

УДК 69.003.13

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.270425.111.1167

ОПТИМІЗАЦІЯ ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ СПОРУДЖЕННЯ БУДІВЕЛЬ ІЗ УРАХУВАННЯМ МІНІМІЗАЦІЇ ВИТРАТ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ

МАТЮШЕНКО С. Ю.^{1*}, асп.

СОКОЛОВ І. А.², докт. техн. наук, проф.

^{1*} Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел.+38 (098) 206-68-91, e-mail: sergov.matyushenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4434-6006

² Кафедра організації і управління будівництвом, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (067) 628-77-77, e-mail: sokolov.igor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8366-4301

Анотація. Постановка проблеми. У цій статті розглядається важливість оптимізації будівельних рішень для економії енергії, яка є ключовим елементом для підвищення ефективності в будівельній індустрії. Значні перевитрати та затримки у будівельних проєктах часто пов'язані з неефективними організаційно-технологічними рішеннями, які не враховують важливі фактори такі як: ефективність енергетичних витрат, впровадження енергоефективних технологій і ресурсозберігаючих методів у процеси та етапи проєктування, будівництва й експлуатації будівель. Зниження витрат енергоресурсів – це комплексний підхід, що включає не лише економію електроенергії, а й раціональне використання теплової енергії, освітлення, палива та водних ресурсів. Аналіз енергоресурсів охоплює як природні та штучні джерела енергії, так і витрати на забезпечення інфраструктури, включаючи електроенергію, тепло, воду, газ та інші ресурси, необхідні для комфортного життя. Ця стаття зосереджується на розробці та впровадженні енергоефективних технологій і методів, спрямованих на мінімізацію витрат енергоресурсів на всіх етапах життєвого циклу будівництва – на стадії проєктування, будівництва та експлуатації будівель. **Мета дослідження.** Дослідження передбачає аналіз сучасної літератури, щодо енергоефективних практик, що застосовуються в будівельних проєктах. Це сприятиме детальному вивченню проблеми, визначенню основних викликів та пошуку можливостей для вдосконалення. Результати дослідження будуть спрямовані на скорочення загальних витрат, оптимізацію строків виконання проєктів і підвищення загальної ефективності будівельних процесів. **Висновки.** Результати дослідження, можуть стати корисними для вдосконалення організаційної структури будівництва, що сприятиме більш ефективному використанню ресурсів і оптимізацію технологічних процесів, що дозволить скоротити час виконання будівельних робіт без збільшення споживання енергоресурсів. Стаття вносить значний внесок у розуміння ключової ролі енергоресурсного менеджменту в сучасному будівництві та надає конкретні рекомендації для його вдосконалення.

Ключові слова: оптимізація; будівництво; мінімізація витрат; енергоресурси; ефективність; управління ресурсами; проєктування будівель; IoT

OPTIMIZATION OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS FOR THE CONSTRUCTION OF BUILDINGS WITH REGARD TO MINIMIZATION OF ENERGY CONSUMPTION

MATIUSHENKO S.Yu.^{1*}, Postgrad. Stud.,

SOKOLOV I.A.², Dr. Sc. (Tech.), Prof.

^{1*} Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel.+38 (098) 206-68-91, e-mail: sergov.matyushenko@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-4434-6006

² Department of Organisation and Management in Construction, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov St., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (067) 628-77-77, e-mail: sokolov.igor@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-8366-4301

Abstract. Problem statement. This article discusses the importance of optimizing building solutions to save energy, which is a key element for improving efficiency in the construction industry. Significant cost overruns and delays in construction projects are often associated with inefficient organizational and technological solutions that do not take into account important factors such as energy efficiency, the introduction of energy efficient technologies and

resource-saving methods in the processes and stages of design, construction and operation of buildings. Reducing energy consumption is a comprehensive approach that includes not only saving electricity, but also the rational use of heat, lighting, fuel and water resources. The analysis of energy resources covers both natural and artificial energy sources and the costs of providing infrastructure, including electricity, heat, water, gas, and other resources necessary for a comfortable life. This article focuses on the development and implementation of energy-efficient technologies and methods aimed at minimizing energy costs at all stages of the construction life cycle – at the design, construction and operation of buildings. **The purpose of the study.** The study involves analyzing the current literature on energy efficient practices used in construction projects. This will facilitate a detailed study of the problem, identify the main challenges and find opportunities for improvement. The results of the study will be aimed at reducing overall costs, optimizing project implementation time and improving the overall efficiency of construction processes. **Conclusions.** The results of the study can be useful for improving the organizational structure of construction, which will contribute to more efficient use of resources and optimization of technological processes, which will reduce the time of construction work without increasing energy consumption. The article makes a significant contribution to the understanding of the key role of energy management in modern construction and provides specific recommendations for its improvement.

Keywords: *optimization; construction; cost minimization; energy resources; efficiency; resource management; building design; IoT*

Постановка проблеми. Сучасний стан енергетичної інфраструктури України, яка зазнала значних руйнувань через військові дії, вимагає ретельного аналізу та дослідження енергоефективності. Ця ситуація особливо загострила потребу у зменшенні енергоспоживання, оскільки системи енергопостачання, водопостачання та водовідведення працюють з перебоями або зазнали серйозних пошкоджень. У таких умовах впровадження енергоефективних рішень у будівництві стає не лише економічною необхідністю, а й критично важливим елементом для забезпечення стійкості, відновлення та стабільної роботи житлової та комунальної інфраструктури.

Проблеми з великим споживанням енергоресурсів в умовах сучасного будівництва та зростаючих вимог до енергоефективності, екологічності та економічності випробовують нас на досягнення нових горизонтів, що до оптимальних рішень і розв'язання складних завдань. Недостатнє впровадження енергоефективних рішень у проекти, недостатній рівень автоматизації та цифровізації, значні фінансові та енергетичні втрати через нераціональне планування етапів будівництва може призвести до низки негативних наслідків, як на рівні будівельної галузі, так і для суспільства, держави і людства в цілому.

