічної форми. Планування внутрішнього простору має на увазі зонування приміщень за рівнем обігріву чи охолодження (наприклад,

житлові кімнати варто розташовувати ближче до джерел тепла, а підсобні приміщення – до зовнішніх стін).



Рисунок 1.1 – Карта кліматичних зон, яка використовуються для теплотехнічних розрахунків [7]

Теплотехнічні характеристики огороджувальних конструкцій відіграє одну з ключових ролей у питаннях енергоефективності. Коротко кажучи, даний пункт включає в себе теплоізоляцію та герметичність. Використання високоякісних ізоляційних матеріалів для стін, даху, підлоги та вікон зменшує втрати тепла. Зараз на ринку є різноманітні матеріали з низькою теплопровідністю, наприклад, енергоефективне скло або сендвіч-панелі, значно покращують енергоефективність. Герметичність конструкцій важлива з точки зору уникнення протягів і втрати тепла через стики та шви.

Інженерні системи включають системи опалення та охолодження. Використання енергоефективних котлів, теплових насосів та систем кондиціонування із високим коефіцієнтом корисної дії (ККД) дозволяють

значно підвищити енергоефективність будинків. В інженерних системах доцільно використовувати рекуперацію тепла в системах вентиляції, що дозволяє використовувати тепло повітря всередині будівлі для підігріву свіжого повітря, що заходить ззовні. В системі освітлення доцільно використовувати світлодіодні лампи та автоматизоване керування освітленням суттєво. Також новим трендом, особливо в житловому секторі, є інтелектуальні системи управління та автоматизація. Наприклад, використовуються датчики руху, температури чи освітлення, що дозволяє оптимізувати споживання енергії.

Використання відновлюваних джерел енергії. Цей фактор є звичайно опціонним, але із здешевленням комплектуючих отримує все більшу популярність. Найбільше розповсюдження отримали сонячні панелі та геотермальні системи, а також вітрові установки (треба враховувати обмеження до використання у людних місцях).

До експлуатаційних факторів відносять рівень обслуговування, діяльності користувачів, знос будівлі та обладнання. Даний фактор обумовлює необхідність дотримання своєчасного технічного обслуговування обладнання, раціональне використання енергоресурсів (залежить від звичок мешканців). В деяких випадках доцільно проводити глибоку модернізацію будинків або навіть зносити і на їх місці будувати сучасні. Наприклад, в Україні до таких можна віднести так звані «хрущьовки».

Організаційно-правовий фактор. До цього фактору можна віднести різноманітну нормативну документацію, наприклад, стандарти NZEB, ДСТУ, ДБНи і т.д. Крім того сюди ж можна додати і економічні стимули, такі як дотації, пільги або податкові знижки на впровадження енергоефективних технологій. Як вже зазначалося, в Україні діють: Програма «ГрінДІМ» Фонду енергоефективності, Урядова програма для приватних домогосподарств; Програма «5-7-9», податкові пільги.

Близьким до попереднього є такий фактор, як фінансово-соціальний. У даному сенсі важливим є доступність енергоефективних матеріалів і

технологій, оскільки їхня висока вартість може обмежувати поширення інновацій, а обізнаність населення про переваги енергоефективності безпосередньо впливає на її впровадження. У цьому сенсі важливою ланкою є ОСББ.

Отже, енергоефективність будівель залежить від багатьох взаємопов'язаних факторів. Їх врахування на етапі проєктування, будівництва та експлуатації є критично важливим для досягнення оптимального рівня енергозбереження, зниження витрат на енергію та екологічного впливу. Системний підхід до оцінки та покращення цих факторів сприятиме створенню більш сталих і комфортних умов для життя та роботи.

1.3. Законодавче регулювання енергоефективності у будівельній галузі

На даний час в будівельній галузі існує чимало нормативної документації. Можна сказати, що ця галузь є однією з самих зарегульованих, що пов’язано з багатьма факторами. Більш того, українські фахівці і зараз активно працює над вдосконаленням нормативної бази для стимулювання розвитку, як будівельної галузі в цілому, так і енергоефективності в будівництві зокрема [8, 9]. Під час обговорень Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України визначає пріоритетними завданнями забезпечення якості будівництва, впровадження інноваційних стандартів енергоефективності та гармонізацію будівельних норм із європейськими вимогами. Оновлення будівельних норм і стандартів є важливим етапом у модернізації інфраструктури та забезпеченні прозорості процесів. Зокрема, протягом 2023-2024 років було затверджено низку нових державних будівельних норм (ДБН), які охоплюють проєктування та будівництво закладів охорони здоров’я, що відповідають сучасним вимогам безпеки та комфорту; інженерно-транспортні споруди (тунелі, мости та інші об’єкти

інфраструктури), захисні споруди цивільного захисту, необхідні для безпеки населення в умовах воєнних викликів.

Згідно з інформацією профільного Міністерства [8] наразі опрацьовується близько 30 проєктів ДБН і 60 національних стандартів і ще 80 національних стандартів планується включити до опрацювання. Ця масштабна діяльність має на меті створити надійну нормативну базу для відновлення та подальшого розвитку інфраструктури і наближення до Європейських норм.

Розглянемо деякі нормативно-правові акти, які стосуються енергоефективності будівель. Першим зазначимо Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» [6]. Цей закон є основним нормативно-правовим актом, який регулює питання енергозбереження в будівельній галузі, встановлює правові та організаційні засади забезпечення енергоефективності будівель, включаючи обов'язкову сертифікацію енергетичної ефективності. Його метою є зменшення енергоспоживання будівель, стимулювання раціонального використання енергії та зниження негативного впливу на довкілля. Закон узгоджений із європейськими директивами, зокрема з Директивою 2010/31/ЄС «Про енергетичну ефективність будівель».

Основні положення закону включають:

- обов’язкова сертифікація енергетичної ефективності будівель, необхідна для визначення класу енергетичної ефективності будівлі. У сертифікаті зазначаються енергетичні характеристики будівлі, рекомендації щодо підвищення її енергоефективності та інші показники. Сертифікат необхідний для новобудов, будівель, які реконструюються, та об’єктів, що продаються чи здаються в оренду;
- розрахунок енергетичної ефективності;
- вимоги до енергоефективності нових будівель. Усі нові будівлі повинні відповідати встановленим мінімальним вимогам до енергетичної ефективності. Забудовники зобов’язані забезпечити

відповідність новобудов стандартам NZEB (будівлі з майже нульовим споживанням енергії) у визначений законодавством термін;

- державна політика підтримки енергоефективності. Закон передбачає реалізацію державних програм із фінансової підтримки енергоефективних заходів, таких як утеплення фасадів, модернізація інженерних систем, встановлення енергоощадних вікон тощо. Окрему увагу приділено стимулюванню використання відновлюваних джерел енергії;
- моніторинг та контроль енергоспоживання. Закон зобов'язує забезпечити регулярний моніторинг енергетичного споживання будівель та контроль за виконанням енергоефективних заходів. Відповідальні органи надають рекомендації для підвищення ефективності;
- навчання та підготовка експертів. Встановлено вимоги до фахівців, які проводять сертифікацію енергетичної ефективності.

Державні будівельні норми (ДБН) щодо енергоефективності [7, 10]. До них відносяться ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель та ДБН В.1.2-11:2021 «Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження та енергоефективність». Вони визначають вимоги до нових будівель і модернізації існуючих споруд, сприяючи скороченню енергоспоживання, покращенню умов проживання та досягненню міжнародних стандартів. Їхніми загальними положеннями є забезпечення енергоефективності та зменшення споживання енергії в будівлях, адаптація до кліматичних умов України, впровадження інноваційних рішень та матеріалів для досягнення максимальної енергоощадності, урахування принципів сталого розвитку й екологічності.

ДБН В.2.6-31:2021 встановлює сучасні вимоги до теплової ізоляції та енергетичних характеристик будівель, спрямовані на зниження втрат енергії та підвищення комфортності умов проживання чи роботи. Основна мета цього

ДБН – забезпечити високий рівень енергоефективності будівель як нових, так і тих, що проходять реконструкцію або капітальний ремонт.

ДБН В.1.2-11:2021 встановлює базові вимоги до проєктування будівель і споруд з урахуванням принципів енергозбереження та забезпечення високого рівня енергоефективності. Він узгоджений із європейськими стандартами та спрямований на інтеграцію міжнародного досвіду в українську будівельну практику.

Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року, затверджений у 2021 році, визначає національні цілі з енергоефективності та заходи для їх досягнення до 2030 року [11].

Концепція Державної цільової економічної програми підтримки термомодернізації будівель до 2030 року, схвалена у 2023 році [12]. Ця концепція передбачає заходи та фінансування для підтримки термомодернізації будівель до 2030 року.

Стратегія термомодернізації будівель України до 2050 року, затверджена у 2023 році визначає довгострокові цілі та заходи з термомодернізації будівель для зменшення енергоспоживання та викидів парникових газів[13].

ДСТУ EN 15459-1:2017 «Енергоефективність будівель. Процедура економічного оцінювання енергетичних систем будівлі» встановлює процедури розрахунку економічної ефективності енергетичних систем будівель [14].

ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015 «Енергетична ефективність будівель. Настанова з проведення енергетичної оцінки будівель» надає рекомендації щодо проведення енергетичної оцінки будівель [15].

Закон України «Про енергетичну ефективність», затверджений у 2021 році, встановлює загальні правові та економічні засади забезпечення енергоефективності в Україні [16].

А також:

Закон України «Про ринок електричної енергії».

Закон України «Про альтернативні джерела енергії».

Закон України «Про альтернативні види палива».

Закон України «Про комбіноване виробництво теплової та електричної енергії (когенерацію) та використання скидного енергопотенціалу».

Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності».

Закон України «Про запровадження нових інвестиційних можливостей, гарантування прав та законних інтересів суб'єктів підприємницької діяльності для проведення масштабної енергомодернізації».

Закон України «Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання».

Крім того, існують ще Постанови та Накази:

- Постанова Кабінету Міністрів України від 11.04.2018 №265 «Про затвердження переліку будівель промислового та сільськогосподарського призначення, об'єктів енергетики, транспорту, зв'язку та оборони, складських приміщень, на які не поширюються мінімальні вимоги до енергетичної ефективності будівель та які не підлягають сертифікації енергетичної ефективності будівель»;
- Постанова Кабінету Міністрів України від 26 липня 2018 р. № 602 «Про затвердження Порядку обміну інформацією між центральними органами виконавчої влади, атестаційними комісіями в процесі проведення незалежного моніторингу, професійної атестації та ведення баз даних сертифікатів, фахівців та звітів»;
- Постанова Кабінету Міністрів України від 26 липня 2018 р. № 605 «Про затвердження Порядку проведення професійної атестації осіб, які мають намір провадити діяльність із сертифікації енергетичної ефективності та обстеження інженерних систем»;
- Наказ Мінрегіону 21.03.2018 №62 «Про затвердження Порядку ведення баз даних звітів про результати обстеження інженерних

систем, атестованих енергоаудиторів та фахівців з обстеження інженерних систем, енергетичних сертифікатів»;

- Наказ Мінрегіону від 11.07.2018 №169 «Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель»;
- Наказ Мінрегіону від 11.07.2018 №170 «Про затвердження Методики визначення економічно доцільного рівня енергетичної ефективності будівель»;
- Наказ Мінрегіону від 11.07.2018 №172 «Про затвердження Порядку проведення сертифікації енергетичної ефективності та форми енергетичного сертифіката»;
- Наказ Мінрегіону 11.07.2018 №171 «Про затвердження Порядку застосування розрахункових елементів програмного забезпечення для визначення енергетичної ефективності будівель»;
- Наказ Мінрегіону 11.07.2018 №173 «Про затвердження Методики обстеження інженерних систем будівлі»;
- Наказ Мінрегіону від 06.10.2017 №267 «Про визначення будівель, які часто відвідують громадяни»;
- Наказ Мінрегіону від 18.10.2018 №274 «Про затвердження Порядку незалежного моніторингу звітів про результати обстеження інженерних систем»;

Наказ Мінрегіону від 18.10.2018 №275 «Про затвердження Порядку рецензування звітів про обстеження інженерних систем»;

Наказ Мінрегіону від 18.10.2018 №276 «Про затвердження Порядку незалежного моніторингу енергетичних сертифікатів».

Для порівняння наведемо деяку інформацію по інших країнах.

У США діє LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) – сертифікаційний стандарт для енергоефективних і сталих будівель, який стимулює використання екологічно чистих матеріалів, мінімізацію споживання енергії та води. Також у США працює ASHRAE Standards – Американське товариство інженерів з опалення, охолодження та

кондиціонування повітря розробляє стандарти для енергоефективності будівельних систем.

У Швейцарії діє стандарт Minergie: Швейцарський стандарт для енергоефективних будівель, що охоплює нові та реконструйовані об'єкти.

Німеччина має:

- стандарт «Passivhaus» (пасивний будинок), який є одним із провідних у світі завдяки фокусу на низьке енергоспоживання завдяки високоефективному утепленню та вентиляції з рекуперацією;
- Закон Gebäudeenergiegesetz (GEG) про енергетичну ефективність будівель, який об'єднує попередні нормативи, такі як EnEV та EnEG.
- Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) – німецька рада з екологічного будівництва пропонує сертифікацію та стандарти для сталого будівництва.

У травні 2022 року Міністерство економіки та клімату Німеччини представило «Робочий план», спрямований на підвищення енергоефективності країни [17]. Цей план є частиною стратегії зменшення залежності від російських енергоносіїв і боротьби зі змінами клімату. Він містить перелік заходів, що стимулюють зниження споживання енергії та скорочення викидів парникових газів.

Розроблений «Робочий план» [17] передбачає субсидії для проєктів із підвищення енергоефективності в будівництві та опаленні. Зокрема, сприяється реконструкція будинків із найнижчими енергетичними характеристиками, що забезпечує значну економію енергії. Також планується припинити державну підтримку на встановлення систем опалення на основі викопного палива та нові будівельні проєкти, що не відповідають стандарту Efficiency House 40 (будинки з мінімальним споживанням енергії). Сонячні панелі на дахах становляться стандартом для нових будівель, що дозволить значно збільшити обсяг відновлюваної енергії. Робиться акцент на реконструкції існуючих житлових будинків з метою підвищення їх

енергоефективності. Цей захід розглядається як економічно вигідний і ефективний спосіб зменшення викидів CO_2.

8.09.23 року Німеччина ухвалила закон про опалення, який є частиною поправок до закону про енергетику будівель. Цей закон спрямований на зменшення залежності від викопних джерел енергії та скорочення шкідливих для клімату викидів, передбачаючи поступову відмову від використання систем опалення на нафті та газі. Цікавим у даному законі є те, що кожна нова система опалення в новобудовах повинна працювати щонайменше на 65 % з використанням відновлюваної енергії. Для вже існуючих будівель передбачено перехідний період до 2028 року. Згідно із законом, Німеччина має повністю перейти на кліматично нейтральні системи опалення до 2045 року [18]. Закон про опалення є частиною ширшої стратегії Німеччини щодо досягнення кліматичної нейтральності до 2045 року.

Ще один із документів у Німеччині – це Енергетичний паспорт (сертифікат) [19]. Цей документ містить інформацію про енергетичну ефективність будівлі і був запроваджений відповідно до Закону про енергозбереження та оформлюється за стандартами, затвердженими Німецьким енергетичним агентством. Його мета – забезпечити прозорість інформації щодо енергоспоживання будівель, сприяти енергоефективності та зменшенню впливу на довкілля.

Основні аспекти енергетичного паспорта:

- потрібен під час будівництва нових об'єктів, реконструкції, перепланування чи розширення будівель. Обов’язково надається при продажу або оренді нерухомості;
- враховує всі енергетичні параметри будівлі: теплові характеристики стін, вікон, даху, систем опалення, вентиляції тощо. Розрахунок базується на корисній площі об'єкта, а не на загальній;
- енергетичний паспорт діє 10 років;
- будівлі класифікуються за річним споживанням енергії в кВт·год/м², яке визначає витрати енергії та рівень енергоефективності:

- A+: найвищий рівень (до 30 кВт·год/м²·рік) – мінімальні витрати;
- H: найнижчий рівень (понад 250 кВт·год/м²·рік) – максимальні витрати.

Насамкінець зазначимо, що на території ЄС вийшла у новій редакції Директива Європейського Союзу про енергетичну ефективність будівель [20]. Основні положення документа спрямовані на досягнення кліматичної нейтральності в будівельному секторі до 2050 року через модернізацію будівельного фонду та зменшення викидів парникових газів. У даній директиві пріоритетом є модернізація будівель із найнижчими показниками енергоефективності, щоб зменшити їх енергоспоживання та підвищити комфорт мешканців. Директива визначає вимоги для нових будівель, які мають бути максимально енергоефективними, використовуючи відновлювані джерела енергії. У Директиві є вимога оцінювати та публікувати дані про викиди CO_2 протягом усього життєвого циклу будівлі (будівництво, експлуатація, утилізація). Передбачається розробка національних планів реконструкції будівель із регулярним оновленням кожні п'ять років. Директива зобов'язує включати системи для встановлення сонячних панелей у нових будівлях і великих реконструкціях.

2 АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЕЛЬ

2.1 Матеріали, що використовують для енергозбереження

Енергозбереження в будівництві значною мірою залежить від використання сучасних матеріалів, які мають певні фізико-хімічні властивості. Зниження втрат тепла в будівлях досягається використанням теплоізоляційних матеріалів із низькою теплопровідністю, вдосконаленою конструкцією огороджувальних конструкцій та впровадженням нових технологій теплоізоляції.

Зауважимо, що витрати енергії на створення тепла/прохолоди в будівлі пов’язано зі створенням комфортної температури, яка звичайно залежить від сприйняття окремою людиною, але в середньому комфортна температура знаходиться у межах +18…+24 С. При цьому слід враховувати не тільки температуру, а і вологість та рух повітря. Якщо людина працює фізично на виробництві, то нормальною температурою вважається + 18 °С. Рекомендовані значення температури в приміщенні за EN 15251 наведені в таблиці 2.1.

Згідно зі стандартом EN 15251 для житлових будинків, оптимальна мінімальна температура для класу I становить 21 °С. Розглянемо пояснення оперативної температури на прикладі, наданим PassNet (Intelligent Energy Europe – програма Європейського Союзу, створена для підтримки ініціатив у сфері відновлюваних джерел енергії, енергоефективності та скорочення викидів парникових газів. PassNet входить до цієї програми як частина стратегії зі скорочення енергоспоживання в будівельному секторі).

Оперативна температура – це температура, яку сприймає людина. Вона складається з температури повітря в приміщенні (вимірюється звичайними термометрами) та радіаційної температури (визначається тепловим

випромінюванням і вимірюється за допомогою чорного кульового термометра).

Таблиця 2.1 – Рекомендовані значення температури в приміщенні

Тип будівлі (врахування діяльності)	Категорія приміщення	Оперативна температура	
		Мінімальна для опалення (зимовий сезон)	Максимальна для охолодження (літній сезон)
Житлові будинки Сидіння ~1,2 метра	I II III	21,0 20,0 18,0	25,5 26,0 27,0
Офіс, конференц-зал, аудиторія Сидіння ~1,2 метра	I II III	21,0 20,0 19,0	25,5 26,0 27,0
Шкільний клас Сидіння ~1,2 метра	I II III	21,0 20,0 18,0	25,5 26,0 27,0
Група в дитсадку Сидіння ~1,4 метра	I II III	19,0 17,5 16,5	24,5 25,5 26,0
Магазин Стояння/ходьба ~1,4 метра	I II III	17,5 16,0 15,0	24,0 25,0 26,0

Для розуміння різниці згаданих температур наведемо такий приклад. Людина може знаходитись в автомобілі в холодну пору року із зачиненими вікнами. Відповідно людина буде відчувати температуру, яка є всередині автомобіля. Але проїжджаючи поряд із багаттям людина відчує додаткове тепло завдяки випромінюванню від багаття. Аналогічно відбувається і в

будівлях. Наведемо приклад від PassNet (рис. 2.1). Температура назовні 10 °С нижче нуля, температура повітря в приміщенні 22 °С.



а б

Рисунок 2.1 – Пояснення до поняття «Оперативна температура»:
а – неутеплена будівля; б – утеплена будівля (пасивний будинок)

Енергія фотонів, що випускається поверхнею тіла:

$$Q = \varepsilon\sigma_0 \left(T_1^4 - T_2^4\right) F_1, \qquad (2.1)$$

де

σ_0 - const Больцмана;

T = 273 + t – абсолютна температура.

Інакше кажучи, оперативна температура це ключовий показник теплового комфорту, який враховує як температуру повітря, так і температуру оточуючих поверхонь. Її використання є важливим при проєктуванні енергоефективних будівель і систем клімат-контролю.

Отже, у неутеплених будівлях взимку поверхні оболонки будівлі залишаються холодними, що призводить до значної втрати тепла з тіла людини через випромінювання. У пасивних будинках, де оболонка належним чином утеплена, тепловтрати випромінювання значно зменшуються. Тому,

навіть якщо температура повітря в обох типах будівель однакова, відчуття тепла буде різним: у пасивному будинку людині буде тепліше завдяки меншому тепловипромінюванню тіла.

Відносна вологість – це показник, який відображає, скільки водяної пари міститься в повітрі порівняно з максимально можливою кількістю при певній температурі. Чим нижча відносна вологість, тим більше водяної пари повітря може поглинати, у той час як при високій вологості можливості поглинання обмежені.

У будівлях відносна вологість є важливим фактором, що впливає на якість повітря та комфорт приміщення. Оптимальний діапазон відносної вологості становить 30…60 %, а перевищення 70 % слід уникати.

Температура повітря має великий вплив на рівень відносної вологості. Існує помилкове уявлення, що провітрювання кімнат узимку підвищує вологість у приміщенні. Насправді, навіть якщо зовнішнє повітря має відносну вологість 80 %, під час потрапляння в будинок і нагрівання його вологість зменшується. Наприклад, за температури зовнішнього повітря –20 °C відносна вологість у кімнаті може знизитися до 10…15 % [21].

Низька вологість повітря, що становить менше 30 % може спричинити сухість слизових оболонок носа та горла, що робить людей більш уразливими до застудних захворювань, особливо взимку. Деякі люди є більш чутливими до низької вологості, зокрема ті, хто часто стикається з сухим повітрям під час польотів. На висоті польоту через низькі температури відносна вологість у салоні літака може знижуватися до 5 %, що створює додатковий дискомфорт (рис. 2.2) [21].

Розглянувши коротко мікроклімат (температурні умови і вологість приміщення), було показано, що комфортні для життя і роботи умови залежать від декількох факторів і є взаємопов’язаними. Поза увагою залишились питання пов’язані з протягом (рухом повітряних потоків) і концентрація CO_2 в повітрі. Звичайно це важливі фактори, які обов’язково мають враховуватись проектувальниками, але частково ми їх розглянемо пізніше. Загалом всі ці

фактори є визначальними при проектуванні теплоізоляційних оболонок, причому це стосується майже будь-яких регіонів Землі. Це означає, що ізоляційні матеріали допомагають зберігати комфортні умови (необхідний мікроклімат), про який було зазначено вище. Саме тому дослідники займаються розробкою і пошуком нових матеріалів або підвищенням ефективності існуючих, які б відповідали багатьом вимогам в залежності від локації будівлі.