Щоб вирішити ці проблеми, потрібно розробити організаційно-технологічні рішення для будівництва будівель, які забезпечуватимуть зниження споживання енергії та ресурсів, впровадження

енергоефективних технологій і ресурсозберігаючих методів у процеси на етапах проектування, будівництва й експлуатації будівель.

Мета дослідження. Метою цієї статті є всебічне дослідження та ідентифікація ефективних стратегій для покращення існуючих методів та розробка нових ефективних оптимізаційних рішень для будівництва будівель, які забезпечуватимуть зниження споживання енергії та ресурсів, мінімізуючи витрати на енергоносії та покращуючи екологічні показники будівель. Розробка оптимізаційних рішень, щодо використання енергоресурсів, що представляють собою комплекс природних і штучних матеріальних ресурсів, які використовуються для виробництва, перетворення та споживання енергії у різних формах, ретельний розгляд складових комплексу енергоресурсів, до якого входять ресурси, що мають потенціал для виробництва теплової, електричної, механічної або хімічної енергії, які задовольняють побутові, промислові, транспортні та інші потреби людства.

Аналіз енергоресурсів що представляють собою не лише природні та штучні ресурси, що використовуються для виробництва енергії, але й витрати, пов'язані з забезпеченням роботи інфраструктурних об'єктів, які створюють комфортні умови для життя, до таких витрат відносяться електроенергія, тепло, вода, газ та інші ресурси, що використовуються для опалення, освітлення, водопостачання та

підтримки житлових, транспортних і комунальних систем, необхідних для сучасного комфорту. Формування концепції що енергоресурси це ресурси, що сприяють покращенню екологічних показників, коли використовуються ефективно та з мінімальним впливом на навколишнє середовище.

Аналіз публікацій. Було розглянуто дослідження, опубліковане в “Molecular Diversity Preservation International” [1] Воно було зосереджене на аналізі ефективності двошарових фасадних елементів- double-skin façade elements (DSF) для багатоповерхових дерев'яних каркасних будівель з метою збільшення несучої функції. Це дослідження може відкрити нові перспективи в проєктуванні сучасних багатоповерхових дерев'яних будівель, розташованих у сейсмічних районах із сильними вітрами і з сильним асиметричним розташуванням прозорих скляних поверхонь. Також двошарові фасадні елементи можуть знизити потребу в енергії для опалення та забезпечити більше денного світла, сприяючи кращому комфорту проживання в будівлі. У статті зазначено потенційно корисні соціально-економічні ефекти результатів дослідження, оскільки вони можуть стимулювати будівництво багатоповерхових дерев'яних будівель, що дають змогу краще використовувати лісові масиви та сприяють зниженню впливу будівель на навколишнє середовище [1]. Схематичне зображення несучого елемента конструктивної стіни DSF, який забезпечує необхідну жорсткість і стійкість конструкції представлено на рисунку 1.

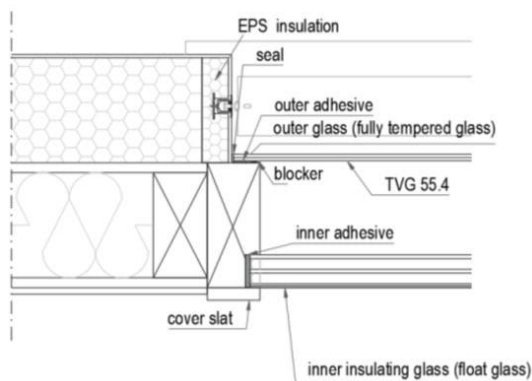


Рис. 1. Схематичне зображення несучого елемента конструктивної стіни DSF [6]

Двошарові фасадні елементи в минулому насамперед розробляли з метою істотного поліпшення теплового й акустичного опору оболонки будівлі [7]. Тому елементи DSF були запропоновані, як перспективна технологія пасивного будівництва для підвищення енергоефективності та поліпшення теплового комфорту в приміщенні [8]. Такий сконструйований елемент оболонки DSF демонструє кращий акустичний опір [9] і може бути підходящим для зон із високим рівнем шуму, де потрібен високий рівень звукоізоляції [10].

Підводячи висновки з аналізу дослідження М. Премрова і Козема Шилліха двошарові фасадні елементи (Double-Skin Façade, DSF) значно підвищують енергоефективність будівель завдяки своїй здатності оптимізувати теплообмін між зовнішнім середовищем та внутрішніми приміщеннями. Двошарові фасадні елементи забезпечують циркуляцію повітря між фасадними шарами, створюючи термічну буферну зону, що допомагає стабілізувати температуру всередині будівлі.

Інше дослідження [2], аналізує ефективність використання BIM технологій на етапі 6D за допомогою розробки моделі, яка може автоматично оцінювати енергоефективність та стійкість проєкту, дозволяючи проєктувальникам вибирати найкращий варіант дизайну [2; 11].

BIM дозволяє інтегрувати інструменти аналізу, які оцінюють ефективність різних проєктних рішень, таких як ізоляція, розташування вікон, орієнтація будівлі відносно сонця тощо. BIM-програми (наприклад Revit або ArchiCAD) інтегруються з інструментами аналізу енергоспоживання (EnergyPlus, Green Building Studio), дозволяючи симулювати споживання енергії, визначати теплові втрати та прогнозувати витрати.

Слід зазначити, що BIM передбачає еволюцію традиційних систем проєктування, заснованих на площині, оскільки вона включає геометричну інформацію (3D), час (4D), витрати (5D), екологічну та енергетичну стійкість (6D) і управління об'єктами (7D) [12]. BIM – це потужна методологія спільної роботи для

управління будівельними проєктами за допомогою цифрової моделі, яка дозволяє цим проєктам протягом усього їхнього життєвого циклу бути більш ефективними та стійкими [2].

Ця методологія дозволяє отримати енергетичну модель будівлі та її подальший аналіз, який відомий, як шостий вимір BIM або BIM 6D, де використовується інформація з попередніх вимірів, в основному визначення геометрії, будівельних матеріалів та обладнання [13]. Повертаючись до аналізу дослідження [2] можна ознайомитись що за допомогою програмного забезпечення REVIT було виконано геометричне та енергетичне моделювання Університетської лікарні Хаена (University Hospital of Jaén) (рис. 2).

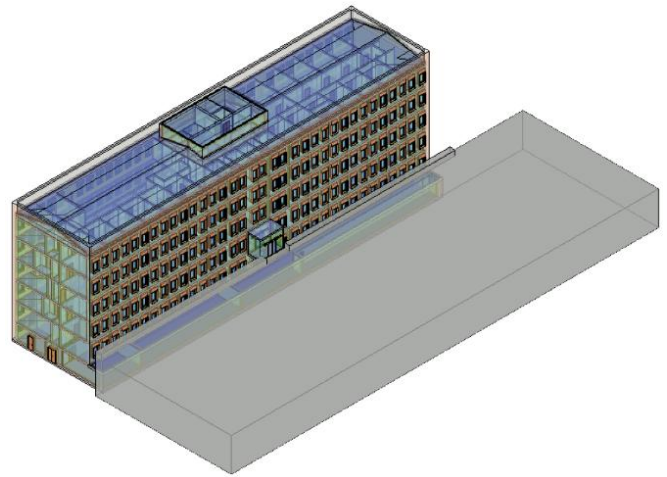


Рис. 2. Енергетична модель будівлі в REVIT [2]

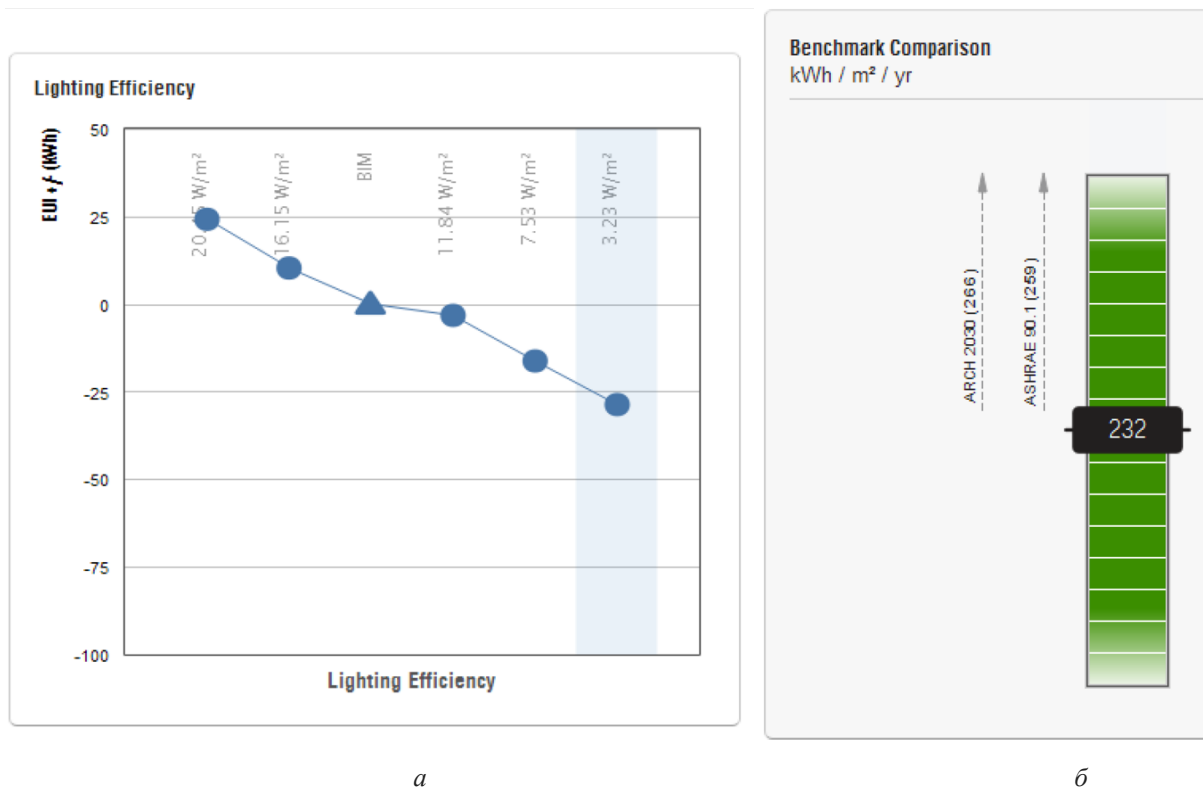


Рис. 3. а – діаграма з обраним поліпшенням опалення, вентиляція, кондиціювання повітря в програмному комплексі INSIGHT 360; б – результат, отриманий на платформі INSIGHT 360 для будівлі після застосування поліпшення кондиціювання повітря [2]

На основі даних, введених у модель BIM, і результатів, наданих програмним забезпеченням для енергетичного аналізу, у дослідженні [2] була виконана заміна у моделі системи кондиціювання повітря будівлі, яка дала свої позитивні результати.

Після удосконалення системи кондиціювання будівлі можна спостерігати економію енергозбереження:

61,09 кВт*год./(m^2 рік) з підсумковим споживанням: 198,02 кВт*год./(m^2 рік) [2].

Також слід відзначити що у рамках енергетичного моделювання у рамках даного дослідження було виконано удосконалення системи освітлення будівлі (система світлодіодного освітлення), яке дало змогу заощадити 26,8 кВт*год./(m^2 рік) (рис. 3), покращення якості отворів в

огорожувальних конструкціях і зовнішня якість облицювання віконного скла (заміна поточних вікон з одним склом на подвійне скло з низьким рівнем випромінювання), яке дало змогу заощадити 8,66 кВт*год./(м^2 рік), і інші удосконалення згідно з рисунків 4, 5.