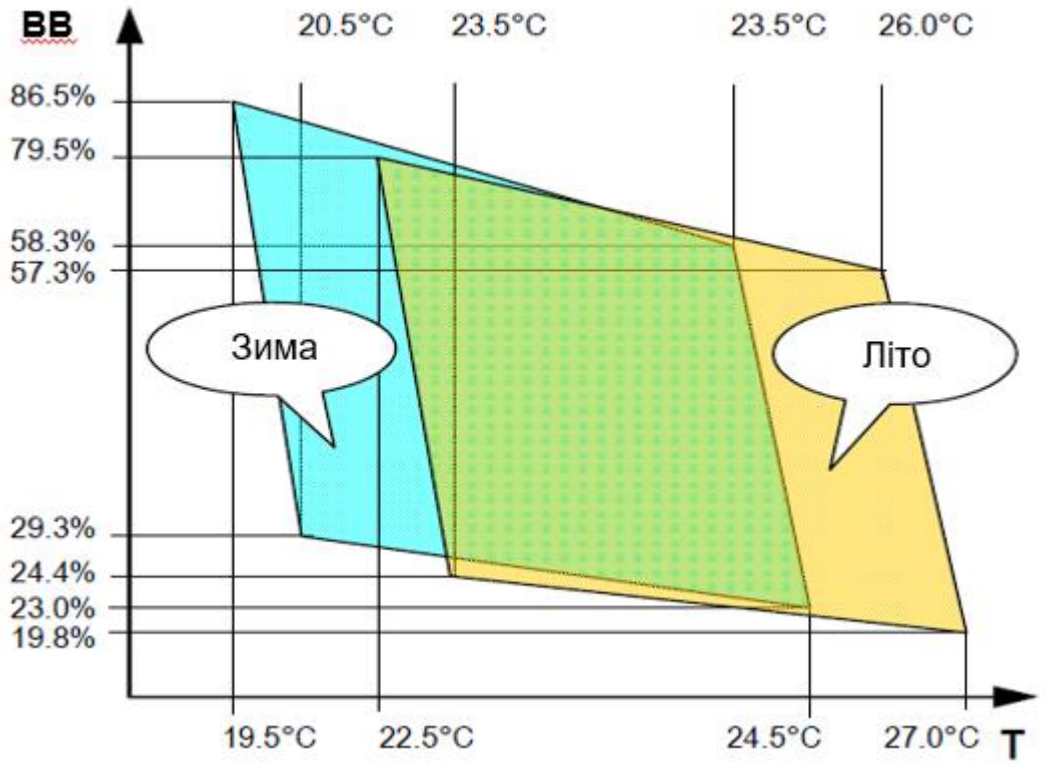


Рисунок 2.2 – Співвідношення відносної вологості (ВВ) і температури (Т) [21]

Одним із важливих показників теплоізоляційних матеріалів є їх теплопровідність. Як відомо, теплопровідність – це перенесення теплоти структурними частинками речовини (молекулами, атомами, електронами) в процесі їх теплового руху.

Механізм переносу теплоти залежить від агрегатного стану речовини:

$$Q^* = \lambda \frac{(t_{c1} - t_{c2}) F \tau}{\delta}, \qquad (2.2)$$

де

λ - коефіцієнт теплопровідності показує, яка кількість теплоти проходить через один квадратний метр поверхні стінки завтовшки один метр за одну секунду при різниці температур на цих поверхнях в один градус.

$$\lambda = \frac{Q^* \delta}{(t_{c1} - t_{c2}) F \tau} \left[\frac{\text{Дж} \cdot \text{м}}{\text{град} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}} \right] = \left[\frac{\text{Вт}}{\text{град} \cdot \text{м}} \right] \quad (2.3)$$

На конференції Advanced Study Institute on Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption (TESSEC) присвяченій теплозберіганню та сталого споживання енергії (Izmir, Cesme, Туреччина, 2005 р.), було показано, що теплопровідність не є константою і залежить від різних факторів (рис. 2.3, 2.4).

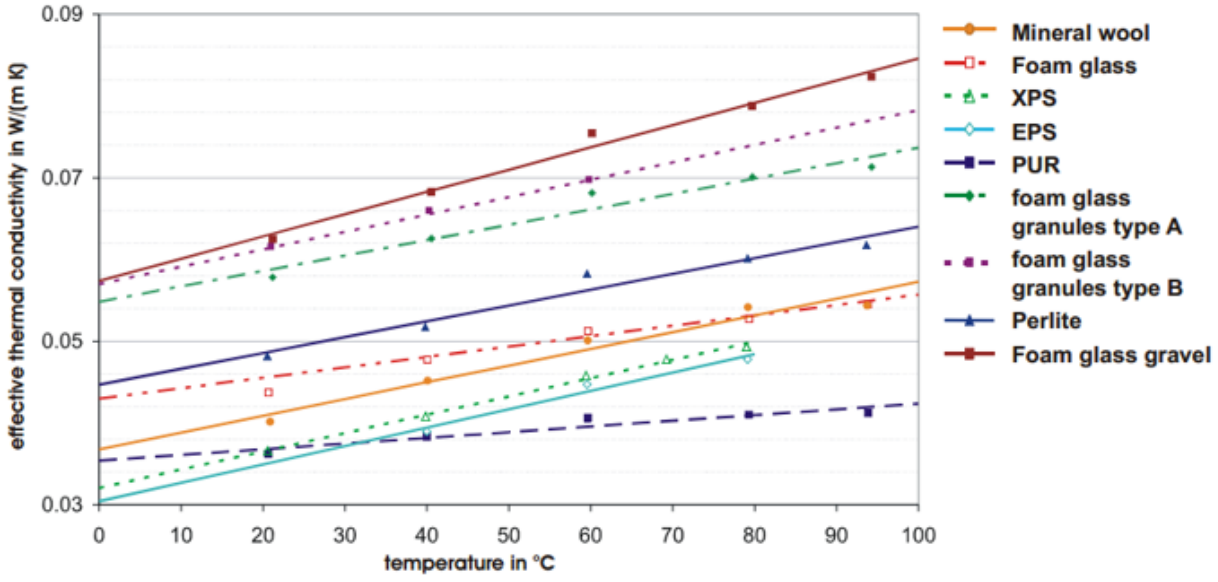


Рисунок 2.3 – Залежність теплопровідності від температури (згідно TESSEC)

Залежність теплопровідності матеріалу від вмісту вологи в ньому можна добре продемонструвати на прикладі мінеральної вати, оскільки при потраплянні води на вату під час монтажу, вона втрачає свої ізоляційні властивості до трьох разів.

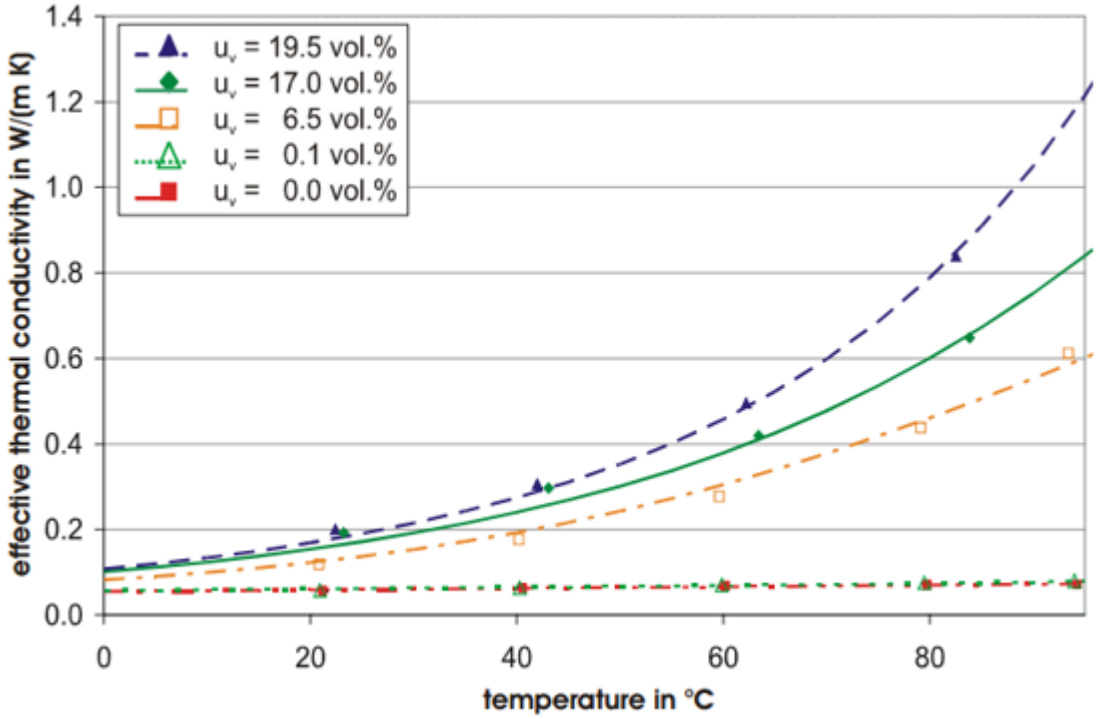


Рисунок 2.4 – Залежність теплопровідності від вмісту вологи в ізоляційному матеріалі (згідно TESSEC)

Значення λ встановлюються експериментальним шляхом в залежності від структури, щільності (густини), вологості, тиску і температури (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 – Порівняння матеріалів за щільністю, теплопровідністю та товщиною

Матеріал	Щільність (кг/м³)	Теплопровідність (Вт/м·К)	Порівняльна товщина (мм)
Пінополіуретан	25 - 300	0.02	40
Пінополістирол	20 - 30	0.041	80
Мінвата	20 - 40	0.048	100
Дерево	800 - 1000	0.13	274
Керамзит	600 - 800	0.18	320
Газобетон	800	0.22	400
Цегла	1800	0.45	760
Бетон	2200	2.1	1720

Термічний опір тришарової стінки (рис. 2.5) дорівнює сумі опорів окремих шарів. Тоді питома теплота, що проходить через стінку з n шарів визначається виразом:

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c(n+1)}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \qquad (2.4)$$

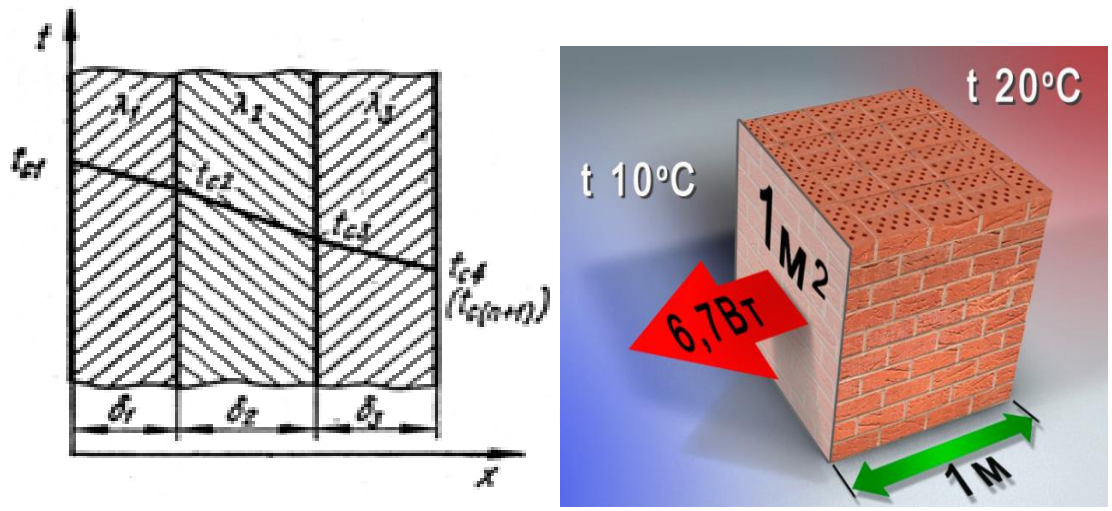


Рисунок 2.5 – Теплопровідність через багатошарову стінку

Перенесення теплоти від однієї рідини до іншої через стінку, що їх розділяє. Тобто механізм перенесення теплоти сумісно тепловіддачею (конвекцією) та теплопровідністю.

$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{a_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{a_1}} = \kappa\left(t_{ж1} - t_{ж2}\right), \qquad (2.5)$$

тоді

$$\kappa = \frac{1}{a_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{a_1} \qquad (2.6)$$

де

κ – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м^2·град).

Отже основне рівняння теплопередачі:

$$Q = \kappa \cdot \Delta t \cdot F \text{ , Вт} \qquad (2.7)$$

Загальний термічний опір теплопередачі визначають як:

$$R = \frac{1}{\kappa} = \frac{1}{a_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{a_1} \qquad (2.8)$$

Для багатошарових стінок вираз, з якого визначається густина теплового потоку, має вигляд:

$$q = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{a_1} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_1}} = \kappa \left(t_{ж1} - t_{ж2} \right), \qquad (2.10)$$

$$\kappa = \frac{t_{ж1} - t_{ж2}}{\frac{1}{a_1} + \sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{a_1}} \qquad (2.11)$$

Таким чином, для підтримання теплового балансу має виконуватися умова:

$$Q_0 + Q_{вн} = Q_{вт} + Q_{ін} \qquad (2.12)$$

де

$Q_о$ – кількість теплоти, що надходить в будівлю через систему опалення;

$Q_{вн}$ – внутрішні тепловиділення в будівлі, що не залежать від роботи системи опалення;

$Q_{вт}$ – втрати теплоти через зовнішні огорожі будівлі внаслідок теплопередачі;

$Q_{ін}$ – втрати теплоти від інфільтрації повітря через нещільності у зовнішніх огорожах будівлі.

Розглянемо втрати через огороджуючі конструкції:

$$Q_{вт} = \left\{ \frac{P}{S} \left[k_c + \phi_{скл} \cdot \left(k_{вік} - k_c \right) + \frac{1}{H} \cdot \left(\phi_{ст} \cdot k_{ст} + \phi_{підл} \cdot k_{підл} \right) \right] \right\} \cdot V_н \cdot \left(t_в - t_з \right) \quad (2.13)$$

де

P, S, H і Vн - геометричні характеристики будівлі, а саме:

P - периметр будівлі в плані,

S - площа будівлі в плані,

H - висота будівлі,

$V_н$ – об’єм будинку по зовнішньому обміру (будівельний об'єм будівлі);

k_c, $k_{вік}$, $k_{ст}$, $k_{підл}$ - коефіцієнти теплопередачі, відповідно, для зовнішніх стін будівлі, вікон, стелі верхнього поверху і підлоги нижнього поверху;

$\varphi_{скл}$ - коефіцієнт скління (відношення площі вікон до площі зовнішніх стін будинку);

$\varphi_{ст}$, $\varphi_{підл}$ - коефіцієнти, що враховують зміну різниці температур внутрішнього і зовнішнього повітря для стелі верхнього поверху і підлоги нижнього поверху в порівнянні з різницею температур для зовнішніх стін

($\varphi_{ст}$ = 0,75…0,9, $\varphi_{підл}$ = 0,5…0,7);

$t_в$ и $t_з$ - температура повітря всередині опалювальних приміщень і зовнішня температура повітря.

Втрати теплоти через зовнішні огорожі можна представити у вигляді суми втрат теплоти через окремі зовнішні огорожі будівлі (рис. 2.6):

$$Q_{вт} = \sum k_i \cdot F_i \cdot \Delta t_i \quad (2.14)$$

де

k_i – коефіцієнт теплопередачі через зовнішні огорожі (стіни, вікна, стеля верхнього поверху, підлога нижнього поверху та інше);

F_i – площа поверхні окремих зовнішніх огороджень;

Δt_i – різниця температур повітря з внутрішнього і зовнішнього боку огорожі.

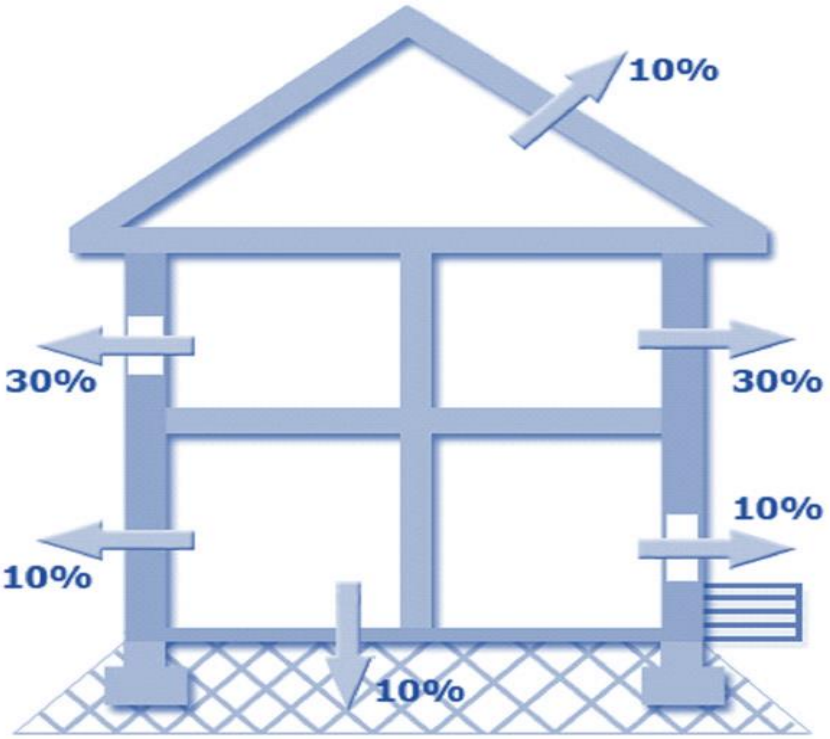


Рисунок 2.6 – Теплові втрати через огороджуючі конструкції

Втрати теплоти від інфільтрації зовнішнього повітря в опалювальні приміщення прийнято оцінювати через коефіцієнт інфільтрації:

$$\mu = Q_{ін} / Q_{вт}, \% \text{ (або частки од).}$$

Для житлових і громадських будівель μ = 3…6 %. Для виробничих будівель μ = 25…30 %.

Коефіцієнт інфільтрації залежить від конструктивних характеристик будинку і кліматичних умов району:

$$\mu = b \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H \cdot \left(1 - \frac{T_З}{T_В}\right) + w_в^2}, \% \qquad (2.15)$$

(або частки од).

де

b - постійна інфільтрації, $(35…40)\cdot10^{-3}$, с/м;

H - висота будівлі, м;

$T_з$, $T_в$ - температури зовнішнього повітря і повітря всередині будівлі, К;

$w_в$ - середня швидкість вітру в даному кліматичному районі (для найбільш холодного місяця опалювального періоду), м/с.

Тепловиділення від приладів освітлення, комп'ютерів, холодильників, ксероксів та ін. Можна визначити за виразом:

$$Q_{осв} = \Sigma N \times \tau_ф \times Z_ф, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (2.16)$$

де

ΣN – сумарна встановлена потужність, кВт;

$\tau_ф$ – фактичний час роботи обладнання в робочі дні опалювального періоду, год;

$Z_ф$ – фактична тривалість опалювального періоду, доба.

Тепловиділення від харчоблоку, в опалювальний період:

$$Q_{хб} = 10^{-3} \cdot 17 \times F_р \times \tau_ф \times Z_ф, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (2.17)$$

де $F_р$ - розрахункова площа харчоблоку в м^2.

Тепловиділення від людей визначаються окремо для кожної категорії, в залежності від професійної спрямованості установи: вихователі, педагоги, вихованці дитячих садків, ясел, учні, лікарі, хворі та ін.:

$$Q_л = (q_л \times n_л \times \tau_л \cdot z_o + q_д \times n_д \times \tau_д \times z_o) \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}\cdot\text{год} \quad (2.18)$$

де

$q_л$ - тепловиділення від людини (дорослий 90, дитина та учень 45 Вт /год);

$n_л$, $n_д$ – кількість дорослих та дітей, що перебувають в будівлі, осіб;

$\tau_л$, $\tau_д$ - час перебування дорослих і дітей в будівлі, годин на добу.

$z_о$ - фактична тривалість опалювального періоду.

Як вже зазначалося, також підраховується окремо надходження теплоти від сонячної радіації відповідно до ДСТУ Н Б В.1.1-27: 2010. Будівельна Кліматологія [22]. Відповідно до цього ж стандарту проводиться розрахунок потужності системи опалення. Кількість теплоти, що надходить в будівлю через систему опалення ($Q_о$):

$$Q_o^{/} = q_o V_н \cdot \left(t_{вр} - t_{ро}\right) \cdot \left(1 + \mu\right) \tag{2.19}$$

де

$t_{вр}$ - усереднена розрахункова температура повітря всередині опалювального приміщення, яка набуває чинності відповідно до санітарних норм;

$t_{ро}$ - розрахункова температура зовнішнього повітря для проектування систем опалення [22];

$q_О$ - питома тепловтрата будівлі, що визначається після розрахунку теплових втрат огороджуючими конструкціями будівлі.

$$q_o = \frac{Q_{вт}}{V_н \cdot \left(t_в - t_з\right)} \left[\frac{Вт}{м^3 \cdot К}; \frac{ккал}{м^3 \cdot год \cdot К}\right] \tag{2.20}$$

Витрата теплоти на вентиляцію виробничих і громадських будівель, які мають припливну систему вентиляції:

$$Q_в = q_в \cdot Vн \cdot \left(t_{вр} - tp\right), \tag{2.21}$$

де

$q_в$ - витрати теплоти на вентиляцію будівлі.

$$q_в = \frac{mV_в c_в}{V_н} \qquad \left[\frac{Вт}{м^3 \cdot К}, \frac{ккал}{м^3 \cdot год \cdot К}\right] \tag{2.22}$$

де

де m - кратність обміну повітря у вентильованих приміщеннях;

Vв - вентильований внутрішній об'єм будівлі;

$c_В$ - об'ємна теплоємність повітря.

Середньотижнева, витрата теплоти на гаряче водопостачання житлових, громадських і виробничих будівель визначається за формулою [23]:

$$Q_{г.в.ср} = a_{гв} \cdot m_{гв} \cdot c_в \cdot \left(t_г - t_х\right) / n_с \tag{2.23}$$

де

$a_{гв}$ - добова норма витрати гарячої води на одну людину або на одиницю споживання (ліжко в лікарні, посадочне місце в їдальні і т.п.);

$m_{гв}$ - число споживачів гарячого водопостачання;

$c_в$ - теплоємність води;

$t_г$ - температура гарячої води;

$t_х$ - температура холодної води, яка використовується для підготовки гарячої води;

$n_с$ - розрахункова тривалість подачі теплоносія на гаряче водопостачання протягом доби (добова норма подачі гарячої води, яка залежить від характеру споживання і наявності теплоакумулюючих пристроїв).

Враховуючи наведене вище, а саме складові теплового балансу, виникає необхідність визначення необхідної товщини теплоізоляції. З одного боку проектувальник мусить спиратися на нормативні документи, які регламентують мінімальні параметри, а з іншого боку треба враховувати, що відносна ефективність ізоляційних матеріалів за товщиною падає. Наведемо для кращого розуміння приклад розрахунку реальної стіни з коефіцієнтом теплопровідності на рівні 1 Вт/м^{2}К (рис. 2.7, 2.8).

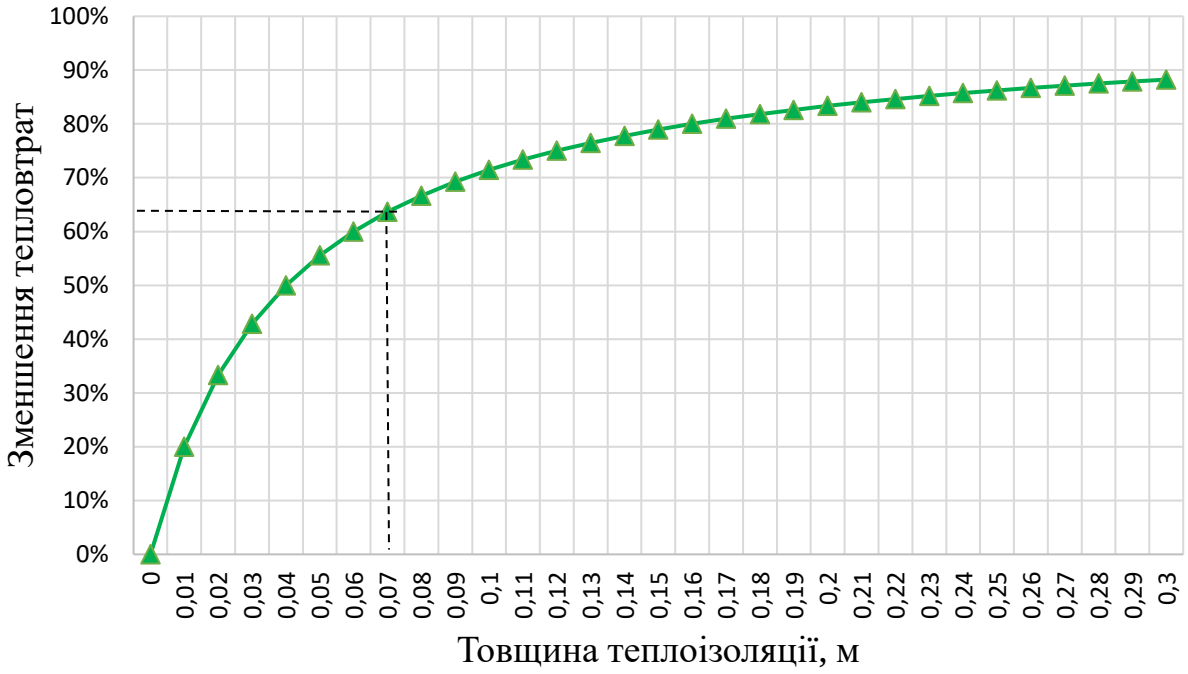


Рисунок 2.7 – Залежність зменшення тепловтрат від товщини теплоізоляції

$$\kappa_{рац} = \frac{1}{\frac{1}{\kappa_{поч}} + \frac{\delta}{\lambda}} \left[\frac{W}{m^2 K}\right] \qquad (2.24)$$

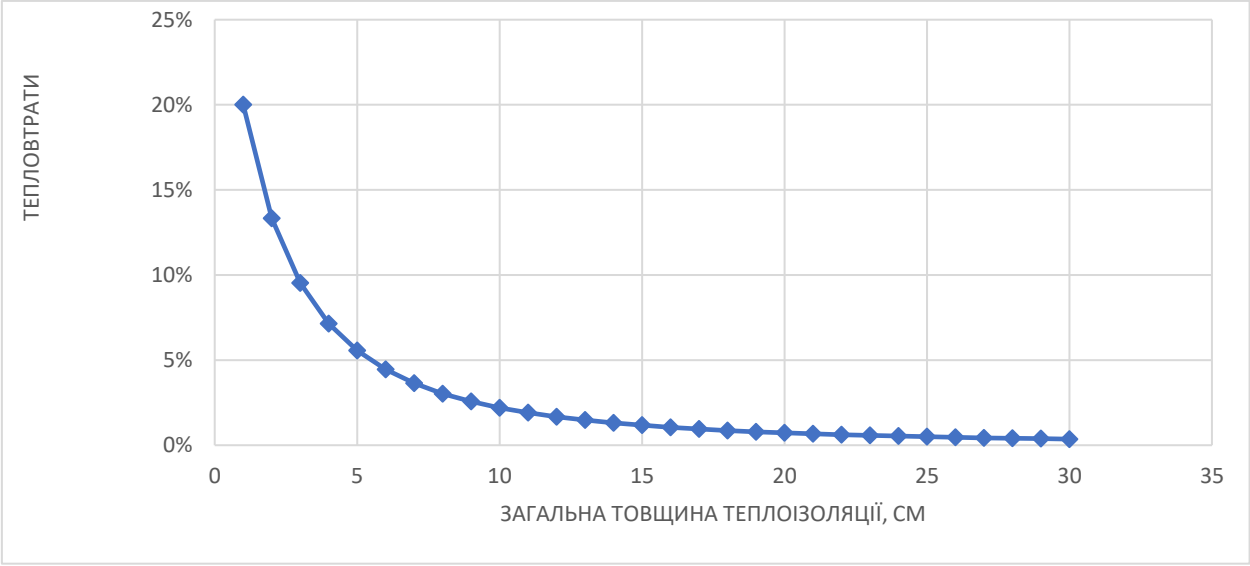


Рисунок 2.8 – Залежність тепловтрат від загальної товщини теплоізоляції

Як видно з наведених рисунків перший сантиметр теплоізоляції заощаджує близько 20 % від існуючих тепловтрат, другий теплоізоляції – 13,33 %, третій – 9,52 %, а десятий сантиметр заощаджує лише 2,20 %.

Таким чином, можна побачити, що комфортні умови для життя/роботи людини залежать від багатьох факторів і теплоізоляційні оболонки допомагають підтримувати енергобаланс в будівлі з меншими витратами енергії від системи опалення, підвищуючи тим самим енергоефективність будівель.

2.2. Використання відновлюваних джерел енергії в будівництві

Застосування відновлювальних джерел в будівництві відкриває великі перспективи для підвищення енергоефективності будівель. Сонячні панелі та колектори, вітрові турбіни, гідротурбіни, теплові насоси тощо можуть виробляти відносно екологічно чисту енергію. Проблема полягає у тому, що видобуток енергії класичними методами з наступник перетворенням або використанням сам по собі є енерговитратним та потребують чимало додаткових ресурсів, наприклад, водних об’ємів і т.д. Для прикладу, для нормальної роботи ТЕС необхідне водосховище, розміри якого забезпечують 5…8 м^2 поверхні за кожен кіловат встановленої потужності, а для АЕС необхідно використовувати водосховища з поверхнею у півтора рази більшою. На кажучи вже про забруднення навколишнього середовища від роботи класичних енергогенеруючих установок. Так, на 1 млн. кВт електричної потужності АЕС викидається у навколишнє середовище не менше ніж 2 млн. кВт теплової потужності, яка у 1,5…1,8 разів більша, ніж на ТЕС. Для будівництва кожного блоку-мільйонника на АЕС потреба у земельних ресурсах становить 600 га, безповоротні витрати води під час експлуатації блоку становлять 30 млн. м^3/рік. Збільшення використання ВДЕ дозволить покращити екологічну ситуацію та більш ефективно перерозподілити ресурси.

Всі енергетичні ресурси на Землі, які є продуктами безперервної діяльності Сонця, можуть бути поділені на дві основні групи: акумульовані природою і, в більшості випадків, не відновлювані та не акумульовані, але постійно відновлювані. До першої групи належать запаси паливних копалин: нафта, кам'яне та буре вугілля, сланці, торф та підземні гази, а також термоядерна та ядерна енергія. До другої групи належать: сонячне випромінювання, вітер, потоки рік, морські хвилі та припливи, внутрішнє тепло Землі. Відновлюваними джерелами енергії називаються ресурси енергії, які постійно циклічно відновлюють енергетичну цінність і можуть бути перетворені на корисну роботу. Інакше кажучи, відновлювані джерела енергії відновлюються постійно, без тимчасових обмежень, тоді як використання традиційних копалин обмежується наявними запасами. Класифікацію відновлюваних джерел енергії наведено на рисунку 2.9.

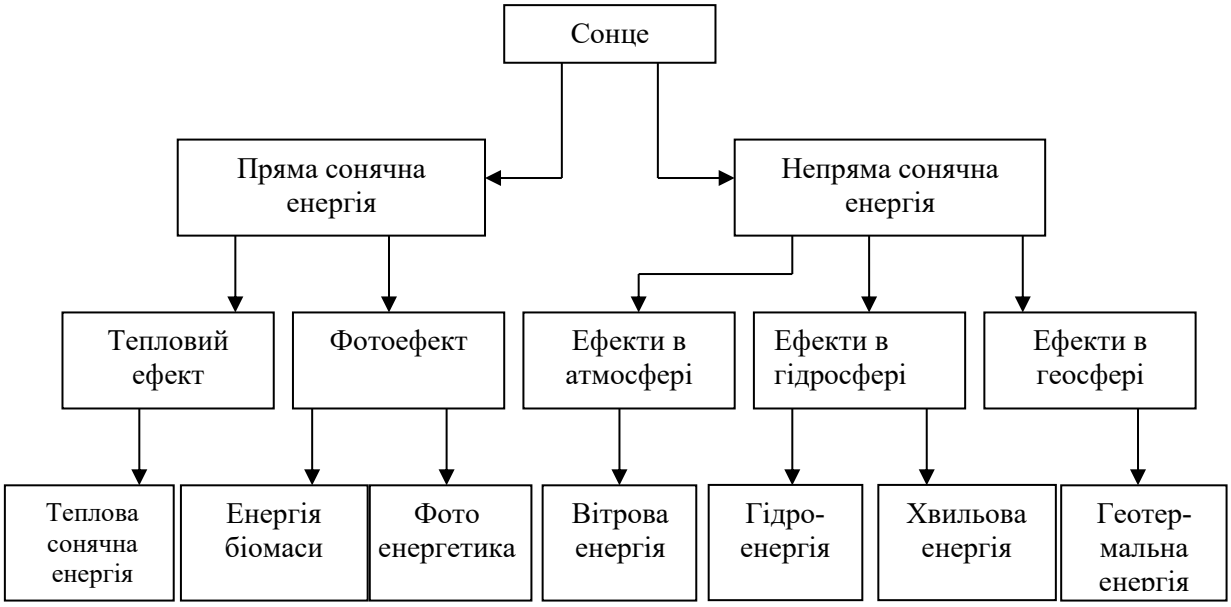


Рисунок 2.9 – Класифікація відновлюваних джерел енергії

Результатами прямої сонячної діяльності є тепловий ефект та фотоефект, внаслідок чого Земля отримує теплову енергію та світло. Результатом непрямої діяльності Сонця є відповідні ефекти в атмосфері, гідросфері та

геосфері, які викликають появу вітру, хвиль, визначають течію річок, створюють умови для збереження внутрішньої теплоти Землі.

Переваги відновлюваних джерел енергії в порівнянні з традиційними:

- вони практично невичерпні;

- не забруднюють довкілля;

- відсутня необхідність у видобутку, переробці та доставці палива;

- немає потреби у використанні води для охолодження, видалення золи, відходів чи продуктів розпаду;

- немає потреби в дефіцитних високотемпературних матеріалах, за винятком сонячних концентраторів теплоти;

- можуть працювати майже без обслуговування;

- немає потреби у транспортуванні енергії.

Основними недоліком більшості відновлюваних джерел енергії є мінливість їхнього енергетичного потенціалу, необхідність значних площ (для сонячних панелей), первинна висока ціна.

Необхідність використання поновлюваних джерел енергії обумовлюється не тільки екологічними загрозами, а і вичерпуванням запасів органічного палива. У той же час в Україні є непогані умови для розвитку відновлювальної енергетики, у тому числі для потреб будівництва.

Дійсно, враховуючи чималу площу дахів і стін будівель, можна сказати, що їх використання дозволить частково або навіть повністю забезпечити себе енергією, а в деяких випадках, якщо це передбачено державними програмами, і продавати надлишки електричної енергії. До речі, багато країн підтримують власників ВДЕ через програми викупу надлишкової електроенергії, що стимулює розвиток відновлюваної енергетики та забезпечує додатковий дохід для громадян [23 – 26]. Наприклад, в Німеччині діє програма «Erneuerbare-Energien-Gesetz» (EEG), яка забезпечує гарантовані тарифи для виробників відновлюваної енергії, що дозволяє продавати надлишки електроенергії за фіксованими ставками, в Італії працює схема «Conto Energia», в Іспанії за програмою «Régimen Especial» є можливість малим виробникам ВДЕ

продавати електроенергію за спеціальними тарифами, у США деякі штати, зокрема Каліфорнія та Нью-Йорк, мають програми «Net Metering», які дозволяють власникам ВДЕ компенсувати спожиту електроенергію за рахунок виробленої та продавати надлишки до мережі, у Канаді, в провінції Онтаріо, впровадили програму «Feed-in Tariff» (FIT) для стимулювання виробництва відновлюваної енергії та викупу її надлишків, в Австралії більшість штатів мають схеми «Feed-in Tariff», які дозволяють домогосподарствам з сонячними панелями продавати надлишкову електроенергію до мережі. В Україні діяла програма «Зелений тариф», яка дозволяла власникам ВДЕ продавати надлишки електроенергії за вигідними ставками. Однак, через економічні та політичні зміни, умови цієї програми зазнали коригувань. Станом на 2024 рік, програма продовжує функціонувати, але з певними змінами в тарифах та умовах. У 2024 році тарифи «Зеленого тарифу» були переглянуті. Для сонячних електростанцій, введених в експлуатацію з 1 січня 2024 року по 31 грудня 2024 року, тариф становить 614,66 коп/кВт·год (без ПДВ). Для вітрових установок, введених в експлуатацію в цей же період, тариф становить 438,40 коп/кВт·год (без ПДВ) [27].

Геліосистеми за призначенням і конструкцією поділяють на дві групи:

1) сонячні колектори;
2) сонячні панелі.

В Україні доцільно використовувати обидві групи. Розглянемо їх.

Сонячні колектори призначені для нагріву води (рис. 2.10). Зауважимо, що на опалення приходиться біля 70 % витрат енергії, на ГВП – біля 15 %, приготування їжі – 8 %, інше – витрати електроенергії. Хоча треба відмітити, що доля електроенергії постійно зростає в різних компонентах: і в опаленні (електрокотли, «теплі підлоги», теплонасоси), і для гарячого водопостачання (електроводонагрівачі), і для приготування їжі (електроплити).



Рисунок 2.10 – Розташування сонячних колекторів

До переваг використання сонячних колекторів можна віднести: немає парникових викидів, економія енергії (газу, електроенергії тощо), довговічність (термін служби сонячних колекторів становить 20…30 років при правильному догляді), енергоефективність (здатні перетворювати до 70…90 % сонячного випромінювання в теплову енергії), широке застосування (встановлювати як у приватних будинках, так на багатоповерхівках та в комерційних чи промислових об'єктах).

Серед недоліків можна відмітити залежність від погодних умов, висока початкова вартість, потребує відносно великої площі, потребує резервної системи, необхідність регулярно догляду (чищення від бруду, пилу, снігу).

Для наочності порівняємо у відсотках витрати на виробництво тепла (100 літрів гарячої води10/45 ^{o}C), враховуючи споживання електроенергії насосом потужністю 30…45 Вт (рис. 2.11). Але заради об’єктивності треба зауважити, що за наявності у домогосподарстві/промисловому об’єкті джерел електричної енергії (сонячних панелей або вітрогенераторів тощо), то ці показники звичайно будуть іншими і електричні нагрівачі з енергетичної точки зору будуть більш вигідними. Крім того, в цій діаграмі порівняння йде за часткою витрат кожної системи, але не враховує диференційності тарифів на електроенергію (наприклад, нічного тарифу).

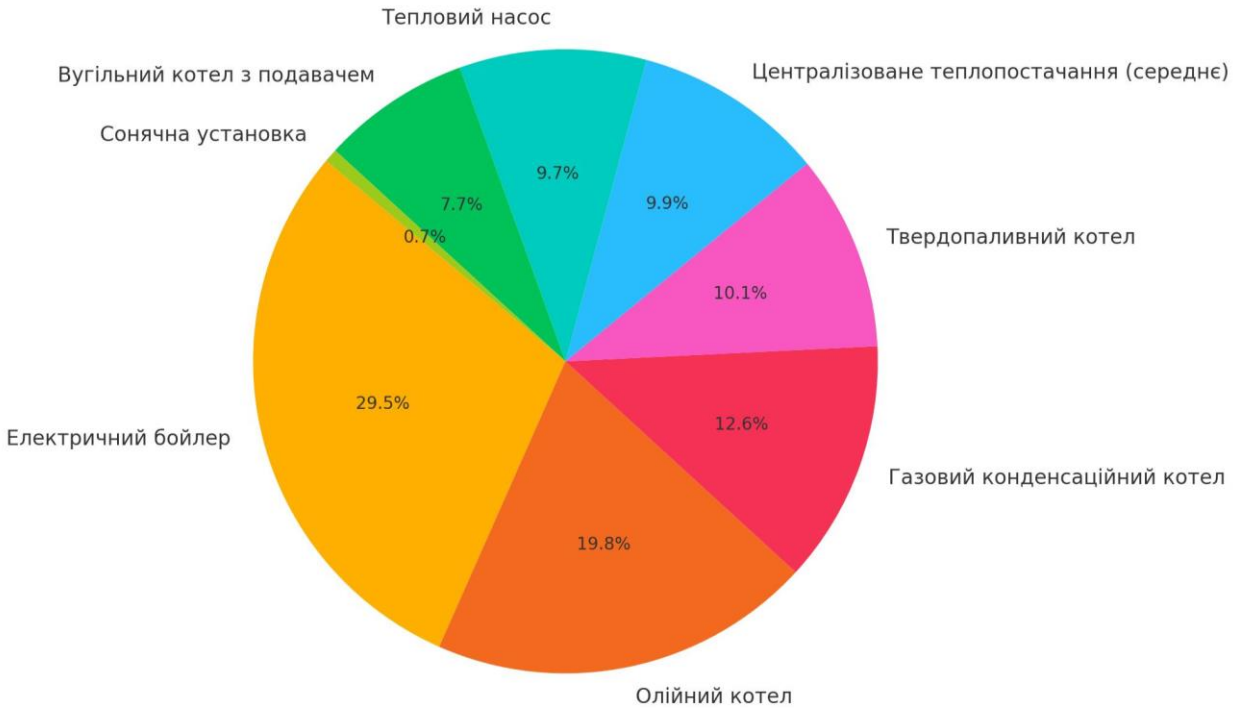


Рисунок 2.11 – Розподіл витрат на нагрів води різними системами

Також сонячні колектори поділяють за видами систем (рис. 2.12).

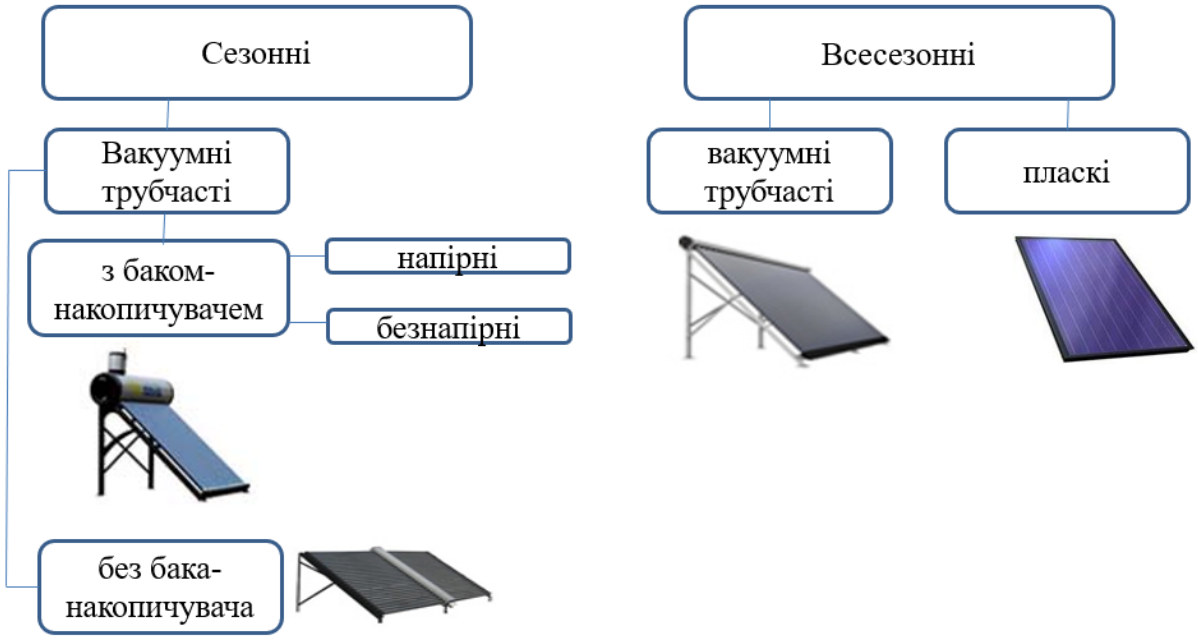
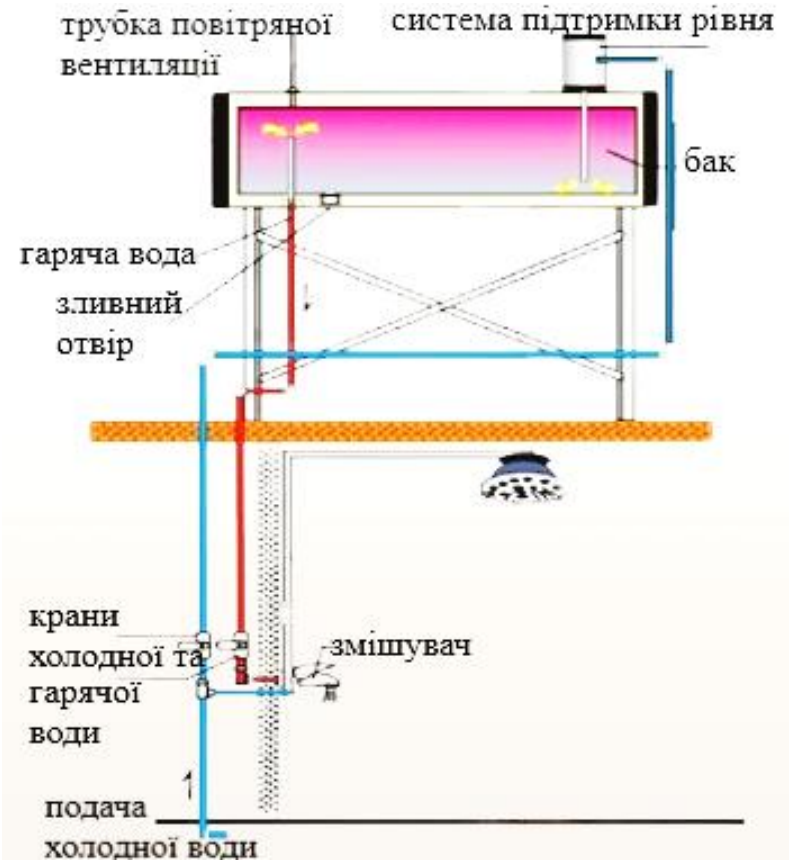


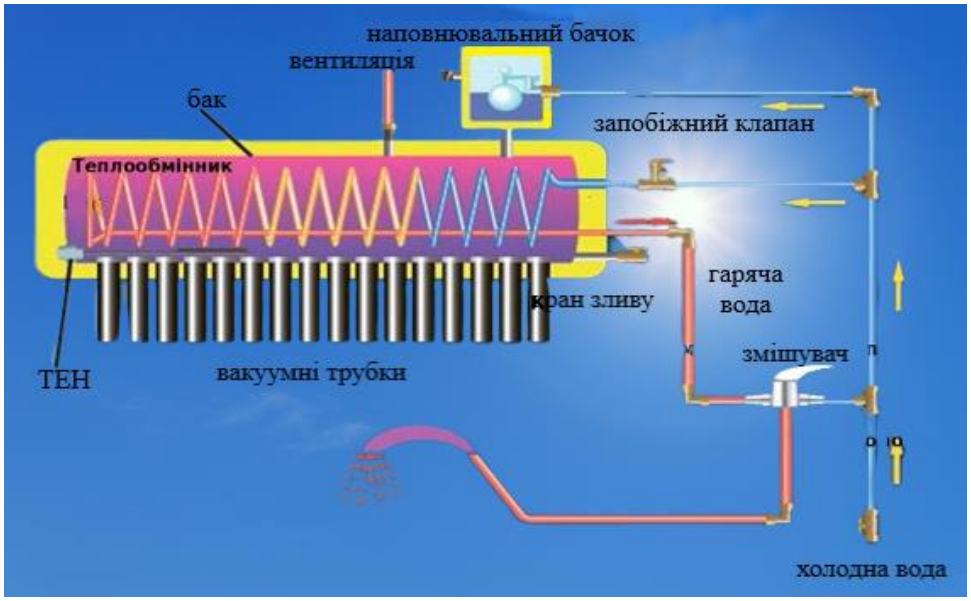
Рисунок 2.11 – Види систем сонячного нагріву води

Вакуумні трубки виготовляють з ударостійкого скла, яке витримує удари граду (до 35 мм), як правило вміщує 10 л води. Для підтримки вакууму використовується барієвий поглинач. Білий колір вказує на відсутність

вакууму в трубці. Сезонні вакуумні трубчасті геліосистеми безнапірні встановлюють вище рівня точки водоразбору, для оптимальної роботи системи – на висоті 4…6 м, для напірних таких обмежень немає (рис. 2.12).