Поліпшення	Назва сценарію	Споживання (кВт*год/м ² рік)	Енергозбереження (кВт*год/м ² рік)
Існуюча будівля	Існуюча будівля	259,11	-
Система кондиціювання	HVAC	198,02	61,09
Система світлодіодного освітлення	Світлодіодне освітлення	232,31	26,8
Віконне скло	Віконне скло	250,45	8,66
Система управління освітленням	Денне освітлення та Осс.С.	252,16	6,95
Ефективна електроенергія	Навантаження істекера	244,57	14,54
Фотоелектричні панелі	PV—панелі	241,10	18,01
Імітація глобального вдосконалення	Енергозберігаючий пакет	138,17	120,94

Рис. 4. Результати, отримані в різних проаналізованих сценаріях для будівлі [2]

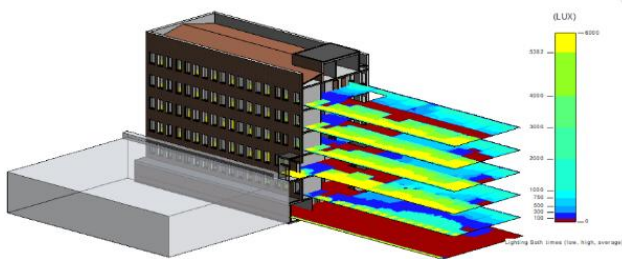


Рис. 5. Моделювання денного світла. Тривимірний вигляд аналізу освітленості в REVIT INSIGHT [2]

На основі проаналізованого дослідження можна зробити висновок, що ключовими і найпершими заходами з удосконалення була би оптимізація технологічних рішень, які стосуються систем опалення, вентиляції та кондиціювання, які напряду ведуть до мінімізації витрат енергоресурсів. Програмні комплекси, такі як REVIT, Insight 360 допомагають на основі енергетичного моделювання виявити найоптимальніші шляхи на шляху досягнення економії енергоресурсів. Також використання Insight 360, забезпечує оптимізацію денного світла та штучного освітлення в будівлях. Це дозволяє покращити комфорт для користувачів і зменшити енергетичні витрати.

В наступному дослідженні [3] розглядається оптимізація графіку виконання робіт за допомогою використання штучного інтелекту Deep Reinforcement Learning (DRL) із механізмом Valid Action Sampling (VAS). Стаття

досліджує впровадження DRL для вирішення проблеми планування будівництва з обмеженими ресурсами. Процес планування в дослідженні описується, як послідовний процес рішень з урахуванням чітких пріоритетів будівельних робіт. Механізм DRL з детальною інформацією про проект аналізує, обирає і визначає найбільш ефективні роботи, будівельні дії у певному порядку, оптимізуючи ефективність і прогрес проекту.

Графік виконання робіт є надзвичайно важливим у будь-якому проекті оскільки він допомагає визначити етапи реалізації проекту, встановити пріоритети та розподілити ресурси, дозволяє відстежувати виконання завдань у заплановані строки, уникати затримок і вчасно реагувати на проблеми. Критичні та правильні плани планування забезпечать чіткий і вільний від обмежень робочий процес для всіх робіт і підрядників на їхньому будівельному майданчику, що значно підвищує ефективність і зменшує загальну вартість. Щоб скласти графік будівництва, досвідчений планувальник із глибокими попередніми знаннями повинен ретельно обробляти всю інформацію з будівельного майданчика, а такий процес займає багато часу [14] саме тому використання алгоритмів програмного забезпечення і штучного інтелекту стає надзвичайно актуальним. Вони дозволяють автоматизувати аналіз даних, оптимізувати розподіл ресурсів і розробляти точні графіки робіт у значно коротші терміни. Штучний інтелект може враховувати безліч змінних, таких як доступність матеріалів, погодні умови, продуктивність робітників, та адаптувати графік у режимі реального часу, що мінімізує ризики затримок і перевитрат.

Науковці з Індії аналізували ефективність впровадження Технології Інтернету речей (IoT) в розумних будівлях [4] яка допомагає впровадити розумний моніторинг, управління та оптимізацію використання енергії. IoT-пристрої, такі як датчики та смарт-лічильники, забезпечують точне відстеження споживання енергії в реальному часі. Аналіз цих даних дозволяє виявляти неефективне використання енергії

та знаходити способи його скорочення. Розумні системи керування освітленням, клімат-контролем і обладнанням автоматично регулюють їх роботу відповідно до умов або розкладу, наприклад освітлення вимикається в порожніх приміщеннях, а опалення або кондиціонування зменшується, коли ніхто не перебуває у будівлі. Системи IoT дозволяють включати відновлювані джерела енергії, такі як сонячні батареї, в енергетичну мережу будівлі, таким чином забезпечуючи найкраще використання чистої енергії [15]. Інтеграція технології IoT з існуючою системою будівлі (рис. 6) покращує управління енергією в розумних будівлях, сприяючи безперебійному зв'язку між кількома системами будівель, щоб мінімізувати споживання енергії та підвищити стійкість [16].

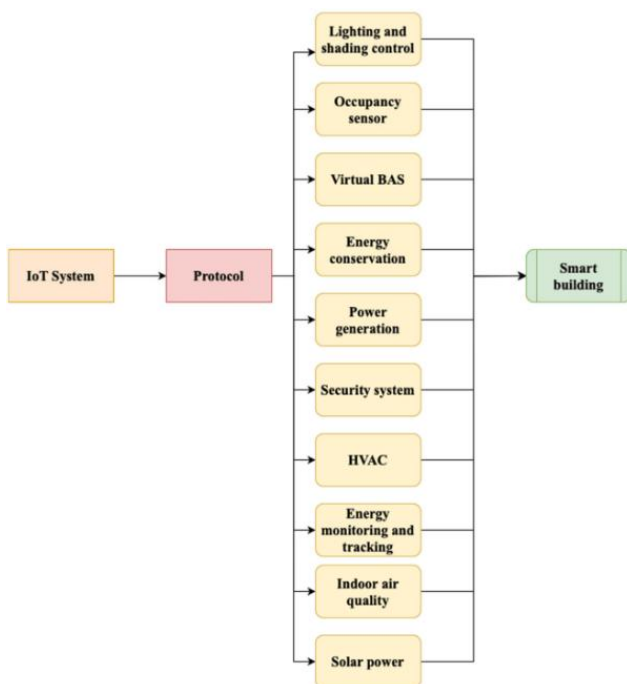


Рис. 6. Зв'язок IoT для пристроїв [4]

Технології Інтернету речей є одним із ключевих методів і підходів до енергозбереження, завдяки інтелектуальному управлінню забезпечується більш ефективне споживання енергетичними ресурсами в різних сферах життя та діяльності. IoT завдяки моніторингу та накопиченню даних, що до витрат енергії полегшує аналіз та виявлення найслабших місць у енергоспоживанні будівлі. IoT-

пристрої, такі як датчики та смарт-лічильники, забезпечують підвищенню комфорту в повсякденному житті, створенню безпечнішого середовища та оптимізації виробничих процесів. Впровадження IoT допомагає не лише економити кошти, але й зменшувати екологічний вплив, що є критично важливим у контексті сучасних викликів, пов'язаних зі зміною клімату.

Результати дослідження [4] показали що за рахунок використання IoT можливе скорочення споживання енергії на 30 %, а з експлуатаційними витратами можливе скорочення до 20 %, однак також дослідження відмічають деякі проблеми пов'язані з великими початковими інвестиціями, проблемами безпеки даних і складністю системної інтеграції.

Наступним перспективним напрямом дослідження, щодо мінімізації витрат енергоресурсів, є аналіз і оцінка ефективності використання геотермального теплового насоса (ГТН) для забезпечення опалення та охолодження. У аналітичному дослідженні [5] зазначається, що ефективність ГТН складає 300–500 % тепла, що виділяється на використану електроенергію, у порівнянні з традиційними обігрівачами, що працюють на спалюванні, або електричними обігрівачами, де ефективність ніколи не перевищує 100 %. Однак ГТН страждають від вищих початкових витрат на свердління та встановлення, ніж інші конкуруючі технології опалення.

На рисунку 7 показана схематична діаграма систем ГТН. Тепло ґрунту передається спочатку від тіла породи до стінки свердловини, а потім до циркулюючого теплоносія. По-друге, циркулюючий теплоносіє, у свою чергу, передає витягнуту з землі енергію теплому насосу на поверхні. Нарешті, тепловий насос використовує електроенергію для модернізації та переміщення теплової енергії від контуру заземлення до водяної рециркуляційної системи опалення, яка кондиціонує приміщення [5].

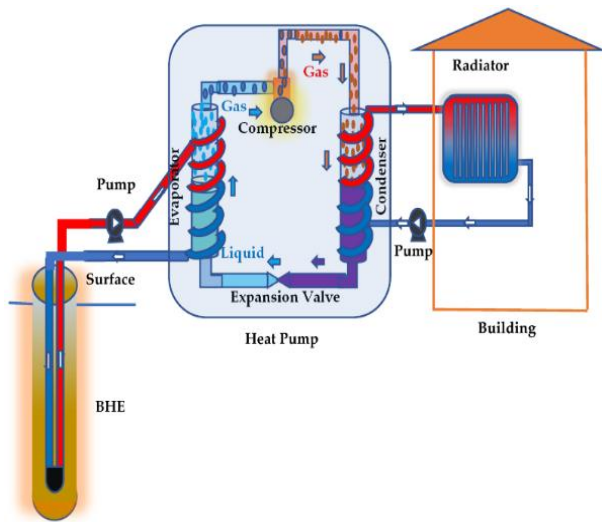


Рис. 7. Принципова схема потоку систем ГТН для моделі опалення (режим охолодження з реверсним потоком) [5]

В огляді акцентується увага на аналізі використання геотермального опалення і занадто низьке використання в порівнянні з іншими джерелами. Звіт МЕА (2021) показує, що світові запаси теплових насосів зростали приблизно на 10 % на рік протягом 2015–2020 років.

Це зростання призвело до того, що станом на червень 2020 року в Європі було встановлено понад 2,1 мільйона геотермальних теплових насосів [17]. Новий стимул для теплових насосів і мета встановлення 600 000 теплових насосів, щороку у Великобританії сприятимуть швидкому зростанню цієї кількості в найближчі роки [18]. Далла Лонга та ін. прогнозують, що до 2050 року виробництво тепла геотермальної енергії досягне приблизно 100–210 ТВт-год./рік [19].

За результатами статті [5] можна зробити висновки, що використання геотермального теплового насоса є перспективним напрямком дослідження однак реалізація таких технологій пов'язана з низкою технічних, економічних та екологічних викликів, які потребують глибокого аналізу.

Наукова новизна. Дослідження полягає у глибокому аналізі та порівнянні методів і шляхів, щодо економії енерговитрат. Такий підхід дозволяє оптимізувати і використовувати найбільш ефективні методи в залежності від вихідних параметрів та задач. Проаналізовані у цій

статті дослідження дають змогу розуміти, що при необхідності реалізації одного і того проекту в різних зовнішніх умовах необхідно впроваджувати і індивідуальні найбільш ефективні організаційно-технологічні рішення для кожного із них, які дозволяють зменшити витрати енергоресурсів.

Застосування Інтернет речей (IoT) та штучного інтелекту дозволяє оптимізувати витрати енергоресурсів під час експлуатації будівель, в залежності від виду та призначення будівель встановлюються окремі параметри, щодо ефективного споживання в автономному режимі. Але складність та значні інвестиції потребують більш детального аналізу та розрахунків, щодо ефективності в кожному окремому випадку будівництва.