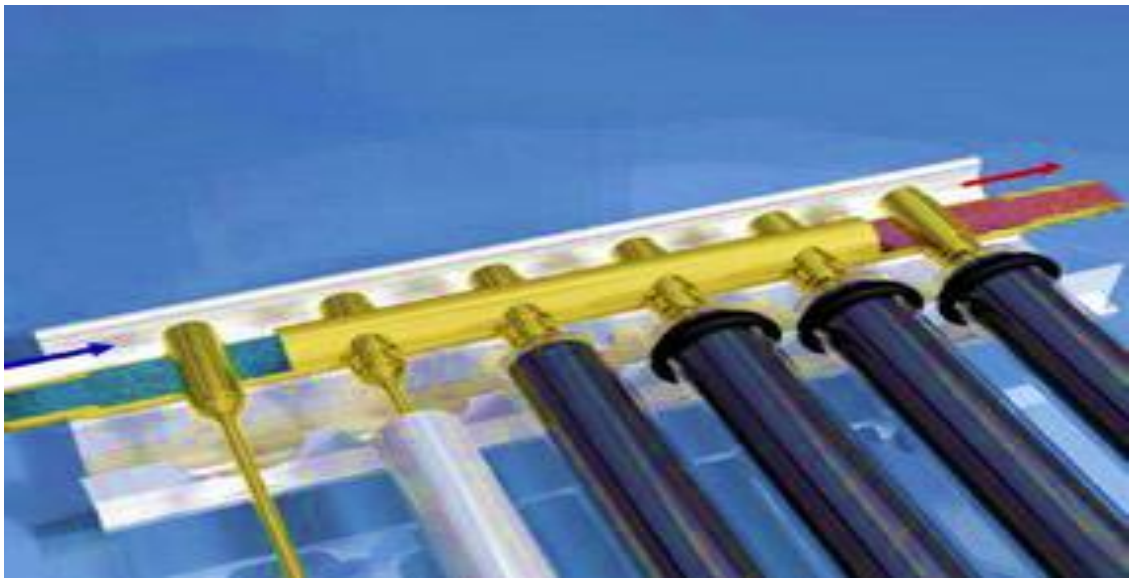
а)



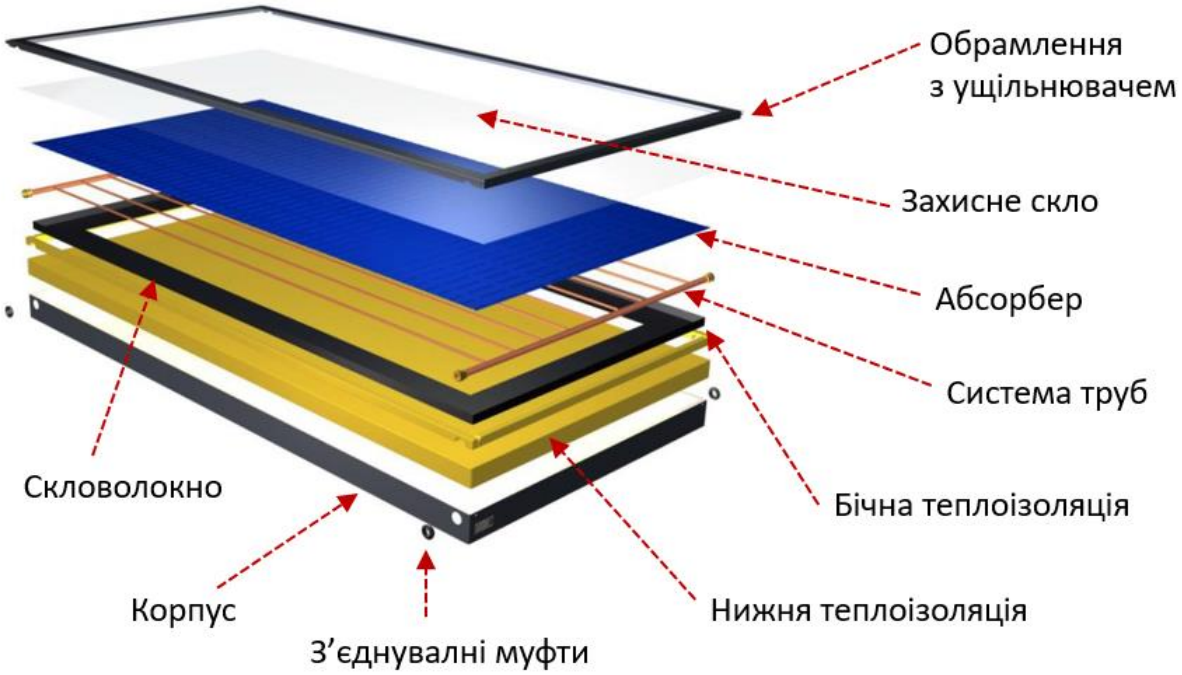
б)

Рисунок 2.12 – Види систем сонячного нагріву води:
а) вакуумні трубчасті геліосистеми безнапірні;
б) вакуумні трубчасті геліосистеми напірні

Конструктивною головною особливістю всесезонної системи є «горяча трубка» (рис. 2.13). Всесезонна геліосистема в зборі наведена на рисунку 2.14.



а)



б)

Рисунок 2.13 – Конструктивні особливості всесезонних сонячних колекторів: а) трубчасті; б) пласкі

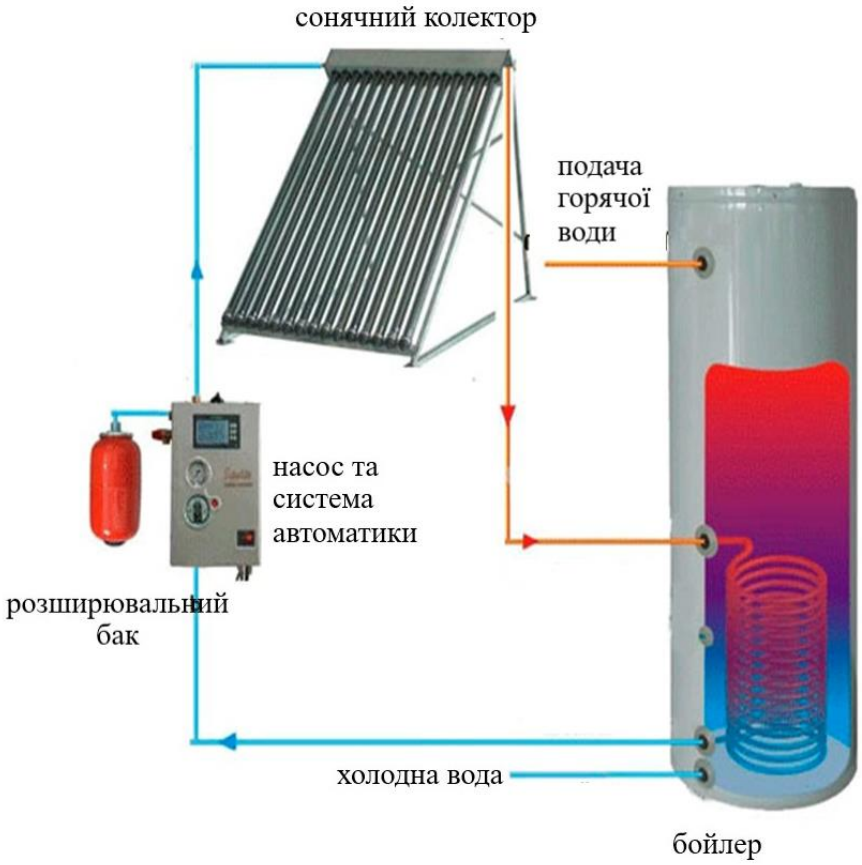


Рисунок 2.14 – Всесезонна геліосистема

У більшості наявних установок середньорічний експлуатаційний ККД колектора становить 40…50 %. Це означає, що для широт близько 30° з 1 м^2 колектора можна отримати 3…5 ГДж теплоти на рік із температурою 60…70 °С. Вартість цієї теплоти, якщо термін служби установки приблизно 30 років, становить 3…4 $/ГДж, як і для централізованих систем опален0ня та гарячого водопостачання. Для більш високих широт сонячні водонагрівачі використовуються в більшості випадків сезонні.

Іншим розповсюдженим застосуванням сонячної енергії є фотоенергетика. Величезною перевагою даних панелей є те, що їх можна розташовувати на дахах, на стінах будівель і навіть на балконах. Більш того, зараз вже є розробки прозорих сонячних панелей, які можна розташовувати на вікнах. Особу позицію займають тонкі гнучкі панелі, які можна буквально клеїти на поверхні, хоча поки що їх ККД варіюється від 7 % до 19 %, залежно від матеріалів (полімери, перовськіти, кремній) та технологій виготовлення

[28]. ККД звичайних сонячних панелей зазвичай становить від 13 % до 17 %, з потенціалом підвищення до 30% при застосуванні спеціальних технологій, таких як використання активного охолодження або застосування спеціальних матеріалів.

Матеріал фотомодулів:

- фотоелементи на основі Si (C, PC/MC, TF, A, NC, String Ribbon);
- фотоелементи на основі арсеніда гіллія GaAs (PC, MC, TF) та фосфіда індія InP (PC);
- фотоелементи на основі теллуріда кадмія Cd-Te (TF);
- фотоелементи на основі деселеніда галлія-міді-індія Cu(In,Ga)Se_2 CIGS (TF);
- фотоелементи на основі шарових структур GaInP -GaAs-Ge, GaInP - GaAs, GaAs-$CuInSe_2$, A-Si – C-Si (TF);
- фотоелементи на основі органічних фарбників полімерів (OPV/ DSC/ DYSC).

Фотомодулі класифікуються за напругою, і це має велике значення для їх використання в різних системах. Основні категорії та характеристики:

1) 12-вольтні фотомодулі. Переважно використовуються у системах із контролерами заряду та акумуляторами:

- автономні системи для будинків;

- зарядні пристрої для акумуляторів.

2) 24-вольтні фотомодулі (вища напруга дозволяє зменшити втрати енергії при передачі):

- застосовуються у середніх системах, наприклад, для будинків із більшою енергопотребою;

- сільськогосподарські системи (наприклад, насоси для води).

3) 48-вольтні фотомодулі та вищі. Їхня висока напруга дозволяє зменшити струм і, відповідно, втрати енергії в кабелях. Використовуються у великих сонячних системах, таких як:

- системи для комерційних будівель;

- великі автономні системи;

- промислові та мережеві системи.

4) Мережеві фотомодулі (високовольтні). Фотомодулі для мережевих систем, які підключаються до інверторів, можуть мати напругу понад 600 В (для ланцюгів із кількох модулів). Використовуються у великих сонячних електростанціях.

5) Напруга відкритого кола (Voc). Кожен модуль має максимальну напругу відкритого кола, яка визначається технічними характеристиками. Наприклад:

- для 12-вольтних модулів Voc ≈ 18…22 В;

- для 24-вольтних Voc ≈ 36…44 В.

Для жилих будинків доцільно використовувати 24-вольтні модулі.

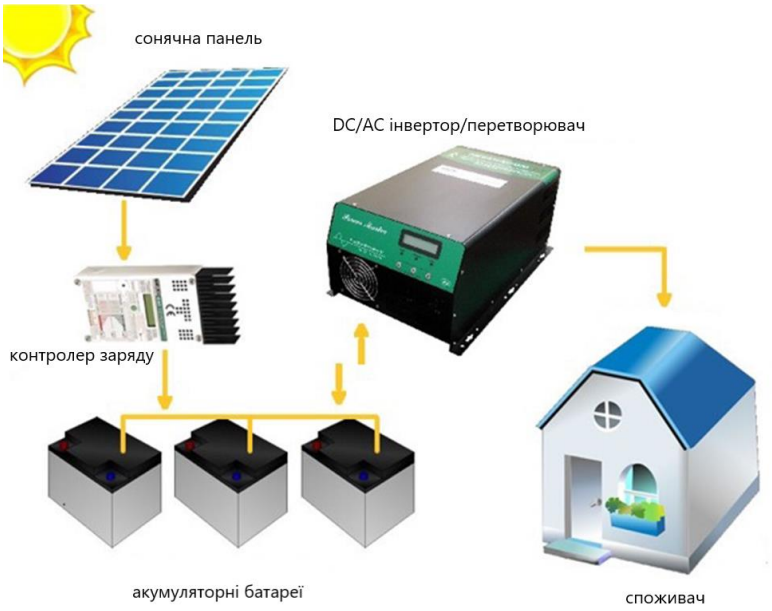
Також сонячні електростанції, які використовують для будівель поділяють за принципом взаємодії з мережею: «On-grid», «Off-grid» та гібридна (рис. 2.15) [29].

Наведемо переваги гібридної системи, яка фактично об’єднує переваги систем On-grid та Off-grid:

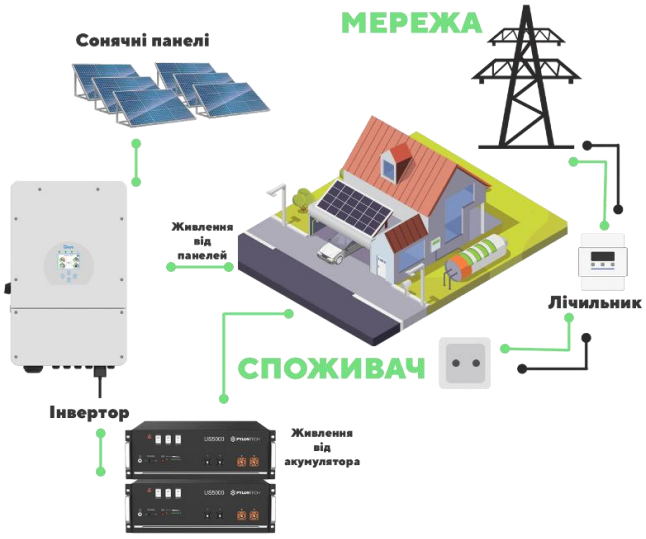
- енергетична незалежність;
- безперебійне живлення (у певних часових межах);
- економічність у довгостроковій прспективі;
- гнучкість і мобільність;
- можливість накопичення і зберігання енергії (Завдяки акумуляторам, система зберігає надлишкову енергію для використання вночі або в похмурі дні. Також можна використовувати сонячну електростанцію вдень і живлення від центральної мережі вночі за нічним тарифом);
- менша залежність від тарифної політики;
- можливість масштабування;
- довговічність і малі експлуатаційні витрати;
- працювати від мережі у разі недостатнього виробництва сонячної енергії;
- здатність повертати енергію в мережу, тобто продавати її.



а)



б)



в)

Рисунок 2.15 – Сонячні електростанції:

а) On-grid; б) Off-grid; в) гібридна

Недоліком гібридної системи є більша вартість, ніж в системах On-grid та Off-grid.

Отже, існують різні варіанти вибору сонячних електростанцій і їх підбір залежить від багатьох факторів. Наведемо приклад вибору деяких рішень шляхом розрахунку вироблення електричної енергії сонячними батареями. Для розрахунку необхідної потужності джерела наведемо деякі потужності побутових приладів (табл. 2.2).

Також зробимо деякі необхідні зауваження. Розрахунок буде проводитися для середньостатистичної багатоповерхівки і приватного домогосподарства, розташованих у м. Дніпро. Сонячна інсоляція для даного міста наведена в таблиці 2.3.

Таблиця 2.2 – Потужність побутових споживачів

Навантаження	Потужність, Вт	Навантаження	Потужність, Вт	Навантаження	Потужність, Вт
1	2	3	4	5	6
Кавомолка	200	Бритва	15	Люм.лампа (екв ЛР 40 Вт)	11
Кавоварка	800	Ноутбук	20-80	Люм.лампа (екв ЛР 60 Вт)	16
Тостер	800-1500	Настільний компютер	100-500	Люм.лампа (екв ЛР 75 Вт)	20
Блендер	300	Принтер струменевий	100	Люм.лампа (екв ЛР 100 Вт)	30
Мікрохвильова піч	600-2000	Електрична друкарська машинка	80-2000	Компактні люмінісцентні лампи 20 Вт	22
Електроплитка	4000-6000	Телевізор 25 дюймів	150	Мала дрель	250
Автоматична пральна машинка	500	Телевізор 19 дюймів	70	Середня дрель	750
Ручна пральна машинка	300	Телевізор 12 дюймів	30	Велика дрель	1000
Пилосос	700-2000	Відеомагнітофон	40	Болгарка	1200

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5	6
Насос	75-400	Електричний годинник	10	Великий холодильник з морозильною камерою	540
Стельовий вентилятор	10-50	Електропіч	3000	Середній холодильник з морозильною камерою	475
Настільний вентилятор	10-25	Компактні люмінісцентні лампи 25 Вт	28	Фен	1200-2000
Електроковдра	200-500	Автоматична пральна машина в режимі нагріву	2000	Фрізер	440
Сушка	1000	Галогенні лампи 40 Вт	40	дзвоник електричний	10
Ручний пилосос	100	Дисковий плеєр	35	Електрична шліфувальна машина	1000
Машинка для бриття	100	Радіо	10-30	Ланцюгова пила	1100
Праска	1000-2000	Радіогодинник	30	Станкова пила	1100
Електросушка для речей	400-2000	Супутникова тарілка	5	Мала дискова пила	900
Газова сушка для речей	300	Принтер лазерний	600	Велика дискова пила	1400

Таблиця 2.3 – Сонячна інсоляція (м. Дніпро), кВт·год/(м^2·добу)

Сонячна інсоляція (NASA)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Середня за рік
	1.21	1.99	2.98	4.05	5.55	5.57	5.7	5.08	3.66	2.27	1.2	0.96	3.36

Вихідні дані:

- потужність сонячної батареї, кВт P = 30;

- коефіцієнт ефективності системи η = 0.8;
- сонячна інсоляція (середня за місяць для м. Дніпро, кВт·год/м²·день) (таблиця 2.3).

Тоді, місячне вироблення електроенергії знаходимо як:

$$E_{міс} = Eінс \cdot P \cdot \eta \cdot N \quad (2.25)$$

де:

Еінс – середня сонячна енергія за день (кВт·год/м²/день);

P – потужність системи (кВт);

η – коефіцієнт ефективності;

N – кількість днів.

Для прикладу зробимо розрахунок місячного вироблення електроенергії (для січня):

$$E_{січ} = 1.21 \cdot 30 \cdot 0.8 \cdot 31 = 900{,}24 \text{ кВт·год.}$$

Для інших місяців зведемо результати розрахунку в таблицю 2.4, а для на наочності покажемо на рисунку 2.16.

Таблиця 2.4 – Розрахунок вироблення електроенергії сонячними батареями

Місяць	Інсоляція, кВт·год/м² · день	Кількість днів	Місячне вироблення, кВт·год
Січень (Jan)	1.21	31	900.24
Лютий (Feb)	1.99	28	1337.28
Березень (Mar)	2.98	31	2217.12
Квітень (Apr)	4.05	30	2916.0
Травень (May)	5.55	31	4129.2
Червень (Jun)	5.57	30	4010.4
Липень (Jul)	5.7	31	4240.8
Серпень (Aug)	5.08	31	3779.52
Вересень (Sep)	3.66	30	2635.2
Жовтень (Oct)	2.27	31	1688.88
Листопад (Nov)	1.2	30	864.0
Грудень (Dec)	0.96	31	714.24

Тоді річне вироблення енергії буде

$$E_{\text{рік}} = \sum E_{\text{міс}} = 29432{,}88 \text{ кВт год}$$

Середньомісячне вироблення енергії буде 2452.74 кВт·год**.**

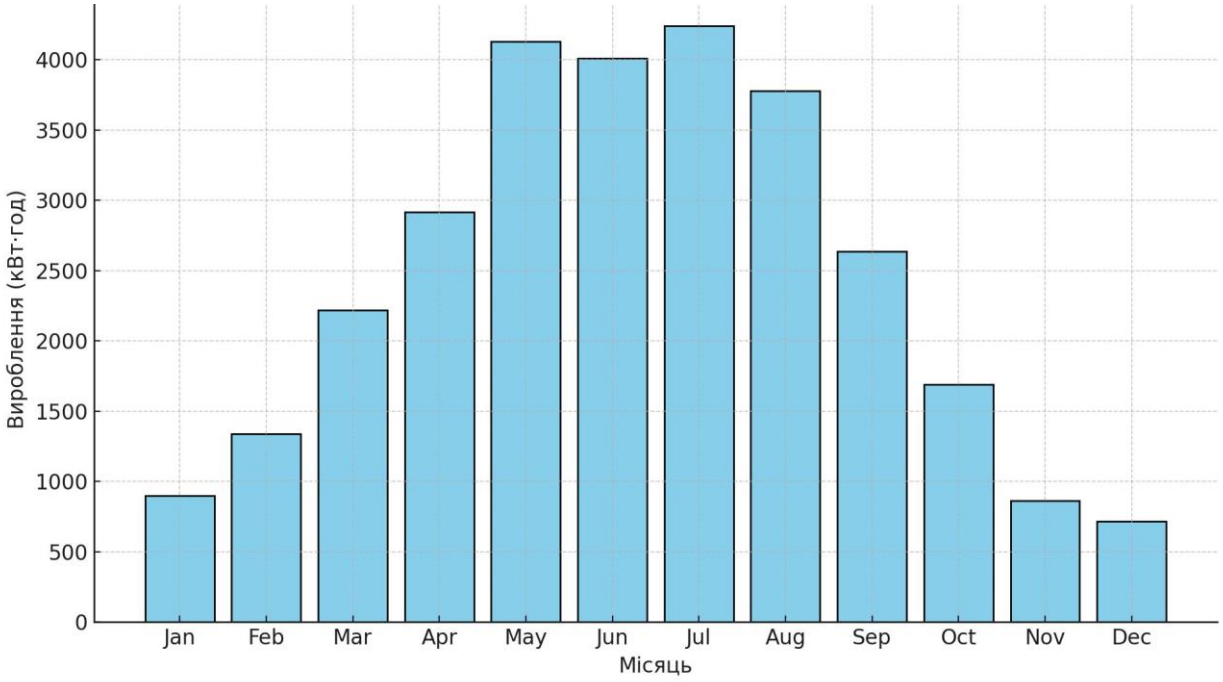


Рисунок 2.16 – Місячне вироблення електроенергії сонячними батареями

Підбір елементів системи. На даний час на ринку присутня велика кількість батарей та обладнання. Заради стислості зауважимо лише головні моменти. Тип обраних панелей – монокристалічні через їх високу у порівнянні з іншими ефективність (до 22 %), займають менше місця порівняно з полікристалічними або тонкоплівковими панелями для досягнення тієї ж потужності. Серед багатьох варіантів обрано модель JA Solar JAM60S10, мають потужність 380 Вт, ККД 20,4 %, габарити: 1776 х 1052 х 35 мм, маса 20,5 кг. Для забезпечення заданої потужності (30 кВт) необхідно:

$$30 \text{ кВт} \cdot 0{,}380 \text{ кВт} = 79 \text{ панелей.}$$

Компанія JA Solar є одним із провідних виробників сонячних панелей, гарантує високу якість продукції та має досвід виробництва панелей. Крім

того, компанія гарантує довгострокову гарантію (до 25 років на вихідну потужність). Також при виборі панелей враховувались кліматичні умови, а самі панелі мають меншу чутливість до високих температур. До того ж, при виборі враховувалося співвідношення «ціна-якість». Хоча монокристалічні панелі трохи дорожчі за полікристалічні, але вони вигідніші завдяки їх високій ефективності та більш тривалому терміну служби.

Гібридний інвертор. Обрано інвертор потужністю 30 кВт, SMA Sunny Tripower 30000TL.

Система управління енергією (EMS) інтегрована в гібридний інвертор для зменшення використання енергії.

Вибір акумуляторних батарей. Обрано тип батарей – літій-залізо-фосфатні ($LiFePO_4$) батареї, оскільки вони відомі своєю довговічністю та безпекою. Для забезпечення автономної роботи протягом 4 годин при повному навантаженні (30 кВт) потрібна ємність: 30 кВт · 4 год = 120 кВт · год.

Отже, було обрано модель BYD Battery-Box Premium LVS з модульною конструкцією, що дозволяє масштабувати ємність.

Розрахуємо орієнтовну вартість системи. Через важкі економічні обставини в країні і нестабільний курс, зробимо розрахунки у євро.

Орієнтовна вартість однієї панелі складає 150 євро. Тоді 79 панелей будуть вартувати 11850 євро.

Гібридний інвертор: SMA Sunny Tripower 30000TL – близько 5,000 євро.

Акумуляторні батареї: BYD Battery-Box Premium LVS з ємністю 120 кВт·год – приблизно 60,000 євро.

Монтажні конструкції, кабелі та інше обладнання коштує орієнтовно 10000 євро.

Отже, загальна вартість обладнання становитиме приблизно 86850 євро.

Вартість встановлення складатиметься з монтажних робіт, пусконалагоджувальних робіт та налаштувань системи (≈ 20000 євро).

Загальні витрати (86850 + 20000) будуть 106850 євро.

При поточні вартості електроенергії і враховуючи річне вироблення електроенергії річна економія складе приблизно 4415 євро.

Тоді орієнтовний строк окупності складе 106850/4415 = 24,2 років.

Врахуємо також наступне. Середнє споживання сім'ї в квартирі складає 200 кВт·год/місяць (при звичайному побутовому використанні), тобто річне – 29432 кВт·год. Це означає, що така система зможе забезпечити всього 12 квартир, а у аварійному режимі 16 – 17 квартир (за умови мінімального споживання електроенергії – до 300 Вт) упродовж 24 годин.

Зауважимо, що при розрахунку економічної складової не враховувався «Зелений тариф», за яким можна продавати електроенергію державі. Також не враховувались варіанти часткової участі держави у співфінансуванні.

Таким чином, можна зробити висновок, що не дивлячись на здавалося б привабливу гібридну систему, встановлювати її за зазначених вихідних умов таку систему встановлювати недоцільно. Це пов'язано перш за все з вартістю обладнання та встановлення. При цьому, акумуляторні батареї, вартість яких чимала, не задовольняють потреб всього дому навіть при аварійному режимі роботи, для забезпечення аварійного живлення під час відключення будинку від центрального енергопостачання. Набагато доцільніше кожному домогосподарству, за потреби звичайно, мати власні джерела безперебійного живлення.

З погляду на зазначене, розглянемо іншу систему, а саме On-grid для тих же вихідних умов. Нагадаємо, що система On-grid має пряме підключення до центральної мережі, може віддавати у мережу надлишок енергії, не має автономності.

Модель сонячних панелей також JA Solar JAM60S10 (380 Вт); кількість панелей – 79 шт.; інвертор SMA Sunny Tripower 30000TL (30 кВт). Відміною є вартість монтажу (≈ 10,000 євро) і додається вартість кабелів і захисного обладнання (приблизно 2000 євро). Розрахункова загальна вартість системи складе приблизно 28850 євро, що значно менше попереднього гібридного варіанту. Розрахунковий термін окупності такої системи складе 8,8 років.

Отже бачимо, що встановлення системи On-grid на 30 кВт в зазначеному місті Дніпро є набагато привабливішим для багатоповерхового будинку. Даний ефект буде підсилений за умови дії програми на кшталт «Зеленого тарифу».

Цікавим також є розрахунок сонячної електростанції для приватного будинку в м. Дніпро. Вихідні умови: підібрати раціональну систему з потужністю 5 кВт.

В результаті розрахунків отримали:

- кількість панелей 13 (монокристалічні, потужність 380 Вт кожна. Модель як і у попередніх варіантах);
- річне вироблення енергії 5000 кВт · год;
- річне споживання домогосподарства: 3600 кВт·год (із розрахунку 300 кВт·год на місяць);
- вартість системи 6473.68 євро;
- вартість встановлення 2000 євро;
- загальна вартість з встановленням 8473.68 євро;
- річна економія 735.82 євро;
- окупність: 11.52 років.

Додамо, що можливість використання «Зеленого тарифи» також не враховувалась. За наявності подібних програм та субсидій на придбання електростанцій, такі системи становляться більш привабливими.

2.3 Перспективи розвитку систем опалення

Одним із перспективних напрямків розвитку системи опалення є, так звані, геотермальні технології, тобто із використанням тепла землі. Раніше дану технологію пов’язували виключно із використанням гейзерних джерел. Проте із розвитком і відносного здешевлення теплових насосів ця технологія зацікавлює все більше коло споживачів.

Головною відмінністю і перевагою даної технології є використання низькопотенціальної енергії оточуючого середовища (землі, води, повітря). З точки зору фізики процесу відбору тепла, такі технології є надзвичайно ефективними. Таке сміливе ствердження ґрунтується на різниці робочих температур: для нагріву води при використанні викопного палива (вугілля, природного газу) температура горіння сягає 700…2000 °С (для вугілля) і 800…1400 °С (для природного газу). У той час як початкова температура джерела тепла для теплового насоса (земля, вода або повітря) становить лише 10…15 °С. Це означає, що для досягнення необхідної нормованої температури для опалення приміщення, яка зазвичай не перевищує 55 °С, потрібно додатково нагріти максимум на 45 °С, а якщо використовується система «тепла підлога», то всього на 15…25 °С.

Порівняємо ефективність найбільш розповсюджених опалювальних систем (рис. 2.17) [31, 32].

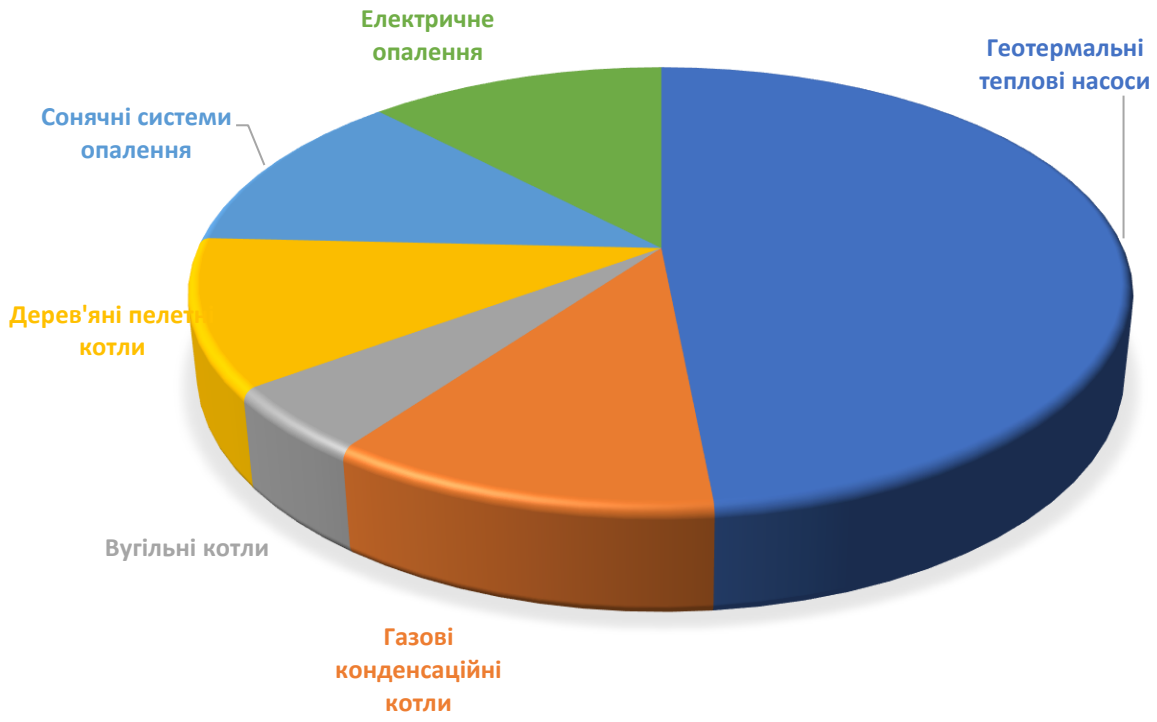


Рисунок 2.17 – Ефективність різних систем опалення

Зауважимо важливий момент щодо понять. Як видно ми спеціально використовуємо термін «ефективність», який по своїй суті відображає ККД системи, для теплових насосів використовується COP (Coefficient of Performance), який може перевищувати 100%. Наприклад, COP = 4 означає, що система забезпечує 4 одиниці теплової енергії на кожну одиницю спожитої електроенергії (ефективність > 100%).

Крім того, важливо враховувати екологічну складову. Так, для вугільних котлів, окрім найнижчого ККД (максимум до 40 %) такі котли мають найгірший вплив на екологію через токсичні викиди та забруднення навколишнього середовища, що змусило низку країн відмовитися від використання ТЕС з вугільними котлами. Електричне опалення є одним із сучасних і ефективних рішень, але проблемним є залежність від стабільного енергопостачання та залишається питання екології – що саме є джерелом електричної енергії (якщо це ті ж самі вугільні котли, то таку систему назвати ефективною точна неможна).

Непоганим поєднанням виглядає комбінація газових конденсаційних котлів з геотермальною системою (на основі теплових насосів). На нашу думку, таке поєднання є найбільш ефективним з енергетичної, економічної і екологічної точок зору.

Доведемо дане ствердження. Для цього розглянемо переваги та недоліки теплових насосів [33].

Переваги теплових насосів:

- висока енергоефективність. Коефіцієнт продуктивності (COP) може досягати 3…5, тобто на 1 кВт спожитої електроенергії виробляється 3…5 кВт тепла;
- екологічність;
- можуть використовувати відновлювану енергію з навколишнього середовища (землі, води, повітря);

універсальність: такі системи можуть використовуватися для опалення або охолодження приміщень та нагріву води;

- довговічність: середній термін служби складає 15…20 років, особливо при правильному обслуговуванні;
- зниження експлуатаційних витрат: у довгостроковій перспективі забезпечують менші витрати на опалення/охолодження в порівнянні з газовими чи електричними котлами;
- безпека: відсутність згоряння палива робить їх безпечнішими;
- можливість інтеграції з іншими системами.

Недоліки теплових насосів:

- висока початкова вартість: витрати на встановлення такої системи значно перевищують витрати на традиційні системи опалення (наприклад, газовий котел);
- залежність від клімату: ефективність повітряних теплових насосів знижується при низьких температурах зовнішнього повітря (< -15 °C). Це означає, що для регіонів із більш холодним кліматом потрібна додаткова система опалення;
- потребує місця для встановлення. Мається на увазі площа для занурення в землю;

складність монтажу. Даний пункт пов’язаний із попереднім і вимагає професійного проєктування та монтажу, що підвищує загальні витрати;

- енергоспоживання: для роботи компресора теплового насосу потрібна електроенергія;
- потребує регулярного технічного обслуговування.

Як відомо, теплові насоси класифікуються за джерелом тепла та типом енергообміну. Основні види теплових насосів: повітряні; ґрунтові; водяні; гібридні.

Повітряні теплові насоси використовують тепло зовнішнього повітря для нагріву чи охолодження. Причому, вони поділяються за типами, а саме повітря-повітря (забирають тепло з зовнішнього повітря і передають його для обігріву повітря в приміщенні) та повітря-вода (нагрівають воду для системи опалення або гарячого водопостачання). До переваг такої системи можна

віднести простоту монтажу та відносно невисока вартість. Головним недоліком, що значно обмежує спектр використання таких систем є зниження ефективності при температурах нижче -15 °С.

Ґрунтові теплові насоси використовують тепло землі через вертикальні або горизонтальні геотермальні зонди. Вони передають тепло в систему водяного опалення. Перевагою такої системи є висока стабільність роботи, оскільки температура землі залишається стабільною протягом року та найвища ефективність у порівнянні з іншими. Недолік очевидний, а саме висока вартість установки, потребує значної площі для встановлення зондів.

Водяні теплові насоси використовують тепло ґрунтових або поверхневих вод (річки, озера, колодязі) та передають його в систему водяного опалення. Перевагою є стабільна температура джерела (ґрунтові води мають стабільну температуру протягом року). Недоліком є прив’язка до джерел води. Крім того, якщо це відкриті водойми, то їх температура нижча у порівнянні з ґрунтовими.

Гібридна система з тепловим насосом поєднує кілька джерел тепла для підвищення ефективності. Такі системи забезпечують стабільну роботу навіть у суворих кліматичних умовах. Але вони є більш складними та мають високу вартість (рис. 218).

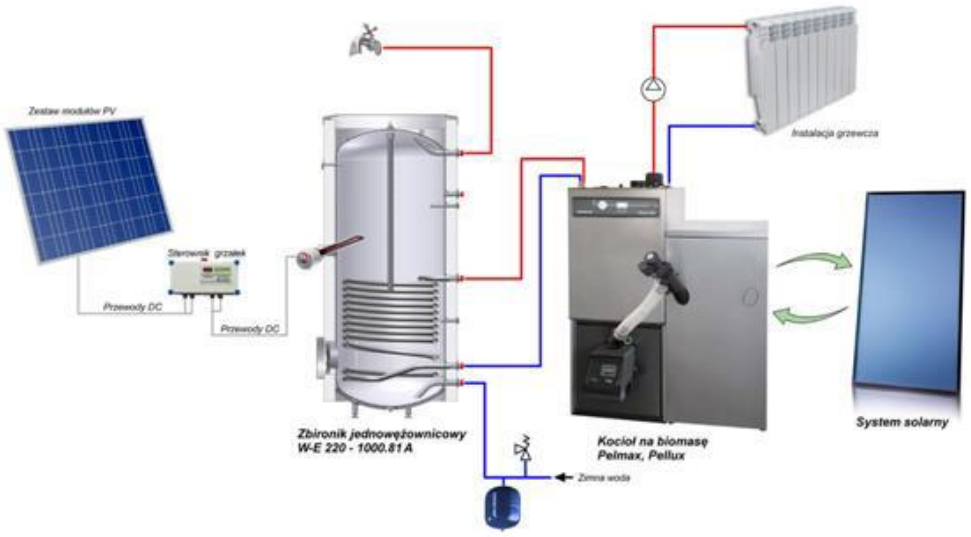
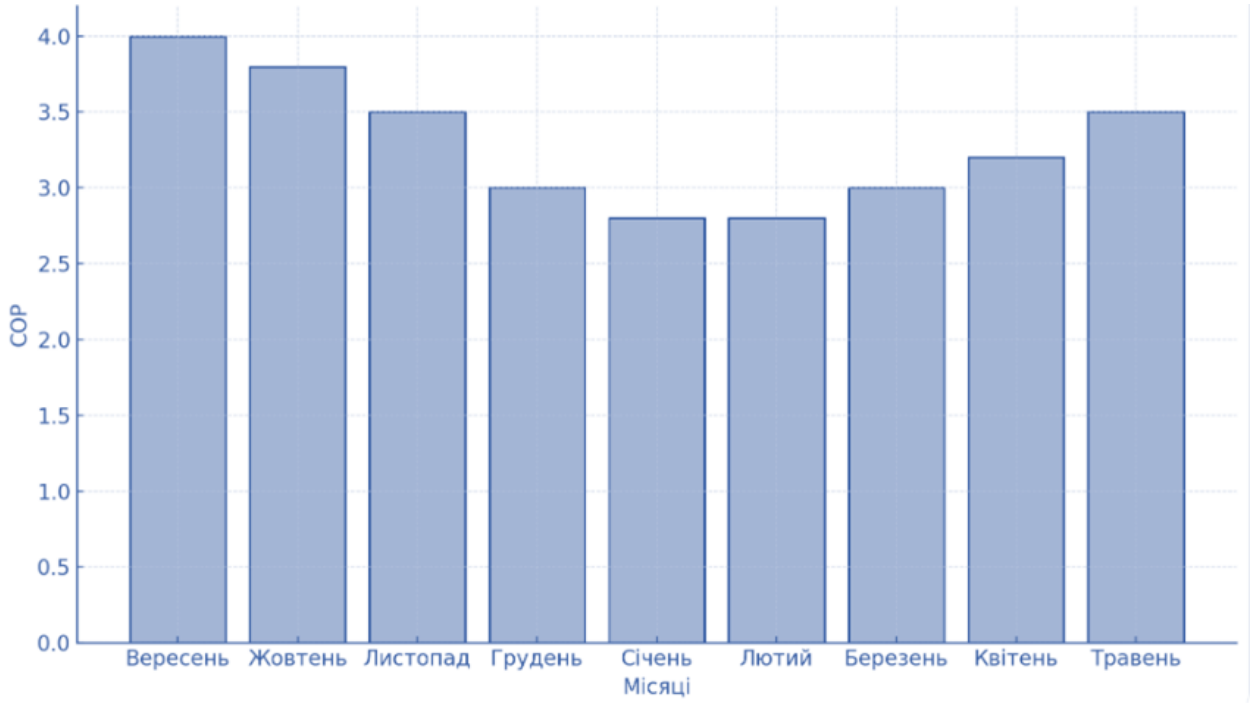
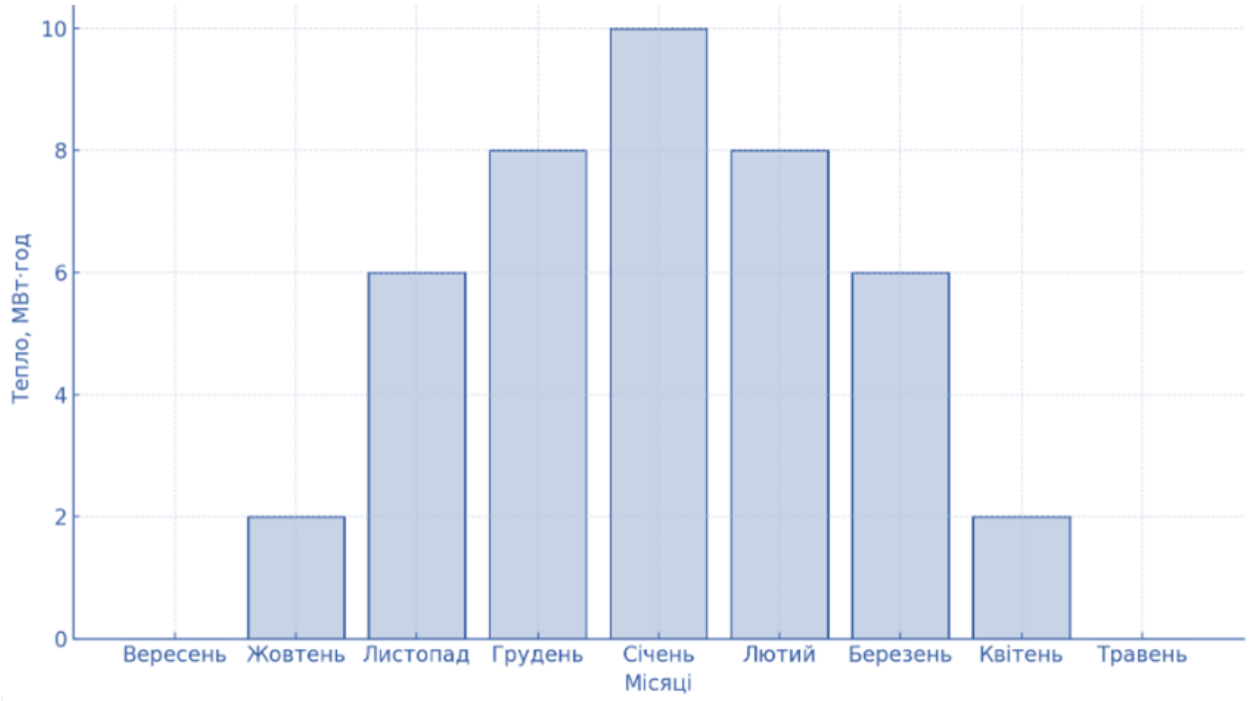