Використання двошарових фасадних елементів може буди ефективними та енергозберігаючими. У регіонах з екстремальними температурами (холодними або спекотними), двошарові фасади зменшують тепловтрати взимку та перегрівання влітку. Вони створюють тепловий бар'єр між внутрішніми приміщеннями та зовнішнім середовищем. Двошарові фасади забезпечують додаткову звукоізоляцію, що є важливим у районах з високим рівнем шуму. Але у регіонах із помірним або теплим кліматом, де тепловтрати або перегрівання не є критичними, ефективність двошарових фасадів може бути мінімальною і також не варто забувати про високу вартість устаткування та обслуговування. Тому ключову роль тут відіграють подальші дослідження та розрахунки, щодо аналізу та оптимізаційних рішення, що до доцільності використання двошарових фасадних елементів в залежності від проекту та кліматичних умов.

Користь від впровадження БІМ-технологій залишається без сумнівів, практичне використання будівельних інформаційних моделей не раз це доводило. Найбільш знакові приклади використання можна привести у Лондоні при реалізації одного із найбільших інфраструктурних проектів Європи. БІМ використовували для інтеграції дизайну, планування та

будівництва нової залізничної лінії Crossrail та High-Speed Rail 2, в результаті вдалося скоротити витрати, знизити ризики, підвищити точність проектування та забезпечити надійність. Також вдалося забезпечити вдосконалення енергоефективності нових будівель, таких як хмарочос The Shard, а реставрація Букінгемського палацу включала цифрові моделі, що дозволили уникнути помилок. Виходячи із цього на сьогодні ключовими задачами є впровадження BIM-технологій в Україні.

Дослідження впровадження штучного інтелекту у процес складання графіків виконання будівельних робіт слугує основою для вдосконалення методів планування та управління будівельними проектами. Календарний графік будівельних робіт є ключовим інструментом управління проектом, оскільки забезпечує чітке планування строків, координацію дій між учасниками, оптимальне використання ресурсів і контроль витрат. Він допомагає уникати затримок, мінімізувати ризики та забезпечувати високу якість виконання робіт. Завдяки графіку проект стає більш організованим, а комунікація між усіма сторонами - прозорою та ефективною.

На шляху оптимізації організаційно-технологічних рішень із врахуванням мінімізації витрат енергоресурсів правильно складений графік виконання робіт відіграє ключову роль. Дослідження та вдосконалення цього процесу є надзвичайно важливим для забезпечення ефективності будівельних проектів і сталого використання ресурсів. І не менш важливим є подальше дослідження геотермального опалення, оскільки цей метод забезпечує енергоефективність та екологічність, що є актуальними викликами сучасного будівництва.

Загальні висновки. Застосування новітніх технологій таких, як IoT у поєднанні з алгоритмами штучного інтелекту, дозволяє здійснювати моніторинг і управління енергоспоживанням. Штучний інтелект аналізує безліч варіантів конструкцій, матеріалів і планувань, і допомагає за короткий час визначити найоптимальніший

порядок виконання робіт, щоб знайти найбільш енергоефективні рішення, ще на етапі проектування, наприклад, алгоритми оцінюють тепловтрати, інсоляцію, вентиляцію та пропонують зміни для покращення ефективності. Розробка та впровадження інноваційних рішень є критично важливим для досягання ефективного енергоспоживання на етапах проектування, будівництва й експлуатації будівель. Проаналізовані дослідження, рекомендації та методики, наведені в цій статті, можуть стати цінними для організацій, які прагнуть оптимізувати організаційно-технологічні рішення щодо спорудження будівель із урахуванням мінімізації витрат енергоресурсів. Застосування цих підходів сприятиме підвищенню ефективності управління проектами та покращенню загальних показників діяльності.

Мінімізація витрат енергоресурсів це комплексний підхід, який охоплює не лише електроенергію, але також і оптимізацію використання теплової енергії, світлових ресурсів, палива та води. Розглянуті рішення демонструють, що інновації в будівництві дозволяють ефективно знижувати енергоспоживання на різних етапах будівництва та експлуатації будівель. Слід відмітити, що мінімізація витрат енергоресурсів досягається через зменшення потреби в енергії для опалення та охолодження будівлі, зменшення тепловтрат при використанні більш ефективних сучасних матеріалів із високими ізоляційними властивостями, електроенергії для обладнання, пального для будівельної техніки. А також зменшення використання електроенергії, необхідної для роботи систем освітлення й обладнання завдяки таким простим фундаментальним методам, як більшому доступу до природного освітлення, шляхом правильного розташування будівлі відносно сонця, а також через автоматизацію приладів і керування штучним інтелектом.

Подальші дослідження передбачають розгляд інших сучасних методів оптимізації, які також відіграють важливу роль у мінімізації витрат енергоресурсів. Оптимізація організаційно-технологічних

рішень спорудження будівель із урахуванням мінімізації витрат енергоресурсів також можлива завдяки інтеграції сонячних панелей у дизайн будівлі, вибір відповідних матеріалів і конструкцій для зменшення відбивання сонячного випромінювання та покращення його поглинання, використання сонячних геліосистем для нагріву води чи підтримання температури в басейнах, оптимізація роботи ліфтів, ескалаторів і систем вентиляції за рахунок правильного планування, використання енергоефективного обладнання (ліфтів із функцією рекуперації енергії під час спуску), управління механічними системами через розумні датчики для зменшення непотрібного використання, впровадження систем збору дощової води чи повторного використання «сірих» стоків, мінімізація відходів будівельних матеріалів і використання місцевої сировини, переробка матеріалів після закінчення життєвого циклу будівлі.