Рисунок 2.18 – Гібридна система теплопостачання (тепловий насос і сонячні батареї)

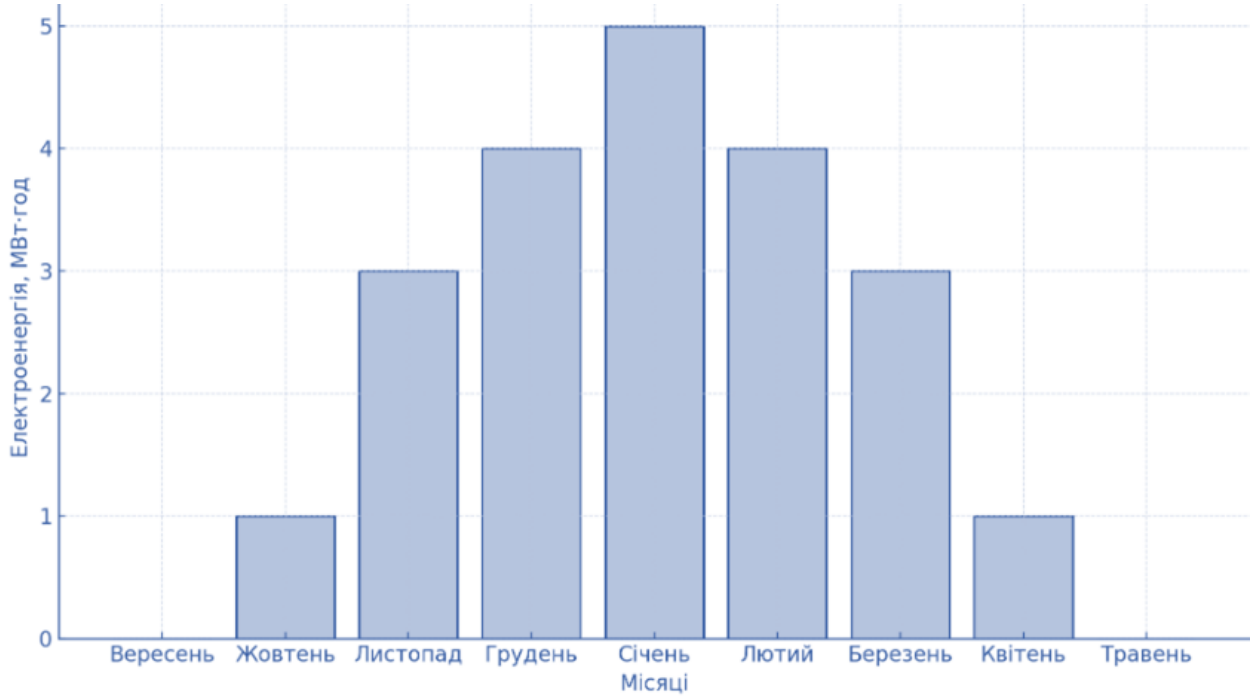
Наведемо розрахунок опалювальної системи з використанням теплових насосів для таких же умов, що і у попередньому підрозділі (9-ти поверховий будинок, м. Дніпро). Для цього врахуємо характеристики ТН на підставі статистичних даних (рис. 2.19).



а)



б)



в)

Рисунок 2.19 – Характеристики ТН за опалювальний період:

а) зміна середнього значення СОР ТН в залежності від місяця року;

б) теплова продуктивність ТН в залежності від місяця року

в) споживання електроенергії ТН в залежності від місяця року

Для розуміння логіки вибору опалювальної системи зробимо деякі уточнення. Проаналізувавши наявну інформацію про ТН і враховуючи кліматичну зону, в якій знаходиться місто Дніпро було обрано гібридну систему. Даний вибір ґрунтується на такій підставі. По-перше, у пікові навантаження тепловий насос може не забезпечити потрібного обсягу тепла. Крім того, багатоповерхівки мають значно більші втрати тепла у порівнянні з приватними будинками через наявність під'їздів, ліфтів, коридорів тощо. По-друге, високі тарифи на електроенергію роблять використання тільки ТН у низці випадків сумнівним. За оцінкою дослідників використання ТН у комбінації з, наприклад, газовою установкою у пропорції 70 % на 30 % є найбільш оптимальним. Диверсифікація джерел тепла робить опалювальну систему більш гнучкою та надійною. Наприклад, через постійні терористичні

обстріли росією нашої енергетичної системи, остання має перебої в постачанні електроенергії. Таким чином інше (неелектричне) джерело виконує також роль резервного. Також врахуємо, що газова інфраструктура в Україні добре розвинена, а при нарощуванні видобутку власного газу, його застосування буде ще більш енергетично і екномічно доцільним у якості ланки гібридної опалювальної установки.

До того ж, якщо ми розглядаємо перспективну опалювальну систему, то її можна зробити з трьох компонентів: тепловий насос + конденсаційний газовий котел + сонячні батареї (дахову сонячну електростанцію для такого будинку було розраховано у підрозділі 2.2). Проте, розглядати гібридну опалювальну установку у комбінації ТН + сонячні панелі, на нашу думку, недоцільно через нестабільні погодні умови, особливо взимку. Логічно, що сонячна електростанція може розглядатися лише як доповнення до основної системи.

Спочатку було розглянуто гібридну систему з повітряним ТН та газовим котлом. Такий першочерговий вибір був пов’язаний з мінімальними монтажними витратами і меншою вартістю самої системи.

За умови середнього споживання теплової енергії для опалення на рівні ≈ 60…100 кВт·год/м² місяць (залежно від ізоляції та погоди) і загальної площі розглядуваного будинку ≈ 3600 м², місячне споживання тепла буде 216000…360000 кВт·год/місяць. Розрахункове гаряче водопостачання (ГВП) для розглядуваного будинку складає приблизно 5400 літрів/день. Для нагрівання до 55…60 °C потрібно близько 250…300 кВт·год/день або 7500…9000 кВт·год/місяць.

Приймаємо, що при зниженні температури повітря нижче - 15 °C включається газовий котел. COP повітряного ТН дорівнює 3…3,5 при температурі повітря – 5…5 °C.

Вартість повітряного ТН на 70 кВт складає приблизно 50000 євро, газового котла ≈ 10000 євро, монтаж і налаштування ≈ 15000 євро.

Для забезпечення 50 % теплових потреб за COP = 3:

180000/3 = 60000 кВт год/міс.

Тоді в місяць необхідно витрати 60000 · 0,15 = 9000 євро.

Для газу при ККД 0,95:

180000/0,95 = 189474 кВт · 0,05 = 9474 євро/міс.

Отже місячні експлуатаційні витрати на гібридну систему складуть ≈ 18500 євро.

Строк окупності такої системи складе майже 15 років. Причому було проведено декілька розрахунків і виявилося, що для кліматичних умов м. Дніпро на даний момент більш вигідне використання пропорції 50/50. Це можна пояснити тим, ціна на електроенергію ми брали без нічних тарифів, тобто по повній ціні.

Отриманий строк окупності показує невигідність застосування такої системи для зазначених умов. Можливо це пов’язано з відносно невисоким COP ТН і необхідністю через це більш високих капіталовкладень в придбання теплового насосу більшої потужності.

Розглянемо інший варіант, а саме гібридну установку ґрунтовий ТН + конденсаційний газовий котел. Вихідні умови ті ж самі. Додамо, що середню температуру ґрунту для даної кліматичної зони беремо 10 °С.

Звичайно таку систему краще облаштовувати на етапі проектування і будівництва, але ми беремо умови, коли будинок вже експлуатується. Ґрунтовий ТН дозволяє зменшити вихідну потужність до 50 кВт через більш високий COP (4,5). Тоді газовий котел для покриття пікових навантажень можна прийняти 20 кВт (ККД 0,95).

Орієнтовна вартість ТН складає 40000 євро (як бичимо через меншу потужність менша і вартість насоса). Газовий котел – приблизно 8000 євро. Монтаж мінімум 25000 євро. Отже загальна вартість установки буде щонайменше 73000 євро.

За таких умов ТН зможе покривати вже 75 % потреб, тобто:

2016000 · 0,75 = 1512000 кВт год/рік.

Витрати електроенергії для ТН складе 1512000/4,5 = 336000 кВт /рік.

А вартість складе

$$336000 \cdot 0{,}15 = 50400 \text{ євро/рік.}$$

Для газового котла (покриття 25 % потреб):

$$2016000 \cdot 0.25 = 504{,}000 \text{ кВт год/рік}$$

Енергія газу:

$$504000/0.95 = 530526 \text{ кВт год/рік}$$

Вартість знаходимо як:

$$530{,}526 \quad 0.05 = 26{,}526 \text{ євро/рік}$$

Тоді загальні витрати складуть:

$$50400 + 26526 = 76926 \text{ євро/рік}$$

Якщо порівнювати з чисто газовою системою, то щорічна економія складе 29179 євро.

За таких умов строк окупності складе:

$$73000/29179 = 2{,}5 \text{ роки.}$$

У даному випадку строк окупності показує привабливість встановлення подібної гібридної системи. А якщо будуть застосовані нічні тарифи (за умови їх наявності), то така система стає ще більш ефективною. Але треба враховувати, що будинок потребує енергетичного аудиту зі складанням енергетичного паспорту будівлі та якісної теплоізоляції.

Для опалювальної системи було обрано такі компаненти:

- ґрунтовий тепловий насос Ground Source Heat Pump, GSHP;
- вертикальні геотермальні зонди;
- холодоагент – екологічно безпечний, марки R410A або R407C;
- конденсаційний газовий котел Vaillant ecoTEC Plus або рівноцінний Bosch Condens GC.

Також елементом модернізаціє є прибудова мінікотельні, де буде розташоване перелічене обладнання. У розрахунках і описі не враховані питання, пов’язані з отриманням відповідних дозвільних документів, оскільки ці питання не входять в коло розглядуваних задач.

3 ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО БУДІВНИЦТВА В УКРАЇНІ

3.1 Стан та виклики для енергоефективного будівництва в Україні

На даний час будівельний сектор в Україні є одним із найбільших споживачів енергії, приблизно 40 % від загального енергоспоживання країни. Значна частина житлового та комерційного фонду побудована до 1990-х років і не відповідає сучасним стандартам енергоефективності. Як було зазначено у першому розділі, з 2017 року в Україні діють нові вимоги до енергоефективності будівель, включно з імплементацією Директиви 2010/31/ЄС, удосконалюється нормативно-правова база, введено класи енергоефективності для оцінки споживання енергії, обов’язкове енергетичне сертифікування новобудов тощо. Також було наведено програми підтримки від держави та міжнародних організацій, проводиться популяризація «зелених» будівель.

Проте чимало питань ще необхідно вирішити для широкого впровадження енергоефективних технологій. Розглянемо їх.

Умовно фактори, які впливають на енергоефективність будівель можна розділити на кліматично-географічні, технологічні та організаційно-економічні, хоча безумовно, вони пов’язані між собою. Україна знаходиться у Східній Європі і має помірно-континентальний клімат, а у південних регіонах, зокрема в зоні Причорномор’я та Криму, клімат наближається до субтропічного середземноморського. Взимку температура може досягати 30 С мороза, а влітку температура може триматися більше 40 С в тіні. Ці спостереження показують ті виклики, з якими стикаються будівельники та енергетики. Тобто необхідно вирішувати проблеми обігріву та охолодження будівель, знаходити енергоефективні рішення. Крім того при проектуванні ВДЕ необхідно враховувати кліматичну зону і середні погодні умови в цій зоні. Наприклад, якщо південні регіони мають значний потенціал для сонячної

енергетики, то можливості для вітрової енергетики знаходяться переважно у степових і прибережних районах. За підтримки Європейської комісії, PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) створила карту потенціалу сонячної енергії та річну інсоляцію для України (рис. 3.1). Але треба враховувати, що потужність сонячного випромінювання на поверхні Землі за стандартних умов може коливатись від 0 до 1000 Вт/м^2.

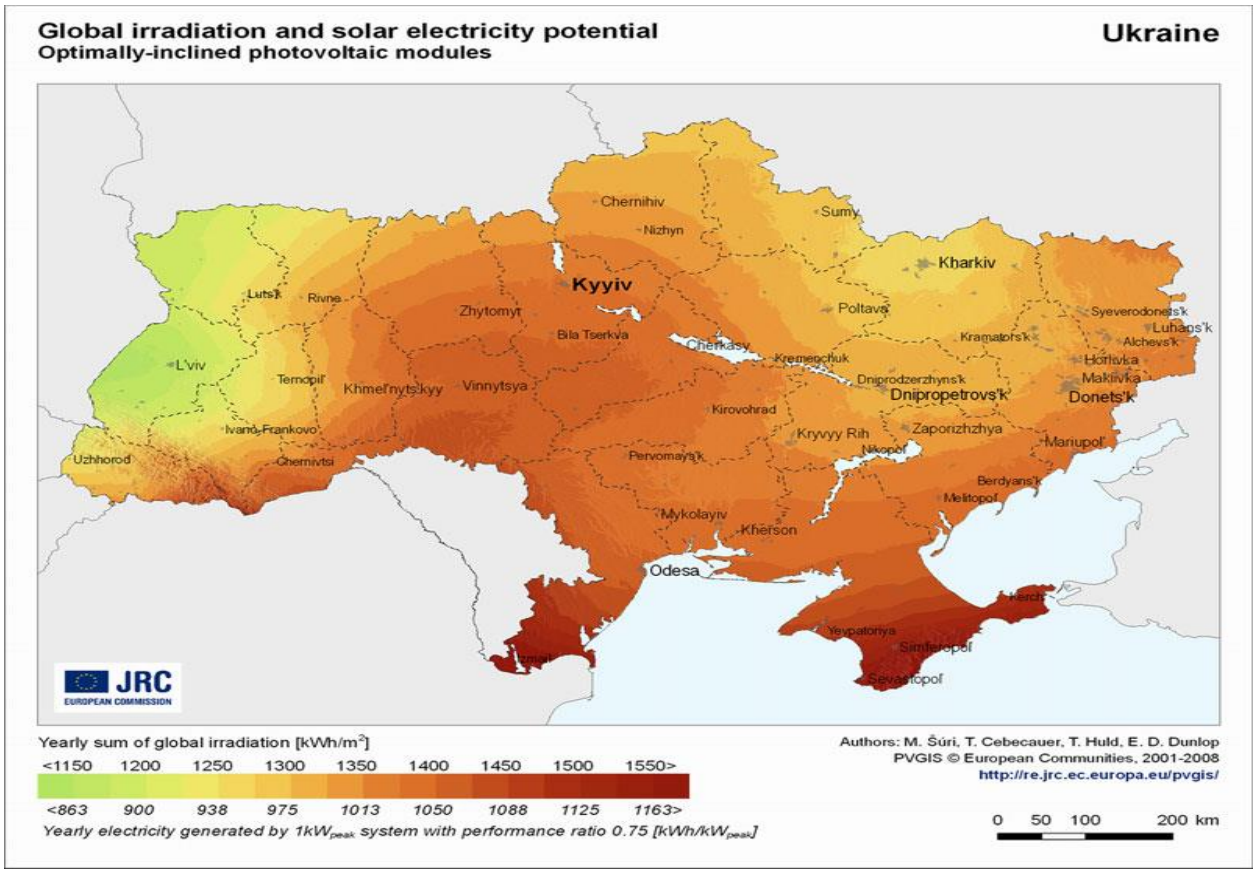


Рисунок 3.1 – Географічні та кліматичні фактори (за даними PVGIS)

Зрозуміло, що на географічні фактори ми впливати не можемо. Щодо впливу на погоду, то такі технології можливі, але у перспективі і в цій роботі не розглядаються.

Фактори, на які ми можемо впливати – це організаційно-економічні та технологічні. До організаційно-економічних, на нашу думку, можна віднести всі юридичні питання, починаючи від законів і закінчуючи рішеннями на рівні ОСББ, фінансово-економічні питання та інше.

Щодо правових аспектів, то не дивлячись на оновлення правової бази для енергоефективного будівництва, деякі положення залишаються декларативними. Недостатній контроль за дотриманням енергоефективних стандартів під час будівництва.

Однією з головних проблем є відсутність достатнього бюджету для впровадження програм енергоефективності, що відноситься до економічної складової. Як ми бачили у зроблених розрахунках (розділ 2), вартість енергоефективних матеріалів та технологій є високими або дуже високими. Без фінансової підтримки держави багатьом місцевим громадам вкрай важко впроваджувати такі програми. Часто дане становище обтяжується тим, що старий житловий фонд часто не дозволяє впровадити сучасні рішення без значних попередніх капітальних вкладень.

До інших факторів можна віднести недостатню обізнаність населення, нерозуміння довгострокових перспектив і вигод від впровадження зелених технологій, недостатність професійних кадрів, відсутність дієвої системи енергоменеджменту як в промимловості так і в ЖК секторі.

Технологічні фактори. Україна на даний момент має високу енергоємність ВВП (це показник, що відображає кількість енергії, яка витрачається для виробництва одиниці валового внутрішнього продукту (ВВП). Його вимірюють у тоннах нафтового еквівалента (т. н.е.) на 1000 доларів США). Це звичайно для нашої країни є проблемою, оскільки даний фактор впливає на конкурентоздатність нашої промисловості і споживання енергії житловим фондом (рис. 3.2, табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Порівняння енерговитратності

Країна	Енерговитратність, кВт *год / м^{2}рік
Швеція	30…60
Німеччина	50…100
Польща	120…160
Україна	210…300

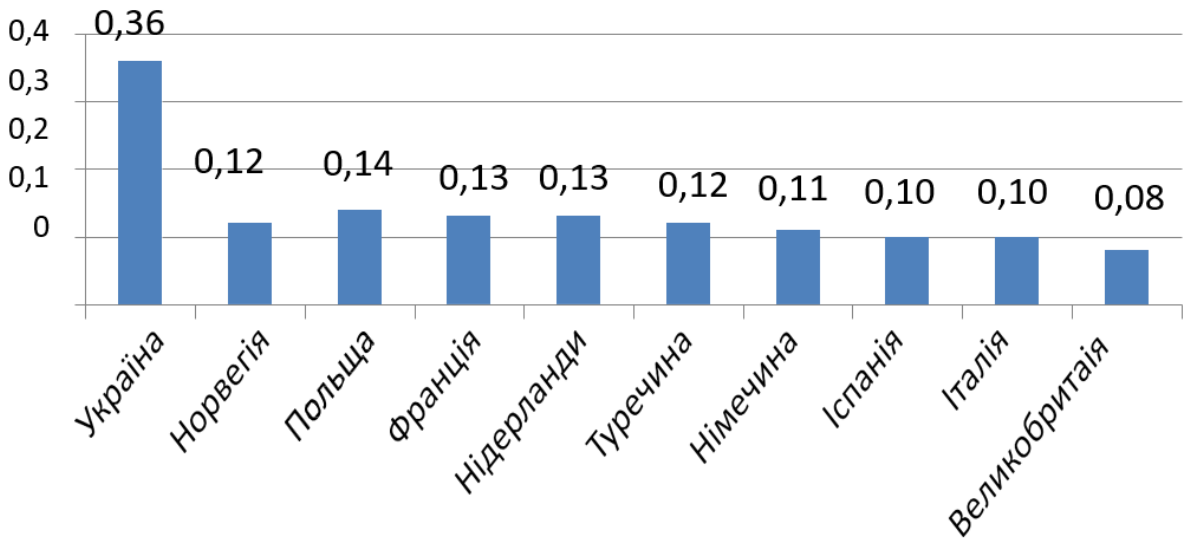


Рисунок 3.2 – Енергоємність ВВП, т. н.е. /тис. дол. США

Багато у чому проблема високої енергоємності і енерговитратності тягнеться ще з часів срср, коли до природи ставилися варварськи, про енергозбереження ніхто з керівництва не думав.

Ситуацію значною мірою обтяжує російська агресія проти нашої країни. В результаті терористичних обстрілів нашої енергосистеми, наша країна стикнулася з дефіцитом електроенергії, змушеними її відключеннями та зростанням тарифів. Зараз чимало ресурсів витрачається державою на відновлення пошкоджених будівель, побудови тимчасових прихистків, відновлення енергетичних спроможностей.

Отже, у майбутнєму єнергоефективне будівництво в Україні має значний потенціал, але має чимало викликів, такими як фінансові бар'єри, недосконала інфраструктура та недостатня обізнаність населення. Незважаючи на це, Україна рухається у правильному напрямку, намагається навіть у таких надважких умовах впроваджувати рішення на різних рівнях. У той же час необхідно визнати, що без міжнародної підтримки досягти поставлених цілей буде вкрай складно. Крім того, враховуючи комплексність проблеми необхідно зосередитися на поєднанні державних ініціатив, приватних інвестицій та освітніх програм.

3.2 Перспективні напрямки розвитку енергоефективних технологій для будівельної галузі

На даний час завдяки досліджень науковців виникає багато технологічних можливостей щодо енергоефективності в будівництві. Причому, ці розробки можна буде використовувати і в Україні. До основних інноваційних технологій можна віднести:

- високоефективні теплоізоляційні матеріали;
- енергозберігаючі віконні технології;
- розумні технології;
- пасивні будівлі;
- відновлювальні джерела енергії;
- удосконалені системи вентиляції;
- енергоефективні будівельні конструкції;
- цифровізація та BIM (Building Information Modeling);
- реконструкція та модернізація старих будівель.

Кожна з перерахованих технологій заслуговує на увагу і може бути предметом подальшого аналізу і окремого розгляду і деякі з цих технологій було розглянуто вище. Тому задля стислості деякі пункти розглянемо коротко, а деякі більш детально.

Енергозберігаючі віконні технології дозволяють зменшити втрати енергії через вікна. Інноваційними рішеннями є склопакети з низькоємісійним покриттям (Low-E), вакуумні вікна, смарт-скло (здатне змінювати прозорість залежно від температури чи освітлення). Наприклад, вікна з вольфрамом, доповненим оксидом ванадію, знижують теплообмін у приміщенні шляхом блокування довгохвильового інфрачервоного випромінювання в гарячу пору року та пропускання тепла в холодну пору [34]. Цей тип смарт-скла зменшує потребу в кондиціонуванні та опаленні, автоматично адаптуючи теплоізоляційні властивості вікон до зовнішніх умов. У будівлях такі вікна допомагають знизити енергетичні витрати до 30 %, блокуючи інфрачервоне

випромінювання влітку і пропускаючи його взимку, коли потрібний додатковий обігрів приміщень. Розумним його називають тому, що коли температура піднімається до певного порогу, матеріал змінює фазу, а саме переходить від прозорого до непрозорого або зменшує пропускання інфрачервоного світла. Цей процес відбувається пасивно, тобто автоматично під впливом температури без додаткової електричної енергії.

Полімер-дисперсні рідкокристалічні (PDLC) вікна складаються з рідкокристалічної плівки, що забезпечує зміну прозорості залежно від прикладеної напруги. Цей тип скла дозволяє регулювати кількість світла та тепла, що надходить до приміщення, знижуючи витрати на освітлення та кондиціонування [35]. PDLC-вікна працюють на основі технології рідких кристалів, які змінюють свою орієнтацію під дією електричного струму. У вимкненому стані кристали розташовані хаотично, розсіюючи світло, і вікно виглядає матовим або непрозорим. При подачі напруги кристали вирівнюються паралельно, дозволяючи світлу проходити через скло. Цей процес є зворотнім і швидким, що дозволяє легко контролювати прозорість вікон. Цікаво, що такі вікна зручно використовувати в офісах для адаптації простору. Наприклад, протягом дня вікна можуть бути прозорими для забезпечення денного світла, а в моменти, коли потрібна приватність, вони швидко стають непрозорими. Це рішення не тільки сприяє економії електроенергії, але і дозволяє контролювати конфіденційність без потреби у жалюзі. Але недоліком такого скла є необхідність у джерелі живлення, інакше такі вікна працювати не будуть.

Про пасивні будівлі (Passivhaus) вже згадувалось раніше і також вони вбирають в себе інші технології, тому окремо цей пункт розглядати не будемо.

Використання відновлювальних джерел енергії у будівництві було детально розглянуто у попередньому розділі.

Реконструкція та модернізація старих будівель передбачає утеплення фасадів, дахів і підвалів, заміну віконних систем, модернізацію систем

опалення. Даний захід потребує значних капіталовкладень і можуть здійснюватися за державними програмами.

Цікавим напрямком є енергоефективні будівельні конструкції та BIM (Building Information Modeling). У Європі популярним є, наприклад, зелені насадження на дахах, які окрім створення прогресивного дизайну забезпечують природну ізоляцію. Пропонується використання матеріалів із високою тепловою масою для стабілізації температури (наприклад, бетон із фазозмінними добавками), заводських енергоефективних блоків для швидкого будівництва з мінімальними тепловтратами.

Також для моделювання енергоспоживання будівлі на етапі проєктування використовують BIM, що дозволяє проводити ще на ранніх етапах аналіз тепловтрат та оптимізацію використання матеріалів. Більш того, зараз активно розвиваються цифрові двійники будівель для відстеження енергоефективності під час їх експлуатації [36].

Удосконалені системи вентиляції – окремий напрямок [37, 38]. Як вже зазначалося, важливою задачею системи опалення/охолодження є підтримання комфортного мікроклімату для людини. Але також дуже важливим для здоров’я людини є система вентиляції. Відомо, що втрати енергії через вентиляцію можуть досягати 50 % загальних теплових втрат будівлі, що є дуже енерговитратним. Тому енергоефективні будівлі потребують встановлення рекуперативних вентиляційних систем (рис. 3.3).

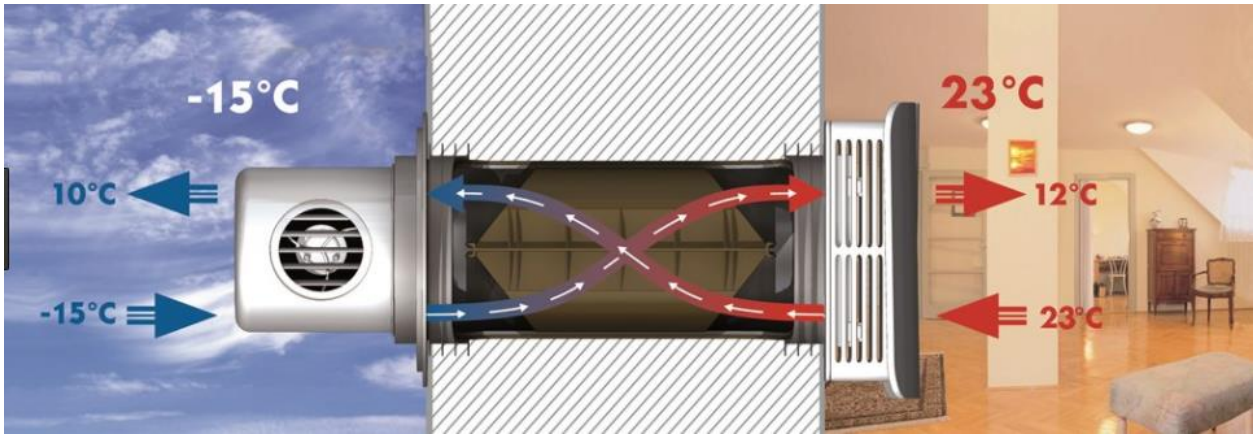


Рисунок 3.3 – Рекуперативна вентиляційна система

Така система дозволяє зберегти до 90 %, яке втрачається при традиційній вентиляції. Також встановлюються вологовідновлюючі мембрани для підтримання оптимального рівня вологості.

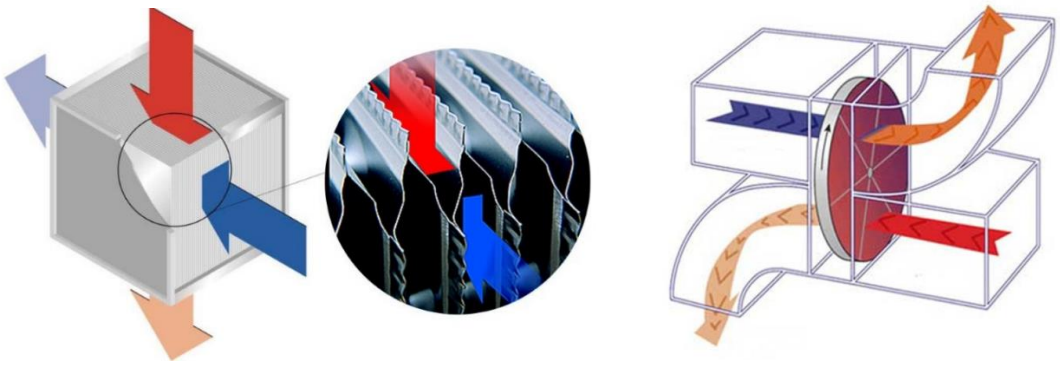
Рекуператори працюють і в зимню пору і влітку (рис. 3.4).



а) б)

Рисунок 3.4 – Робота вентиляційних рекуператорів:
а) взимку; б) влітку

Існують різні конструктивні виконання рекуператорів (рис. 3.5).



а) б)

Рисунок 3.5 – Конструктивні елементи рекуператорів
а) пластинчасті; б) роторні

Пластинчасті рекуператори повітря (рис. 3.5, а) – це найпоширеніший тип подібних пристроїв, що є одночасно відносно дешевим і ефективним. Їх ККД становить від 40 до 65 %.

Роторні рекуператори повітря (рис. 3.5, б) для своєї роботи вимагає наявності електричної енергії, яка необхідна для живлення системи керування. В залежності від перепаду температур зовні і всередині приміщення, система керування підбирає оптимальну кількість обертів ротора, завдяки чому не відбувається обмерзання цього пристрою взимку. Принцип його роботи заснований на обертанні теплообмінника, по якому проходить вуличне повітря в потоці вихідного теплого повітря. Саме завдяки такому обертанню ККД роторних рекуператорів може досягати 87 %.

Також ще існують рециркуляційні водяни рекуператори. У цього пристрою ККД практично такий же, як і у пластинчастого рекуператора (50…65 %), але він має складну конструкцію, в якій роль посередника для передачі тепла ви конує рідина (вода або антифриз), тому вони менш розповсюджені.

Перспективним напрямком безперечно є застосування розумних технологій, відомих також як «Розумний дім». Ця технологія передбачає інтеграцію систем управління опаленням, освітленням, вентиляцією, використання різноманітних датчиків, моніторинг споживання енергії в реальному часі та інтелектуальні системи керування енергетичними ресурсами.

Типовий приклад роботи такої системи: система опалення запрограмована на певні режими роботи у будні дні. Наприклад, о 8.00 опалення переходить на мінімальний режим роботи, температура у приміщенні поступово зменшується, а о 16.00…17.00 повертається до робочого режиму, нагріваючи приміщення до комфортної температури. Таким чином, у період відсутності мешканців система зменшує витрати енергії.

Інтелектуальна система автоматично регулює «здоровий» мікроклімат у приміщенні, враховуючи не лише задану людиною комфортну температуру, а й необхідну вологість та вентиляцію. У більш складних системах, якщо використовується декілька джерел опалення, можна запрограмувати

активацію того чи іншого джерела енергії залежно від умов, наприклад, тарифів. Це дозволяє мінімізувати фінансові витрати домогосподарства.

Наступним кроком розвитку таких систем є інтеграція технологій HVAC (опалення, вентиляція та кондиціонування) із використанням відновлювальних джерел енергії. Звичайно, такі системи вимагають встановлення датчиків, правильного монтажу та налаштування. Сучасні системи дозволяють керувати будинком онлайн (через смартфон, планшет або комп'ютер). Наприклад, функції автоматичного закриття/відкриття штор або приготування кави до приходу мешканців вже не здаються фантастикою. Дослідження показують, що інтернет речей (IoT-системи) можуть знизити енергоспоживання на 20…30 % [39, 40].

Основними недоліками таких систем залишаються висока ціна, складність та необхідність регулярного обслуговування. Проте можна впевнено припустити, що такі системи будуть надалі широко застосовуватися та розвиватися, оскільки вони сприяють суттєвій економії енергії та підвищенню комфорту мешканців.

Окремим напрямком, який активно розвивається є розробка високоефективних теплоізоляційних матеріалів. Зрозуміло, що для побудови енергоефективної будівлі однієї термоізоляції недостатньо. Відомо, що втрати тепла через стіни без належної ізоляції можуть досягати 30 %. І хоча це немало, але через вентиляцію, як ми розглядали раніше, може втрачатися навіть більше. І тим не менш, дана технологія отримала такий потужний розвиток через високий попит не тільки у будівництві. Теплоізоляційні матеріали розробляють для космічних програм, авіації, судноплавства, харчової промисловості тощо. Тобто значний попит породжує активні пошуки інноваційних рішень дослідниками. І дійсно, показники деяких матеріалів вражають.

Вже довгий час для термоізоляції використовують пінопласт та мінеральну вату. Проте вони мають добре відомі суттєві недоліки, пов'язані з екологічними показниками (високий вуглецевий слід, проблеми утилізації,

вплив на здоров’я) та технічними обмеженнями (пожежна небезпека, механічна слабкість, низька паропроникність – для пінопласту і втрата теплоізоляційних властивостей при намоканні та осідання матеріалу – для мінвати).

Тому у низці країн все більше обмежують використання цих матеріалів, особливо пінопласту і розробляють їх альтернативні варіанти:

- екована, яку виготовляють з переробленої целюлози. Має гарні теплоізоляційні властивості, паропроникність і менший вуглецевий слід;
- конопляна або льняна ізоляція. Ці матеріали мають відмінну екологічність і забезпечують комфортний мікроклімат завдяки природній регуляції вологості;
- коркові плити. Цей матеріал є екологічним, довговічним та біорозкладним. Характерною відмінністю є стійкість до грибків.

Але високотехнологічними та інноваційними матеріалами є аерогелі, вакуумні панелі та фазозмінні матеріали (PCM). Це дійсно космічні технології, які дозволяють розглядати теромізоляцію на новому рівні.

Аерогель – це ультралегкий матеріал з високою теплоізоляційною здатністю, що значно знижує тепловтрати, завдяки пористій структурі, що складається на 95 % з повітря. Діаметр пор у структурі аерогелю зазвичай становить від 5 до 100 нанометрів. Використання аерогелю значно зменшує витрати на обігрів та охолодження будівель [41].

Вакуумні ізоляційні панелі (VIP), є одним із найсучасніших рішень для будівельної ізоляції, що характеризуються надзвичайно низькою теплопровідністю. У порівнянні з традиційними матеріалами, VIP можуть зменшувати тепловтрати до 80 %, що робить їх привабливими для проектів, орієнтованих на досягнення майже нульового енергоспоживання [42].

Фазозмінні матеріали (PCM) – це окреме слово в термоізоляційних матеріалах. Вони не тільки виконують теплоізоляційні функції, а і здатні акумулювати та зберігати тепло, змінюючи свій стан. PCM можуть бути

використані в стінах, стелях, підлогах та інших елементах будівель, зокрема через їх інтеграцію в будівельні матеріали, наприклад, в штукатурку. У пасивних системах PCM ефективно знижують коливання температури, тоді як у активних застосуваннях, таких як гібридні системи з опаленням та кондиціонуванням, PCM можуть скорочувати пікові навантаження [43]. Дослідження показують, що PCM можуть скоротити витрати енергії до 20…30 % залежно від кліматичних умов та будівельних рішень.

Порівняння деяких характеристик розглядуваних матеріалів наведено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Характеристики теплоізоляційних матеріалів

Матеріал	Теплопровідність λ (Вт/(м·К))	Щільність (кг/м³)	Вогнестійкість	Вологопоглинання (%)
Вакуумні ізоляційні панелі (VIP)	0.004…0.008	160…300	Висока (негорючі)	<1
Аерогель	0.015…0.020	80…200	Висока (негорючі)	Низька (гідрофобні)
Екструдований полістирол (XPS)	0.029…0.038	30…45	Помірна (горючі, потрібні добавки)	<1
Пінополіуретан (PU)	0.020…0.040	30…50	Помірна (горючі, потрібні добавки)	Низька (закриті пори)
Мінеральна вата	0.032…0.040	20…150	Висока (негорючі)	Висока (потребує захисту)
Екована (целюлоза)	0.038…0.040	40…80	Помірна (оброблена для стійкості)	Помірна
Конопляна або льняна ізоляція	0.038…0.045	30…50	Помірна (оброблена для стійкості)	Помірна
Коркові плити	0.040…0.050	120…150	Висока (самозатухаючі)	Низька

Отже, узагальнюючи технологічні фактори, які безпосередньо впливають на енергоефективність будівлі, можна представити їх у такому вигляді рішень (рис. 3.6):

- ефективна теплова оболонка будівлі;

- ефективні системи управління теплоспоживанням;
- ефективна система вентиляції з рекуперацією тепла та холоду;
- ефективна система гарячого водопостачання;
- ефективне джерело тепло- та холодопостачання;
- ефективна система утилізації теплових впливів.

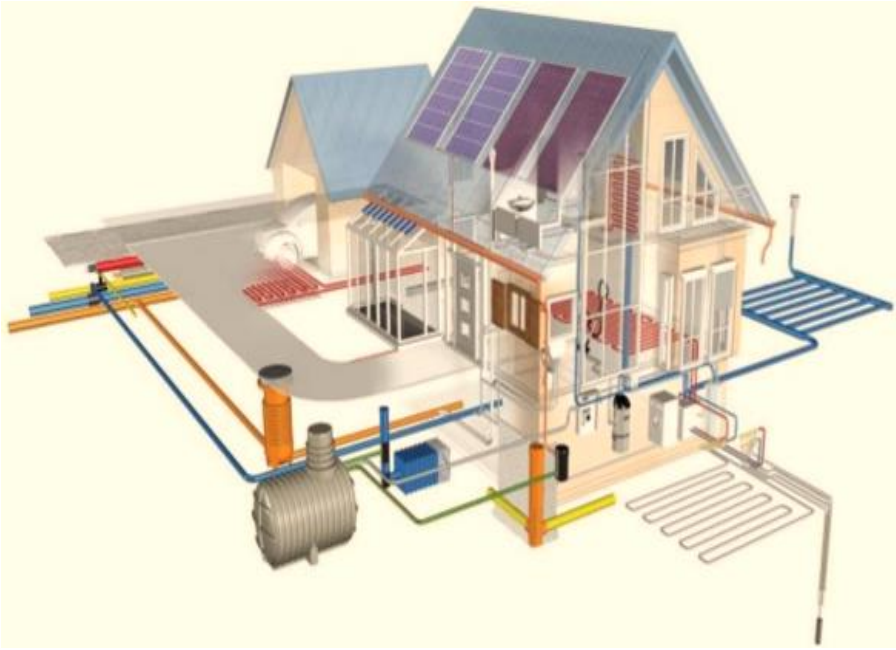


Рисунок 3.6 – Загальна схема енергоефективних рішень у будівництві

3.3 Енергоменеджмент в контексті сталого розвитку енергоефективного будівництва

Енергоменеджмент – це система управління, що спрямована на забезпечення раціонального використання паливно-енергетичних ресурсів і базується на проведенні типових енерготехнологічних вимірювань та перевірок, аналізі енерговикористання та впровадження енергозберігаючих заходів.

Енергоменеджмент являю собою дієвий інструмент постійного підвищення ефективності, що спрямований на:

- підвищення ефективності енерговикористання;
- зменшення впливу на довкілля;

- створення систематизованої і структурованої бази даних щодо енергоспоживання;
- зменшення енерговитрат без погіршення якості життя, рівня комфортності, продуктивності праці;
- модернізацію та оновлення енергооб'єктів, інженерних мереж та фонду будівель;
- формування нової моделі поведінки споживачів.

Енергоменеджмент спирається на серію стандартів [44 – 46] і має такі складові:

- керування енерговикористанням (керування навантаженням, керування енергоспоживанням кінцевого споживача);

- планування енергопостачання з врахуванням дій з керування енерговикористанням;

- енергетичний аудит;

- контроль та нормалізація енергоспоживання;

- верифікація даних та результатів.

Цілі системи енергоменеджменту:

- підтримання витрат на енергоносії на мінімально можливому (з врахуванням існуючого технічного стану) рівні з одночасним підтриманням умов перебування відвідувачів та персоналу на рівні, що відповідає діючим нормативним документам;
- підготовка та впровадження технічних та організаційних заходів щодо зниження витрат на енергоносії та покращення умов перебування відвідувачів та персоналу;
- впровадження системи стимулювання ощадного використання енергоресурсів на всіх рівнях управління.

Функціонування системи енергоменеджменту:

1) моніторинг енергоспоживання. Планування впровадження заходів з підвищення ефективності енергоспоживання;

2) Залучення джерел фінансування заходів з підвищення ефективності енергоспоживання;
3) Контроль за ефективністю впровадження заходів з енергозбереження;
4) Навчання персоналу структурних підрозділів. Мотивація ощадного енергоспоживання.

Як видно із наведеного переліку вище, спочатку необхідно провести енергомоніторинг, який являє собою комплекс заходів (використання спеціалізованого програмного забезпечення для запровадження комплексного енергопланування, спостережень, оцінок, прогнозів), що дає змогу неперервно спостерігати за режимом споживання ПЕР, реєструвати його основні показники, оперативно виявляти результати впливу зовнішніх і внутрішніх чинників на ефективність їх використання та вчасно розробляти комплекс енергоефективних заходів для зменшення енергоспоживання. Загальна схема енергомоніторингу представлена на рисунку 3.7.

До функцій енергомоніторингу входить:

- швидке виявлення відхилень в щоденній роботі;
- швидке отримання зворотної реакції в наслідок зміни експлуатаційних характеристик;
- можливість планування бюджету на ресурси по електроенергії та воді;
- підвищення обізнаності працівників про можливості енергозбереження;
- задіяний та мотивований технічний та обслуговуючий персонал;
- прогнозування витрат та обґрунтування необхідності та можливості здійснювати заходи з енергозбереження;
- документування результатів впроваджених заходів.

Результати енергомоніторингу представляють у вигляді звіту, який містить, як правило, таблиці, графіки і кінцеві результати про фактичне

питоме споживання теплової енергії і фактичне загальне питоме енергоспоживання.

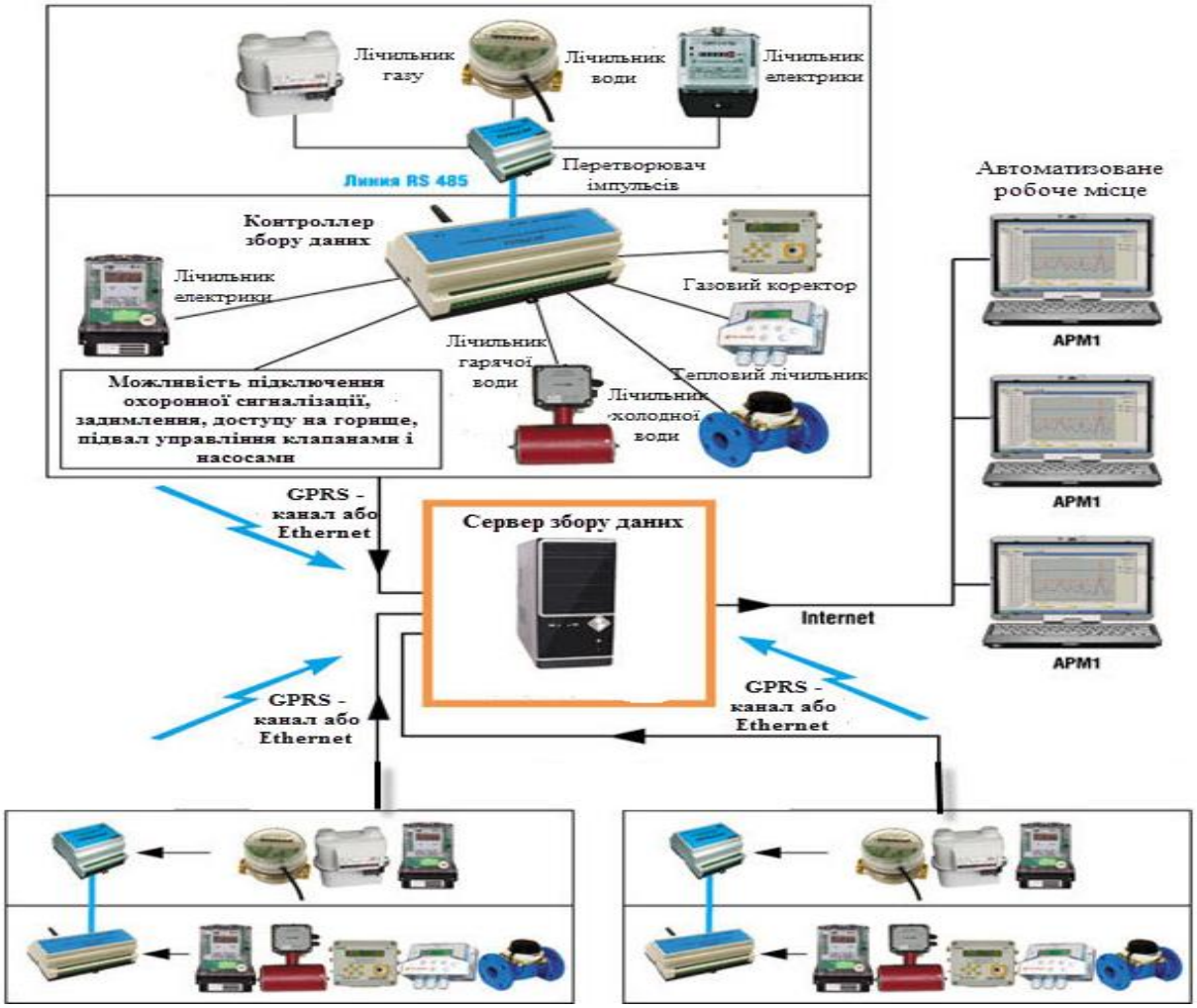


Рисунок 3.7 – Схема енергомоніторингу

На основі отриманої від підсистеми моніторингу інформації проводиться детальний аналіз ефективності енергоспоживання та шляхів її підвищення, особливо для найбільш енерговитратних частин будівель чи технологічних процесів. Проводять деталізований енергетичний аудит для формування переліку заходів та об’єктів для першочергового впровадження заходів з підвищення ефективності енергоспоживання, визначення їх технічних та фінансових показників. Проводиться підготовка технічних завдань на реалізацію проектів з підвищення ефективності енергоспоживання та окремих заходів. Проводиться збір та аналіз даних по впровадженню

заходів пов’язаних зі зниженням енергоспоживанням (капітальних та поточних ремонтів, реконструкцій тощо) іншими підрозділами.