На основі розглянутих матеріалів можна виділити наступні основні фактори, які впливають на оптимізацію організаційно-технологічних рішень спорудження будівель із урахуванням мінімізації витрат енергоресурсів: кваліфікація проектною команди, яка забезпечує якісні рішення для мінімізації витрат енергоресурсів, залучення підрядників з досвідом в енергоефективному будівництві, використання BIM-технологій, сучасні методи управління будівництвом і використання штучного інтелекту та автоматизованих систем, технології будівництва, які включають модульні та інноваційні методи та скорочують ресурси, необхідні для будівництва, логістика постачання матеріалів, Оптимізована або автоматизована логістика дозволяє зменшити витрати пального, час на доставку, а також знизити вплив на навколишнє середовище.

Ефективна логістика постачання матеріалів сприяє зменшенню витрат не тільки на транспортування, але й на весь будівельний процес: скорочення енергозатрат на складування завдяки оптимізації обсягів замовлень, зниження викидів CO₂, що сприяє екологічній відповідальності будівництва, підвищення ефективності використання часу, що дозволяє завершувати проєкти швидше та дешевше.

Оптимізована логістика є невід'ємною частиною сучасних підходів до енергозбереження у будівельній галузі та повинна бути інтегрована у процес проектування й управління.

Перспективи. Енергоефективність має безліч переваг. По-перше, впровадження сучасних технологій і методів дозволяє знизити витрати на реалізацію проєкту та підвищити ефективність будівельного процесу.

Крім того, застосування енергоефективних матеріалів, обладнання та техніки сприяє зменшенню негативного впливу на довкілля. У результаті енергоефективне будівництво сприяє поліпшенню якості повітря, мінімізує вплив кліматичних змін і створює комфортніші умови всередині будівель.

Енергоефективність можна уявити як «збережену енергію» або навіть як найдоступніший ресурс на будівельному майданчику. Тому кожна оптимізаційна стратегія, спрямована на зниження енергоспоживання, сприяє впровадженню принципів енергоефективного будівництва.

Подальші дослідження повинні зосередитись на створенні підходів щодо визначення найоптимальніших шляхів в залежності від зовнішніх факторів середовища та цілей проєкту, які дозволяють зменшити енергоспоживання під час зведення об'єктів і їх експлуатацію.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Premrov M., Kozem Šilih E. Numerical analysis of the racking behaviour of multi-storey timber-framed buildings considering load-bearing function of double-skin façade elements. *Sustainability*. 2023. № 15. P. 6379. URL: <https://doi.org/10.3390/su15086379>

2. Francisco Javier Montiel-Santiago, Manuel Jesús Hermoso-Orzáez, Manuel Jesús Hermoso-Orzáez. Sustainability and Energy Efficiency : BIM 6D. Study of the BIM methodology applied to hospital buildings. Value of interior lighting and daylight in energy simulation. *Sustainability*. 2020. № 12 (14). P. 5731. URL: <https://doi.org/10.3390/su12145731>
3. Yuan Yao, Vivian W. Y. Tam, Jun Wang, Khoa N. Le, Anthony Butera. Automated construction scheduling using deep reinforcement learning with valid action sampling. *Automation in Construction* Volume. 2024. № 166. P. 105622. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105622>
4. Mukilan Poyyamozi, Balasubramanian Murugesan, Narayanamoorthi Rajamanickam, Mohammad Shorfuzzaman, Yasser Aboelmag. IOT — a promising solution to energy management in smart buildings : a systematic review, applications, barriers, and future scope. *Buildings*. 2024. № 14 (11). P. 3446. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14113446>
5. Abdelazim Abbas Ahmed, Mohsen Assadi, Adib Kalantar, Tomasz Sliwa, Aneta Sapinska-Sliwa. A critical review on the use of shallow geothermal energy systems for heating and cooling purposes. *Energies*. 2022. № 15 (12). P. 4281. URL: <https://doi.org/10.3390/en15124281>
6. Šilih E. K., Premrov M. Numerical study of racking resistance of timber-made double-skin façade elements. *Adv. Prod. Eng. Manag.* 2022. № 17. Pp. 231–242. URL: <https://doi.org/10.3390/su15086379>
7. Chan A. L. S., Chow T. T., Fong K. F., Lin Z. Investigation on energy performance of double skin façade in hong kong. *Energy Build.* 2009. № 41. Pp. 1135–1142. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.012>
8. Saelens D., Roels S., Hens H. Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades. *Build. Environ.* 2008. № 43. Pp. 638–650. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.024>
9. Ali Ghaffarianhoseini, Amirhosein Ghaffarianhoseini, Umberto Berardi, John Tookey, Danny Hin Wa Li, Shahab Kariminia. Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs). *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016. № 60. Pp. 1052–1065. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.130>
10. Huckemann V., Leão É. B., Leao M. Acoustic comfort in office buildings with double skin glass façades. *Bauphysik*. 2009. № 31. Pp. 305–312. URL: <https://doi.org/10.1002/bapi.200910040>
11. Yung P., Wang X. A 6D cad model for the automatic assessment of building sustainability. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 2014. № 11. Pp. 531–540. URL: <https://doi.org/10.5772/58446>
12. BuildingSMART Spanish Chapter. URL: <https://www.buildingsmart.es/bim/> (дата звернення: 24.05.2020).
13. Wang X., Yung P., Lou H. B., Trujiens M. An innovative method for project control in lng project through 5d cad: a case study. *Autom. Constr.* 2014. № 45. Pp. 126–135. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.011>
14. Amer F., Koh H. Y., Golparvar-Fard M. Automated methods and systems for construction planning and scheduling: critical review of three decades of research. *J. Constr. Eng. Manag.* 2021. № 147 (7). Pp. 1–17. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002093](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002093)
15. Karuna G., Ediga P., Akshatha S., Anupama P., Sanjana T., Mittal A., Rajvanshi S., Habelalmateen M. I. Smart energy management : real-time prediction and optimization for iot-enabled smart homes. *Cogent Eng.* 2024. № 11. URL: <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2390674>
16. Akhtar S. W., Rehman S., Akhtar M., Khan M. A., Riaz F., Chaudry Q., Young R. Improving the robustness of neural networks using k-support norm based adversarial training. *IEEE Access*. 2016. № 4. Pp. 9501–9511. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7795200>
17. Garabetian T. EGECE Geothermal Market Report. European Geothermal Energy Council : Bruxelles, Belgium, 2021. URL: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=EGECE+Geothermal+Market+Report&author=Garabetian,+T.&publication_year=2021
18. Meek C. Heat pumps and uk's decarbonization : lessons from an ofgem dataset of more than 2000 domestic installations. In *Context-Methodology-Analysis-Discussion-Recommendations*. Spring 2021; RECC: London, UK, 2021. URL: <https://www.recc.org.uk/pdf/performance-data-research-focused.pdf>
19. Longa F. D., Nogueira L. P., Limberger J., van Wees J.-D., van der Zwaan B. Scenarios for geothermal energy deployment in Europe. *Energy*. 2020. № 206. P. 118060. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118060>

REFERENCES

1. Premrov M. and Kozem Šilih E. Numerical analysis of the racking behaviour of multi-storey timber-framed buildings considering load-bearing function of double-skin façade elements. *Sustainability*. 2023, no. 15, p. 6379. URL: <https://doi.org/10.3390/su15086379>
2. Francisco Javier Montiel-Santiago, Manuel Jesús Hermoso-Orzáez and Manuel Jesús Hermoso-Orzáez. Sustainability and energy efficiency : BIM 6D. Study of the BIM methodology applied to hospital buildings. Value of interior lighting and daylight in energy simulation. *Sustainability*. 2020, no. 12 (14), p. 5731. URL: <https://doi.org/10.3390/su12145731>
3. Yuan Yao, Vivian W.Y. Tam, Jun Wang, Khoa N. Le and Anthony Butera. Automated construction scheduling using deep reinforcement learning with valid action sampling. *Automation in Construction*. 2024, no. 166, p. 105622. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105622>
4. Mukilan Poyyamozi, Balasubramanian Murugesan, Narayanamoorthi Rajamanickam, Mohammad Shorfuzzaman and Yasser Aboelmag. IOT — a promising solution to energy management in smart buildings : a

systematic review, applications, barriers, and future scope. *Buildings*. 2024, no. 14 (11), p. 3446. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings14113446>

5. Abdelazim Abbas Ahmed, Mohsen Assadi, Adib Kalantar, Tomasz Sliwa and Aneta Sapinska-Sliwa. A critical review on the use of shallow geothermal energy systems for heating and cooling purposes. *Energies*. 2022, no. 15 (12), p. 4281. URL: <https://doi.org/10.3390/en15124281>

6. Šilih E.K. and Premrov M. Numerical study of racking resistance of timber-made double-skin façade elements. *Adv. Prod. Eng. Manag.* 2022, no. 17, pp. 231–242. URL: <https://doi.org/10.3390/su15086379>

7. Chan A.L.S., Chow T.T., Fong K.F. and Lin Z. Investigation on energy performance of double skin façade in hong kong. *Energy Build.* 2009, no. 41, pp. 1135–1142. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.05.012>

8. Saelens D., Roels S., Hens H. Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades. *Build. Environ.* 2008, no. 43, pp. 638–650. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.024>

9. Ali Ghaffarianhoseini, Amirhosein Ghaffarianhoseini, Umberto Berardi, John Tookey, Danny Hin Wa Li and Shahab Kariminia. Exploring the advantages and challenges of double-skin façades (DSFs). *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, no. 60, pp. 1052–1065. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.130>

10. Huckemann V., Leão É.B. and Leao M. Acoustic comfort in office buildings with double skin glass façades. *Bauphysik*. 2009, no. 31, pp. 305–312. URL: <https://doi.org/10.1002/bapi.200910040>

11. Yung P. and Wang X. A 6D cad model for the automatic assessment of building sustainability. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 2014, no. 11, pp. 531–540. URL: <https://doi.org/10.5772/58446>

12. BuildingSMART Spanish Chapter. URL: <https://www.buildingsmart.es/bim/> (accessed on 24 April 2020).

13. Wang X., Yung P., Lou H. B. and Trujiens M. An innovative method for project control in lng project through 5d cad : a case study. *Autom. Constr.* 2014, no. 45, pp. 126–135. URL: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.011>

14. Amer F., Koh H.Y. and Golparvar-Fard M. Automated methods and systems for construction planning and scheduling: critical review of three decades of research. *J. Constr. Eng. Manag.* 2021, no. 147 (7), pp. 1–17. URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002093](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002093)

15. Karuna G., Ediga P., Akshatha S., Anupama P., Sanjana T., Mittal A., Rajvanshi S. and Habelalmateen M.I. Smart energy management : real-time prediction and optimization for iot-enabled smart homes. *Cogent Eng.* 2024, no. 11. URL: <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2390674>

16. Akhtar S.W., Rehman S., Akhtar M., Khan M.A., Riaz F., Chaudry Q. and Young R. Improving the robustness of neural networks using k-support norm based adversarial training. *IEEE Access*. 2016, no. 4, pp. 9501–9511. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7795200>

17. Garabetian T. EGECE Geothermal Market Report. European Geothermal Energy Council : Bruxelles, Belgium, 2021. URL: https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=EGECE+Geothermal+Market+Report&author=Garabetian,+T.&publication_year=2021

18. Meek C. Heat pumps and uk's decarbonisation: lessons from an ofgem dataset of more than 2000 domestic installations. In *Context-Methodology-Analysis-Discussion-Recommendations*; Spring 2021; RECC : London, UK, 2021. URL: <https://www.recc.org.uk/pdf/performance-data-research-focused.pdf>

19. Longa F.D., Nogueira L.P., Limberger J., van Wees J.-D. and van der Zwaan B. Scenarios for geothermal energy deployment in Europe. *Energy*. 2020, no. 206, p. 118060. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118060>

Надійшла до редакції: 12.05.2025.