Дуже важливою частиною енергоменеджменту є енергоаудит. Енергетичний аудит (енергоаудит) являє собою систематичну процедуру, з ціллю отримання адекватної інформації про існуючий профіль енергоспоживання будівлі або групи будівель, промислових або комерційних споруд або установок, для виявлення і кількісної оцінки економічної ефективності заходів з економії енергії, та для звітності результатів.

Мета енергоаудиту [44]:

- визначення стану споживання ПЕР;
- визначення параметрів мікроклімату;
- виявлення потенціалу енергозбереження;
- пошук джерел втрат та обсягу нераціонального використання ПЕР;
- розроблення енергоощадних заходів, їх техніко-економічне обґрунтування;
- розробка заходів з покращення мікроклімату;
- оцінюванка впливу на навколишнє природне середовище.

Види енергоаудиту [44]:

- експрес-аудит передбачає поверхневе обстеження будівлі та виявлення найбільш очевидних недоліків;
- аудит окремих систем направлений на одну чи кілька інженерних систем (огороджувальні конструкції, опалення, охолодження, вентиляція, гаряче водопостачання, освітлення);
- комплексний енергоаудит передбачає поглиблене вивчення конструкції будівлі та інженерних мереж, проведення інструментальних замірів та підготовку детального плану впровадження енергоефективних заходів в тому числі економічний аналіз;
- енергетичний аудит інвестиційного рівня є актуальним при залученні інвесторів (кредиторів) для реалізації проектів. Аудит враховує як

енергетичні так і грошові потоки, інфляцію, відсотки за кредитами чи дохідною частиною.

Основні етапи проведення енергоаудиту [44, 46]:

1) попередня підготовка;
2) обробка наявної інформації;
3) виїзд на об’єкт і знайомство з персоналом;
4) збір наявної інформації;
5) інструментальні вимірювання;
6) проведення технічних і економічних розрахунків;
7) підготовка звіту;
8) презентація звіту;
9) порівняння фактичних результатів з отриманими.

Прилади для енергоаудиту включають смартфон/вотоапарат, дальномір, струмові клещі-ватметр, температурні логери, тепловізор, пірометр, люксметр, анемометр, аналізатор параметров електроенергії, накладний витратомір, вимірювач теплового потоку.

Після енергоаудиту робиться звіт по отриманих результатах, деякі елементи якого наведені на рисунку 3.8. Це реальний об’єкт, для якого проводили енергоаудит (м. Дніпро).

Наступним кроком споживачу (клієнту) пропонується (але не нав’язується) звернутися компанії, яка надає послуги з енергосервісу. Правильно побудований енергосервіс дозволяє економити паливно-енергетичні ресурси від 10 до 60 %.

Наступним кроком є контроль:

1) за реалізацією технічних заходів на етапах розробки проектно-конструкторської документації, виконанням монтажних та пусконалогоджувальних робіт, подальшим сервісним обслуговуванням;
2) за показниками енергоспоживання до та після реалізації заходів з підвищення ефективності енергоспоживання;

3) за ефективністю вкладення коштів в енергоефективні заходи та функціонування системи енергоменеджменту;
4) за сервісним обслуговуванням заходів зі зниження енергоспоживання, в тому числі підготовку відповідних інструкцій та регламентів для персоналу та сервісних компаній.

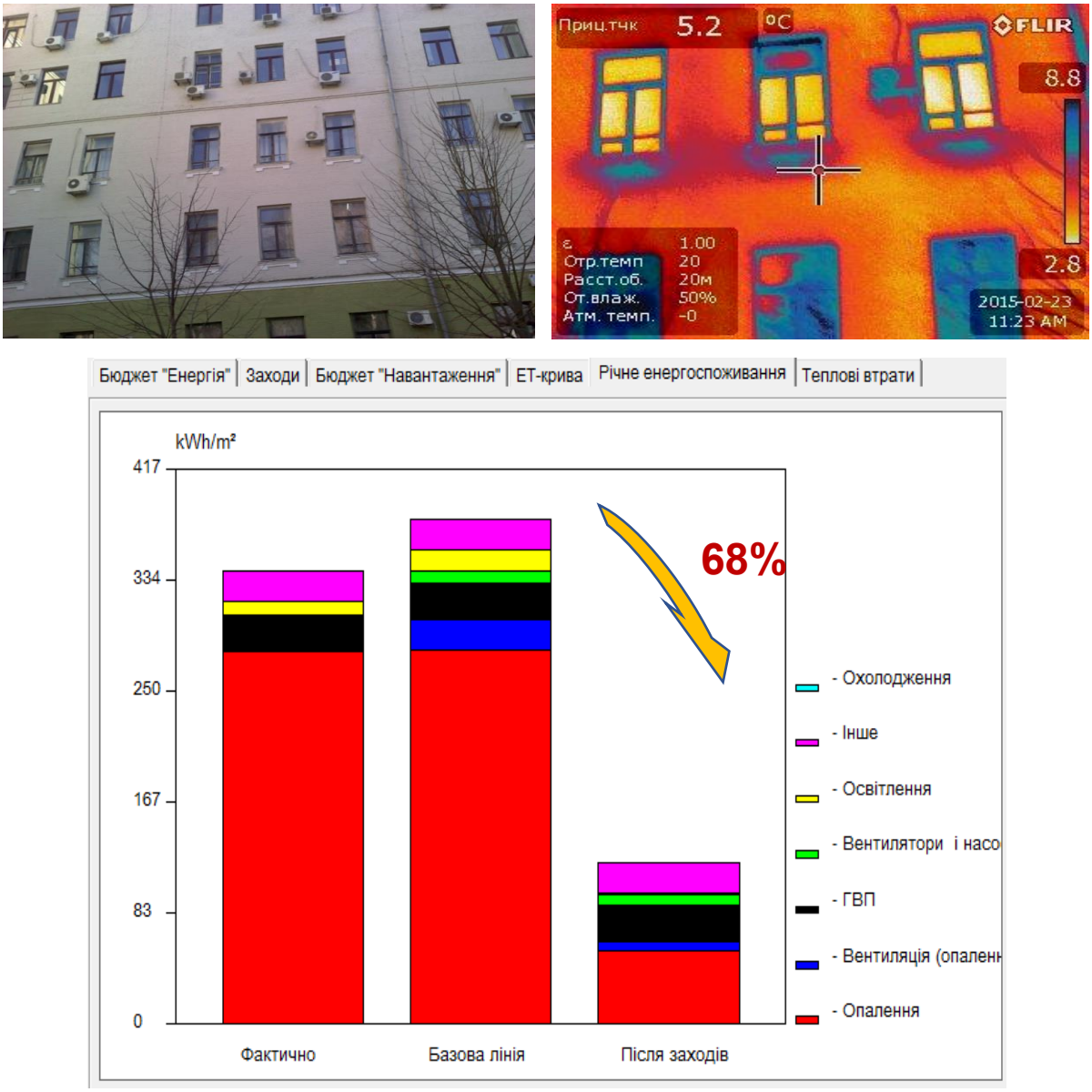


Рисунок 3.8 – Результати енергоаудиту будівлі (м. Дніпро)

Важливим елементом енергоменджменту є якісне навчання персоналу [47, 48]. Навчання з питань ощадного енергоспоживання здійснюється в процесі впровадження системи енергетичного менеджменту та періодично не рідше ніж 1 раз на рік, а також після впровадження заходів з підвищення ефективності енергоспоживання.

ВИСНОВКИ

Енергоефективність у будівництві дедалі стає стратегічною необхідністю для досягнення сталого розвитку, дозволяючи знизити споживання енергоресурсів та мінімізувати викиди парникових газів. Забезпечення енергоефективності є ключовим фактором для створення комфортного середовища проживання з урахуванням сучасних вимог до якості життя. Успішне впровадження таких рішень сприяє скороченню залежності від викопних джерел енергії та економії фінансових ресурсів.

Україна стикається з численними викликами у сфері будівництва, серед яких низький рівень енергоефективності існуючих будівель, морально застарілі матеріали та технології, а також значні руйнування внаслідок військової агресії росії. Водночас ці виклики відкривають можливості для інтеграції новітніх енергоефективних технологій, які забезпечать швидке відновлення інфраструктури та модернізацію існуючого житлового фонду.

Використання відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні панелі, вітрові турбіни, геотермальні технології, дозволяє зменшити залежність від традиційних джерел енергії. Інтеграція таких рішень у будівельні проєкти дозволяє скоротити витрати на енергоресурси, зменшити екологічний вплив і підвищити конкурентоспроможність будівельної галузі.

Будівлі з майже нульовим енергоспоживанням (NZEB) є одним із пріоритетних напрямків розвитку будівельної галузі. Їх реалізація дозволяє створювати екологічно чисті об’єкти, які відповідають сучасним стандартам енергоспоживання. Впровадження концепції NZEB сприятиме енергетичній незалежності України, скороченню викидів парникових газів і економії енергоресурсів.

Сучасні теплоізоляційні матеріали забезпечують значне скорочення тепловтрат. Використання таких матеріалів дозволяє не лише підвищити енергоефективність будівель, а й зменшити витрати на опалення та

охолодження. Крім того, інноваційні матеріали є екологічно безпечними та довговічними, що робить їх незамінними у сучасному будівництві.

Системи автоматизації, такі як IoT, дозволяють ефективно керувати енергоспоживанням у реальному часі. Впровадження таких технологій забезпечує оптимальне використання ресурсів, підвищує комфорт проживання та зменшує витрати на експлуатацію будівель. Інтелектуальні технології знаходять все більше розповсюдження в сучасних енергоефективних будівельних технологіях.

Наближення законодавства в Україні до європейських стандартів дозволяє забезпечити правову базу під будування нових та реконструювання старих будівель, а також залучити іноземні інвестиції в будівельну галузь.

Післявоєнна відбудова України потребує інтеграції новітніх технологій, які дозволять створювати енергоефективні об’єкти інфраструктури. Використання сучасних матеріалів та рішень сприятиме підвищенню їхньої довговічності та енергоефективності, що позитивно вплине на економічний розвиток і створення комфортних умов для населення.

Використання інноваційних технологій у будівництві дозволяє також знизити експлуатаційні витрати на енергоресурси. Інвестиції в енергоефективні рішення окуповуються протягом декількох років, забезпечуючи довгострокову економічну вигоду. Крім того, такі технології сприяють роблять її більш привабливою для інвесторів.

Подальше дослідження в галузі енергоефективності має бути спрямоване на вдосконалення існуючих технологій, адаптацію міжнародних стандартів до українських реалій і розвиток нових методів зменшення енергоспоживання. Такі дослідження сприятимуть переходу України до стійкої економіки, знижуючи залежність від викопних джерел енергії та підвищуючи рівень енергетичної безпеки країни.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Названа кількість зруйнованих будинків в Україні. URL: https://ua.korrespondent.net/ukraine/4683865-nazvana-kilkist-zruinovanykh-budynkiv-v-ukraini (дата звернення: 24.11.2024).
2. Розпочато роботу по галузевій угоді у сфері будівництва на 2025-2026 роки. URL: https://mtu.gov.ua/news/36001.html (дата звернення: 24.11.2024).
3. Енергоефективність в будівництві: відбувся круглий стіл «Вимоги до будівель NZEB в Україні». URL: https://mtu.gov.ua/news/35838.html (дата звернення: 24.11.2024).
4. Відеозапис круглий стіл «Вимоги до будівель NZEB в Україні». URL: https://fb.watch/tQDcWvNZZY/ (дата звернення: 24.11.2024).
5. Директива (ЄС) 2024/1275 Європейського парламенту та Ради від 12 березня 2024 року про енергетичну ефективність будівель. EUR-Lex. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32024L1275 (дата звернення: 24.11.2024).
6. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 17 жовтня 2019 року № 2118-VIII. Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19 (дата звернення: 24.11.2024).
7. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. [Чинний від 2022-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2022. 27 с.
8. Наталія Козловська: «Розвиток будівельної галузі є запорукою сталого та ефективного відновлення». URL: https://mtu.gov.ua/news/35832.html (дата звернення: 24.11.2024).
9. Виклики відновлення: чому якісна проєктна документація є критично важливою? URL: https://mtu.gov.ua/news/35842.html (дата звернення: 24.11.2024).
10. ДБН В.1.2-11:2021 «Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження та енергоефективність». [Чинний від 2022-09-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіонбуд України, 2022. 21 с.

11. Artemchuk V.V., Krol O.V., Umnov P.V., Kuznetsov R.P. Energy management: key aspects and impact on sustainable development. *Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України:* матеріали III Всеукраїнської наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 17-20 жовтня 2023 р. С. 27
12. Концепція Державної цільової економічної програми підтримки термомодернізації будівель до 2030 року. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. URL: https://mtu.gov.ua/files/40012424665821000 0%20%281%29-----.doc (дата звернення: 24.11.2024).
13. Стратегія термомодернізації будівель України до 2050 року. URL: https://www.kmu.gov.ua/news/zatverdzheno-stratehiiu-termomodernizatsii-budivel-ukrainy-do-2050-roku (дата звернення: 24.11.2024).
14. ДСТУ EN 15459-1:2017. Енергоефективність будівель. Процедура економічного оцінювання енергетичних систем будівлі. [Чинний від 01-01-2018]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2017. 52 с.
15. ДСТУ Б А.2.2-12:2015 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання при опаленні, охолодженні, вентиляції, освітленні та гарячому водопостачанні. [Чинний від 01-01-2016]. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2015. 202 с.
16. Про енергетичну ефективність: Закон України від 21 жовтня 2021 року № 1818-IX. Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20 (дата звернення: 24.11.2024).
17. Міністерство економіки та клімату Німеччини представило «Робочий план», спрямований на підвищення енергоефективності країни. Ecopolitic. URL: https://ecopolitic.com.ua/ua/news/u-nimechchini-rozrobili-plan-yakij-zmusit-krainu-zaoshhadzhuvati-energiju/ (дата звернення: 18.11.2024).

18. Закон Німеччини про опалення: нові вимоги щодо відновлюваних джерел енергії. Deutsche Welle. URL: https://www.dw.com/uk/u-nimeccini-uhvalili-zakon-pro-opalenna/a-66764136 (дата звернення: 18.11.2024).
19. На що впливає енергетичний паспорт в Німеччині. URL: https://dominartinvest.com/ua/page/enegretichnii-pasport-nimechini (дата звернення: 24.11.2024).
20. Директива 2010/31/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 19 травня 2010 року про енергетичну ефективність будівель. EUR-Lex. URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32010L0031 (дата звернення: 24.11.2024).
21. Alahmer A., Omar M. A. Vehicular cabins' thermal comfort zones: Fanger and Berkley modeling . *Vehicle Engineering*. 2013. Vol. 1, No. 1. P. 1–19. URL: https://www.researchgate.net/publication/259359809 (дата звернення: 24.11.2024).
22. ДСТУ Н Б В.1.1-27: 2010. Будівельна кліматологія. [Чинний від 01-07-2011]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2010. 84 с.
23. ДБН В.2.5-64:2012 Внутрішній водопровід та каналізація. [Чинний від 2013-07-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2012. 48 с.
24. Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Bundesministerium der Justiz. URL: https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/EEG_2023.pdf (дата звернення: 24.11.2024).
25. Net Metering Policies in the United States. URL: https://www.energy.gov/savings/net-metering (дата звернення: 24.11.2024).
26. Feed-in tariffs in Australia. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Feed-in_tariffs_in_Australia (дата звернення: 24.11.2024).
27. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20 лютого 2003 року № 555-IV. Верховна Рада України. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15 (дата звернення: 24.11.2024).

28. El-atab N., Babatain W., Bahabry R. та ін. Ultra-flexible Corrugated Monocrystalline Silicon Solar Cells with High Efficiency (19%). *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2019. Vol. 11, No. 41. P. 37966–37974. URL: https://doi.org/10.1021/acsami.9b09295 (дата звернення: 24.11.2024).
29. Yang D., Yin H. Energy Conversion Efficiency of a Novel Hybrid Solar System for Photovoltaic, Thermoelectric, and Heat Utilization. *IEEE Transactions on Energy Conversion.* 2011. Vol. 26, No. 2. P. 662–670. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/5749882 (дата звернення: 24.11.2024).
30. Yilanci A., Dincer I., Ozturk H. A review on solar-hydrogen/fuel cell hybrid energy systems for stationary applications. *Progress in Energy and Combustion Science.* 2009. Vol. 35. P. 231–244. URL: https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.07.004 (дата звернення: 24.11.2024).
31. Pineau D., Riviere P., Stabat P., Hoang P., Archambault V. Performance analysis of heating systems for low energy houses. *Energy and Buildings*. 2013. Vol. 65. P. 45–54. URL: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.012 (дата звернення: 24.11.2024).
32. Cristea C., Cristea M., Tirnovan R., Făgărășan C. Comparative analysis of different heating systems based on the surface area of a household. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 568. P. 012001. URL: https://doi.org/10.1088/1757-899X/568/1/012001 (дата звернення: 24.11.2024).
33. Pekař L., Song M., Mao N., Ali H., Wu W., Cai J.-J. Editorial: Emerging Sustainable and Energy-Efficient Technologies in Heat Pumps for Residential Heating . *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 10. P. 123456. URL: https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.123456 (дата звернення: 24.11.2024).
34. Wang X., Li Y., Zhang Q., Chen Z. Energy performance comparison of heating and air-conditioning systems for multi-family residential buildings. *Energy and Buildings*. 2021. Vol. 250. P. 112234. URL: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.112234 (дата звернення: 24.11.2024).

35. Shaik L., Prakash J., Rao A. Development of an experimental platform for a multi-source complementary heat pump heating system. *International Journal of Heat and Technology*.2020. Vol. 38. P. 321–326. URL: https://doi.org/10.18280/ijht.380216 (дата звернення: 24.11.2024).
36. Sanhudo L., Ramos N., Martins J., Almeida R., Barreira E., Simões M. L., Cardoso V. Building information modeling for energy retrofitting – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 89. P. 161–174. URL: https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.019 (дата звернення: 24.11.2024).
37. Marsik T., Bickford R., Dennehy C., Garber-Slaght R., Kasper J. Impact of Intake and Exhaust Ducts on the Recovery Efficiency of Heat Recovery Ventilation Systems. *Energies*. 2021. Vol. 14, No. 11. P. 3124. URL: https://doi.org/10.3390/en14113124 (дата звернення: 24.11.2024).
38. Li B., Wild P., Rowe A. Performance of a heat recovery ventilator coupled with an air-to-air heat pump for residential suites in Canadian cities. *Journal of Building Engineering*. 2019. Vol. 24. P. 100737. URL: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100737 (дата звернення: 24.11.2024).
39. Ma Z., Ren H., Lin W. A review of heating, ventilation and air conditioning technologies and innovations used in solar-powered net zero energy Solar Decathlon houses. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 240. P. 118158. URL: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118158 (дата звернення: 24.11.2024).
40. Vytla J., Rohit A., Sasikumar C. Innovative green technologies enhancing the comfort of HVAC world - A review. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*. 2018. Vol. 4, No. 3. P. 1374–1380. URL: https://ijariit.com/manuscripts/v4i3/V4I3-1560.pdf (дата звернення: 24.11.2024).
41. Mckoy D. R., Tesiero R. C., Acquaah Y., Gokaraju B. Review of HVAC Systems History and Future Applications. *Energies*. 2023. Vol. 16, No. 5. P. 2482. URL: https://doi.org/10.3390/en16052482 (дата звернення: 24.11.2024).

42. Zach J., Novák V., Peterková J., Bubeník J. Development of Vacuum Insulation Panels with Utilization of Organic By-Products. *Energies*. 2020. Vol. 13, No. 14. P. 3712. URL: https://doi.org/10.3390/en13143712 (дата звернення: 24.11.2024).
43. Freeman T. B., Foster K. E. O. та ін. Advanced Materials and Additive Manufacturing for Phase Change Thermal Energy Storage and Management: A Review. *Advanced Energy Materials*. 2023. Vol. 13, No. 4. P. 2300465. URL: https://doi.org/10.1002/aenm.202300465 (дата звернення: 24.11.2024).
44. ДСТУ ISO 50002:2016 Енергетичні аудити. Вимоги та настанова щодо їх проведення (ISO 50002:2014, IDT). [Чинний від 01-11-2017]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 34 с.
45. ДСТУ EN 16247-2:2015 Енергоефективність. Енергетичні аудити. Частина 2. Будівлі. [Чинний від 01-01-2016]. Вид. офіц. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2015. 28 с.
46. ДСТУ Б В.2.2-39:2016 Методи й етапи проведення енергетичного аудиту будівель. [Чинний від 01-01-2017]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2016. 36 с.
47. Artemchuk V.V., Myliy O.V., Bandurenko I.I., Berezin O.O. Energy management in the educational process: theory and practice. *Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України:* матеріали III Всеукраїнської наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 17-20 жовтня 2023 р. С. 25.
48. Artemchuk V.V., Klymchuk D.V., Prokopenko D.V., Skliar V.I. Energy management and smart grids: navigating the future of electrical infrastructure. *Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України:* матеріали III Всеукраїнської наук.-практ. конф., м. Запоріжжя, 17-20 жовтня 2023 р. С. 29.